



CONFERENCE PROCEEDING 2026 ::

โครงการประชุมวิชาการ บัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 16

เรื่อง “บัณฑิตวิจัย สร้างสรรค์ และนวัตกรรม : ยกระดับองค์ความรู้
สู่การสร้างมูลค่าเชิงพาณิชย์อย่างยั่งยืน”

วันที่ 28-29 พฤษภาคม 2569

กลุ่ม วิทยาศาสตร์/วิทยาศาสตร์สุขภาพ/
วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม/
สัตวศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร

จัดโดย :
มหาวิทยาลัยศิลปากร

คำนำ

ด้วยมหาวิทยาลัยศิลปากร ร่วมกับ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา บัณฑิตวิทยาลัยวชิรญาณวรวิหาร มหาวิทยาลัยมหามกุฏราชวิทยาลัย และศูนย์มานุษยวิทยาสิรินธร (องค์การมหาชน) กำหนดจัดโครงการประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 16 เรื่อง “บัณฑิตวิจัย สร้างสรรค์ และนวัตกรรม : ยกระดับองค์ความรู้สู่การสร้างมูลค่าเชิงพาณิชย์อย่างยั่งยืน” ระหว่างวันที่ 28 - 29 พฤษภาคม 2569 ผ่านระบบออนไลน์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปิดโอกาสให้อาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ และนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาได้นำเสนอผลงานวิจัยและงานสร้างสรรค์ที่ดีและมีคุณภาพ เป็นการสร้างเครือข่ายของการวิจัยและงานสร้างสรรค์ เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ ร่วมกัน ผลงานวิจัยที่เผยแพร่ในการประชุมวิชาการนี้ได้มีการบูรณาการศาสตร์และศิลป์เข้าด้วยกันตาม วิสัยทัศน์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร คือ “มหาวิทยาลัยชั้นนำแห่งการสร้างสรรค์ระดับสากล บูรณาการ ศาสตร์และศิลป์เพื่อสังคมที่ยั่งยืน” โดยจัดให้มีการนำเสนอผลงานวิจัย จำนวน 3 กลุ่มสาขาวิชา ได้แก่ 1) กลุ่มศิลปะและการออกแบบ 2) กลุ่มมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ 3) กลุ่มวิทยาศาสตร์ /วิทยาศาสตร์ สุขภาพ /วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม /สัตวศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร ทั้งนี้ คณะกรรมการจัดการประชุมฯ ได้รวบรวมบทความวิจัยที่ผ่านการพิจารณาจัดทำเป็นรายงานสืบเนื่องจากการประชุมรูปแบบออนไลน์ (Online Proceedings) เพื่อเผยแพร่บนเว็บไซต์ของการประชุมวิชาการฯ มหาวิทยาลัยศิลปากรหวังเป็นอย่างยิ่งว่า การจัดประชุมวิชาการในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อแวดวงวิชาการ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาสังคมและประเทศในด้านต่าง ๆ ต่อไป

ขอขอบคุณท่านอธิการบดี ท่านวิทยากร เจ้าภาพร่วมจัดการประชุม ได้แก่ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา บัณฑิตวิทยาลัยวชิรญาณวรวิหาร มหาวิทยาลัยมหามกุฏราชวิทยาลัย และศูนย์มานุษยวิทยาสิรินธร (องค์การมหาชน) ผู้บริหารและคณาจารย์จากคณะวิชาในสถาบันต่าง ๆ ที่ให้ความร่วมมือในการดำเนินงานจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี ตลอดจนผู้ทรงคุณวุฒิที่ร่วมเป็นผู้พิจารณาคัดเลือก ผลงานวิจัย และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นโอกาสดีที่จะร่วมมือกันพัฒนาการจัดการศึกษาระดับ บัณฑิตศึกษาให้ก้าวหน้ายิ่งขึ้นต่อไป



(รองศาสตราจารย์ ดร.พรทรัพย์ พรสวัสดิ์)

ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

รองประธานคณะกรรมการจัดโครงการประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 16



ข้อมูลการจัดโครงการประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 16

เรื่อง “บัณฑิตวิจัย สร้างสรรค์ และนวัตกรรม : ยกระดับองค์ความรู้สู่การสร้างมูลค่าเชิงพาณิชย์อย่างยั่งยืน”

การประชุมวิชาการครั้งนี้ เป็นการจัดประชุมวิชาการระดับชาติเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัย/ผลงานวิทยานิพนธ์/การค้นคว้าอิสระของอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ และนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ใน 3 กลุ่มสาขาวิชา คือ 1) กลุ่มศิลปะและการออกแบบ 2) กลุ่มมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ 3) กลุ่มวิทยาศาสตร์/วิทยาศาสตร์สุขภาพ /วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม /สัตวศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร นำเสนอด้วยวาจาในรูปแบบออนไลน์ โดยมีบทความวิจัยที่เข้าร่วมการนำเสนอจากสถาบันต่าง ๆ จำนวนทั้งสิ้น 90 บทความ จาก 16 สถาบัน และเป็นบทความที่มาจากหน่วยงานภายนอกสถาบันเจ้าภาพ จำนวน 47 บทความ คิดเป็นร้อยละ 52.22 ซึ่งทุกบทความที่ได้รับการคัดเลือกได้รับการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิ (peer review) ที่เป็นผู้เชี่ยวชาญในสาขานั้น ๆ บทความละ 3 คน และบทความฉบับสมบูรณ์ (Full paper) ที่ผ่านการประเมินแล้ว จะได้รับการตีพิมพ์ในรายงานสืบเนื่องจากการประชุมรูปแบบออนไลน์ (Online Proceedings)

กองบรรณาธิการจัดทำรายงานการประชุมหรือคณะกรรมการจัดประชุมในครั้งนี้นำประกอบด้วย ศาสตราจารย์หรือผู้ทรงคุณวุฒิระดับปริญญาเอกที่มาจากนอกสถาบันเจ้าภาพ จำนวน 8 คน จากทั้งหมด 25 คน คิดเป็นร้อยละ 32 โดยมีรายนามคณะกรรมการจัดประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ และรายนามผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ ดังต่อไปนี้



คณะกรรมการจัดประชุม

มหาวิทยาลัยศิลปากร

รองศาสตราจารย์ ดร.ประสพชัย พัฒน์โรจนโสภณ

รองศาสตราจารย์ ดร.พรทรัพย์ พรสวัสดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาธิต นิรติศัย

อาจารย์จินตนา เปี่ยมศิริ

อาจารย์ ดร.นฤพล หวังธงชัยเจริญ

อาจารย์ ดร.พบสุข ทัดทอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรวัฒน์ สิริเวสมาศ

รองศาสตราจารย์ ดร.บุลย์จีรา ชिरเวทย์

รองศาสตราจารย์ ดร.นพพร จันทรนำชู

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุพันธ์ ลิ้มปชยาพร

รองศาสตราจารย์ ดร.กษมา ศิริสมบุญ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย อารักษ์โพชนงค์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลิสรา คงใจมั่น โยชิตะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทรภร ผลิตากุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา บรรจงประเสริฐ

นางคันสนีย์ สิทธิศักดิ์

นางชนิศา ศรียา

ศูนย์มานุษยวิทยาสิรินธร (องค์การมหาชน)

ดร.นฤพนธ์ ดวงวิเศษ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญชนา สุขสมจิตร

บัณฑิตวิทยาลัยวชิรญาณไวรัส มหาวิทยาลัยมหามกุฏราชวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิญ รักษ์สัตย์

ดร.เชน เพชรรัตน์

มหาวิทยาลัยมหิดล

รองศาสตราจารย์ ดร.ภก.สาธิต พุทธิพิพัฒน์ขจร

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รองศาสตราจารย์ ดร.กริสัน ชัยมูล



มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช

รองศาสตราจารย์ ดร.เชมณัฐ มิ่งศิริธรรม

มหาวิทยาลัยนเรศวร

อาจารย์ ดร.รพีภา จุฑะกนก

ผู้ทรงคุณวุฒิ

กลุ่มศิลปะและการออกแบบ

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โกเมศ กาญจนพ้ายัพ	มหาวิทยาลัยศิลปากร
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร กาญจนภูมิ	มหาวิทยาลัยศิลปากร
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรุฒิ มั่นสุขผล	มหาวิทยาลัยศิลปากร
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย ลายเสมา	มหาวิทยาลัยศิลปากร
5. รองศาสตราจารย์ ดร.นันทน์ เรืองฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
6. รองศาสตราจารย์ ดร.เอกรณ บงทำไม้	มหาวิทยาลัยศิลปากร
7. รองศาสตราจารย์ ดร.อนิรุทธิ์ สติมัน	มหาวิทยาลัยศิลปากร
8. อาจารย์ ดร.ประจักษ์ สุบันตี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
9. รองศาสตราจารย์ ดร.นพดล ตั้งสกุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
10. รองศาสตราจารย์ ดร.สฤษฎ์ สันติเวส	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
11. รองศาสตราจารย์ ดร.วิรุจ ถิ่นนคร	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสเมฉาย บุญญานันต์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
13. ดร.อาภาภรณ์ วงศ์ลักษณ์พันธ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
14. อาจารย์ ดร.ศรุต โพธิ์ไพร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
15. รองศาสตราจารย์ ดร.นิรัช สุดสังข์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
16. รองศาสตราจารย์ ดร.พัทมน เสลานนท์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ จิตรกร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโศก ไทยจันทรารักษ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวรรณ สุวรรณผาติ	มหาวิทยาลัยรังสิต
20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนทิพย์ รังสิตสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
21. รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เขียวมั่ง	มหาวิทยาลัยบูรพา
22. ดร.วิทวัส ทองเขียว	นักวิชาการ



กลุ่มมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ดีเลิศ	มหาวิทยาลัยศิลปากร
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธาดาทิเบศร์ ภูทอง	มหาวิทยาลัยศิลปากร
3. รองศาสตราจารย์ ดร.ศิวินิต อรรถภูมิกุล	มหาวิทยาลัยศิลปากร
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ เจษฎาลักษณ์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์สุดา พุฒजर	มหาวิทยาลัยศิลปากร
6. รองศาสตราจารย์ ดร.ไชยยศ ไพวิทยศิริธรรม	มหาวิทยาลัยศิลปากร
7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรินทร์ เทวตา	มหาวิทยาลัยศิลปากร
8. รองศาสตราจารย์ ดร.ปรเมินทร์ จารูวร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
9. รองศาสตราจารย์ ดร.กรศุทธิ์ ขอฟ่วงกลาง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
10. อาจารย์ ดร.อภินพ อติพิบูลย์สิน	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
11. รองศาสตราจารย์ ดร.พรรณธิดา เหล่าพวงศักดิ์	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัมเรศ เทพมา	มหาวิทยาลัยพะเยา
13. รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญคณิต อวรณ์	มหาวิทยาลัยพะเยา
14. อาจารย์ ดร.ปริญญา มรรคสิริสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี
15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ราชันย์ นิลวรรณภา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
16. อาจารย์ ดร.นิติพงศ์ พิเชฐพันธ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาริสุทธิ์ เลิศคชาธาร	มหาวิทยาลัยรังสิต
18. อาจารย์ ดร.ประจักษ์ สุปันตี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
19. รองศาสตราจารย์ ดร.เขมณัฏฐ์ มิ่งศิริธรรม	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
20. นางสาวยุวเรศ วุทธิพรพล	นักวิชาการ



กลุ่มวิทยาศาสตร์ / วิทยาศาสตร์สุขภาพ / วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม /
สัตวศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร

1. อาจารย์ ดร.ดุสิต ชัยประสิทธิกุล	มหาวิทยาลัยศิลปากร
2. รองศาสตราจารย์ ดร.ประหยัด แสงงาม	มหาวิทยาลัยศิลปากร
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิกิร ศรีภิรมย์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริพร บริรักษ์วิสุทธิศักดิ์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรทิพย์ โต๊ะสิงห์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย	มหาวิทยาลัยศิลปากร
7. รองศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ เจริญกิจอมร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณิชนันท์ สิริสุนทร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชชาวรรณ มงคล	มหาวิทยาลัยศิลปากร
10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนวดี พรหมจันทร์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทัศนวรรณ ศูนย์กลาง	มหาวิทยาลัยศิลปากร
12. รองศาสตราจารย์ ดร. เกสัชกรปริญทร์ เจริญสุขใส	มหาวิทยาลัยศิลปากร
13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกสัชกรหญิงสุภัตสร เพ็ญนาม	มหาวิทยาลัยศิลปากร
14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวรรณ เล้าอรุณ	มหาวิทยาลัยศิลปากร
15. อาจารย์ ดร.พัฒนัฏฐา วิชาของทิพย์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
16. รองศาสตราจารย์ ดร. เกสัชกรฉัตรชัย ฉันทไพศาล	มหาวิทยาลัยศิลปากร
17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกสัชกรพิริยศ ภูมิศิลปธรรม	มหาวิทยาลัยศิลปากร
18. รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภวรรณ รัตสุข	มหาวิทยาลัยศิลปากร
20. รองศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล อันแอ่ง	มหาวิทยาลัยศิลปากร
21. อาจารย์ ดร.สิทธิชัย แซ่เหล็ม	มหาวิทยาลัยศิลปากร
22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ สุวรรณแพทย์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณะ เรืองฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพคุณ แสงเขียว	มหาวิทยาลัยศิลปากร
25. รองศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนนมาลย์ จันทร์เอี่ยม	มหาวิทยาลัยศิลปากร
27. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนัย พงษ์พินิจภิญโญ	มหาวิทยาลัยศิลปากร
28. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกสัชกรสรวง รุ่งประกายพรรณ	มหาวิทยาลัยศิลปากร
29. อาจารย์ ดร.พีรพงศ์ ภควณิช	มหาวิทยาลัยศิลปากร
30. อาจารย์ ดร.ธรรมวิเศษ ประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศิลปากร
31. อาจารย์ ดร.พัชรภาพร พงษ์พัฒน์	มหาวิทยาลัยศิลปากร



การประชุมวิชาการ
บัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 16
วันที่ 28 - 29 พฤษภาคม 2569
“บัณฑิตวิจัย สร้างสรรค์ และนวัตกรรม :
ยกระดับองค์ความรู้สู่การสร้างมูลค่าเชิงพาณิชย์อย่างยั่งยืน”

32. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญพิสุทธิ์ ทองหยวก	มหาวิทยาลัยศิลปากร
33. รองศาสตราจารย์ ดร.พรทรัพย์ พรสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
34. อาจารย์ ดร.อรรณพ บริรักษ์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
35. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชจิรา พงศ์นิมิตประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศิลปากร
36. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุษบา เผ่าทองจีน	มหาวิทยาลัยศิลปากร
37. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกสัชกรหญิงน้ำฝน ศรีบัณฑิต	มหาวิทยาลัยศิลปากร
38. รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศนวงศ์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
39. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกสัชกรสุรสิทธิ์ ล้อจิตรอำนาจ	มหาวิทยาลัยศิลปากร
40. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกสัชกรกวิณ ดวงมี	มหาวิทยาลัยศิลปากร
41. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑามาศ ชุมลักษณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
42. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา พ่วงประพันธ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
43. รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงศ์ อัครกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
44. รองศาสตราจารย์ ดร.อินทาวุธ สรรพวรสถิตย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
45. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิกันต์ กุพงษ์ศักดิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
46. อาจารย์ ดร. เกสัชกรคาเซน คงแก้ววรรณะ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
47. รองศาสตราจารย์ ดร. เกสัชกรหญิงภูรี อนันต์โชติ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
48. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกสัชกรกิตติยศ ยศสมบัติ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
49. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกสัชกรหญิงภัณฑิรา ปริญญารักษ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
50. รองศาสตราจารย์ ดร.จิรารัตน์ อนันตกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
51. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พินิตา งามเชื้อชิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
52. อาจารย์ ดร.ชญาภา เยี่ยงวีรชน	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
53. อาจารย์ ดร.ธนเทพ เหลืองทองคำ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
54. อาจารย์ ดร.สุเมธ กิรติมนิชย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
55. รองศาสตราจารย์ ดร.จุราพร พงศ์เวชรักษ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
56. รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย วิทยาเกียรติเลิศ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
57. อาจารย์ ดร.พรจันทร์ วอลเตอร์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
58. รองศาสตราจารย์ ดร.วิรัช นาคเขียว	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
59. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุธน ตาดี	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
60. รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี วงษ์สะพาน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
61. รองศาสตราจารย์คชินทร์ โกกนุทาภรณ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์



62. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อริกา ศรีทอง	มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
63. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทพกัญญา หาญศิลาวัตร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
64. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณิณี เกตุคง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
65. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เมธาวี เพียรภักดิ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
66. รองศาสตราจารย์ ดร.กนกรัตน์ ลิ้มปิโสภณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
67. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รมิตาญ์ อยู่สุข	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
68. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ อธิพรชัย	มหาวิทยาลัยบูรพา
69. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกสัชกรหญิงณัฐณิชา กุลธนชัยโรจน์	มหาวิทยาลัยบูรพา
70. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วชิราภรณ์ อาชาวาคม	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
71. รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี
72. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เกสัชกรอรรถวิทย์ สมศิริ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
73. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกสัชกรอัมภาวค์ พลนอก	สถาบันวิทยาการประกอบการแห่ง อโยธยา
74. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒนตรา ศรีญาณลักษณ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
75. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชระพงษ์ วงศ์สกุล	มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
76. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชัยรัตน์ แก้วเจือ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
77. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชูบุอุปการ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
78. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร จันทศรีชา	มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
79. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประนมกร ชูศรี	มหาวิทยาลัยคริสเตียน
80. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นวเดโช ชาญขุนทด	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
81. พันตำรวจเอกภาณุภัท กิตติพันธ์	กองบัญชาการตำรวจสอบสวนกลาง



กำหนดการ

โครงการประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 16

เรื่อง “บัณฑิตวิจัย สร้างสรรค์ และนวัตกรรม : ยกระดับองค์ความรู้สู่การสร้างมูลค่าเชิงพาณิชย์อย่างยั่งยืน”

วันที่ 28 - 29 พฤษภาคม 2569

โดยความร่วมมือระหว่าง มหาวิทยาลัยศิลปากร ร่วมกับ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา บัณฑิตวิทยาลัยวชิรญาณวัชรโรศ มหาวิทยาลัยมหามกุฏราชวิทยาลัย และศูนย์มานุษยวิทยาสิรินธร (องค์การมหาชน)

.....
วันพฤหัสบดีที่ 28 พฤษภาคม 2569

9.00 - 09.15 น.

กล่าวรายงาน

โดย รองศาสตราจารย์ ดร.พรทรัพย์ พรสวัสดิ์

ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยศิลปากร

กล่าวเปิดงาน

โดย อธิการบดีมหาวิทยาลัยศิลปากร

9.15 - 10.15 น.

บรรยายพิเศษเรื่อง

"พลิกโฉมสมุนไพรไทยสู่นวัตกรรมเวชสำอางเพื่อการผลิตเชิงพาณิชย์"

(Transforming Thai Herbs into Commercial Cosmeceutical Innovations)

โดย ดร.สิทธิพงศ์ สรเดช

นักวิจัยอาวุโส ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมผลิตภัณฑ์สมุนไพร

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

10.30 - 12.00 น.

นำเสนอผลงานวิจัยแบบออนไลน์ แยกตามกลุ่มสาขาวิชา

13.00 - 16.30 น.

นำเสนอผลงานวิจัยแบบออนไลน์ แยกตามกลุ่มสาขาวิชา

วันศุกร์ที่ 29 พฤษภาคม 2569

9.00 - 12.00 น.

นำเสนอผลงานวิจัยแบบออนไลน์ แยกตามกลุ่มสาขาวิชา

13.00 - 16.30 น.

นำเสนอผลงานวิจัยแบบออนไลน์ แยกตามกลุ่มสาขาวิชา

สารบัญ

กลุ่มวิทยาศาสตร์ /วิทยาศาสตร์สุขภาพ /วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม / สัตวศาสตร์และ
เทคโนโลยีการเกษตร

ชื่อ-นามสกุล	ชื่อบทความ	เลขที่หน้า
อภิสร อ้นขวัญเมือง	การแทนที่ไขมันอิ่มตัวในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตสเปรตด้วยโอเลโอเจลจาก น้ำมันรำข้าวที่สร้างโครงสร้างด้วยไขมันและไขมันเคิลลิดา	S1-S9
อริป ธีระรุ่งเรือง	การพัฒนาแบบประเมินระดับภูมิภาวะทางดิจิทัลสำหรับสำนักงาน สาธารณสุขจังหวัดและโรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุข	S10-S18
เจษฎากร ทองอินทร	การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการข้อมูลผู้ป่วยที่เข้ายาด้านการแข็งตัว ของเลือดในงานเภสัชกรรมคลินิก	S19-S27
ผลงานพลกฤต วัชรนที	การวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงในการขนส่งย้อนกลับในอุตสาหกรรมอีคอมเมิร์ซแบบ ย้อนกลับ โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับขั้น	S28-S36
นัทธชนก ชัยกิตติพิภัทร์	การพัฒนาต้นแบบการตรวจวิเคราะห์การเคลื่อนไหวของตัวอสุจิด้วยเทคนิค ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์	S37-S48
ปภาอร เขียวสีมา	การประเมินความเสี่ยงด้านความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการวิจัยพื้นฐานทาง ทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา	S49-S58
วชิทธิพ์ แก้วบุตร	การพัฒนาแผนควบคุมสำหรับติดตามการใช้ยารักษาผู้ป่วยโรคลมชักและการ ใช้ยาเฉพาะราย	S59-S68
ศรายุทธ ผลบุญ	การวิเคราะห์ปัจจัยสาเหตุที่ทำให้เกิดการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาณก่อสร้าง กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างภาครัฐแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร	S69-S80
จันทร์จิรา ใจดำ	การพัฒนากรรมวิธีการสกัดและทำให้บริสุทธิ์ของเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือก สับปะรด เหลือทิ้ง	S81-S91
ลักษณะนรา ตั้งสุนันท์ ธรรม	การวิเคราะห์การกลายพันธุ์ที่สัมพันธ์กับการดื้อยา Bedaquiline และ Linezolid และ Lineage ของเชื้อ Mycobacterium tuberculosis ในกลุ่ม pre-XDR-TB ด้วยเทคนิค Whole Genome Sequencing	S92-S102

ชื่อ-นามสกุล	ชื่อบทความ	เลขที่หน้า
สัญญลักษณ์ ปรีชา	การศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนค่าก่อสร้างคอนโดมิเนียมประเภทอาคารสูงในเขตพื้นที่กรุงเทพฯชั้นในกับพื้นที่อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์	S103-S111
เสาวณีย์ พุ่มมาลี	การวิเคราะห์ต้นทุนและการควบคุมเวลาโดยใช้วิธีการวิเคราะห์มูลค่างานที่ได้รับ กรณีศึกษา: โครงการก่อสร้างคอนโดมิเนียม 38 ชั้น อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา	S112-S120
ณัฐกฤตา จิรเจริญสกุล	การหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอ่านยาวทั่วจีโนมในผู้ป่วยโรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติ	S121-S130
ศศิวรรณ สุวรรณสถิตย์	การประเมินประสิทธิภาพชุดตรวจแอนติบอดีชนิด IgM ต่อเชื้อ Leptospira ด้วยวิธีอิมมูโนโครมาโทกราฟี ในผู้ป่วยสงสัยโรคฉี่หนู : การศึกษาในโรงพยาบาลตรัง	S131-S139
ตรีรัตน์ ท้องฟ้า	การศึกษาการใช้สารทดแทนความหวานในผลิตภัณฑ์น้ำปลาหวาน	S140-S149
ธนันพัชร ห้วยหงษ์ทอง	ผลของการใช้อินนูลินเป็นสารทดแทนไขมันต่อคุณภาพของเค้กกล้วยหอม	S150-S157
นิชาภา โปราณานนท์	การจัดการสินค้าคงคลังหลายรายการภายใต้ความไม่แน่นอนของอุปสงค์	S158-S167
รติพันธ์ เรืองหิรัญ	การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสนับสนุนการตรวจเฝ้าระวังสถานประกอบการผลิตและนำเข้าเครื่องมือแพทย์	S168-S178
อรวรรณ ภูมิอะไซ	พลวัตเชิงเวลาของการรับรู้รสหวาน: การเปรียบเทียบซูโครสและซูคราโลสด้วยวิธีTime-Intensity	S179-S188
ยลมนี ขุนพรม	อิทธิพลของความเข้มแสงและระยะเวลาเก็บน้ำต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและการอุดตันของเมมเบรนในระบบ Photo-MBR ที่ใช้ฟล็อกสาหร่าย-แบคทีเรีย	S189-S199
นิชาภา รัตนจันทร์	การพัฒนาหลักเกณฑ์การประกันคุณภาพหลักสูตรการฝึกอบรมของกรมสุขภาพ	S200-S209

ชื่อ-นามสกุล	ชื่อบทความ	เลขที่หน้า
จุฑามาศ สุริวงค์	การพัฒนาระบบแจ้งเตือนอุบัติเหตุกรณีความคลาดเคลื่อนทางยาผ่านแอปพลิเคชันไลน์ : กรณีศึกษางานเภสัชกรรมผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลสมุทรสาคร	S210-S228
สกล ลักษณะนา	แนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรกรณีศึกษา: โรงงานผลิตแกนกระดาษ	S229-S244
ดนุชดา ฤทธิเทพ	ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับจากยาต้านไวรัสโรคแน่วที่หนึ่งในผู้ป่วยโรคปอดที่ไม่ติดเชื้อ HIV	S245-S254
อารีรัตน์ เรืองเวช	การสกัดและวิเคราะห์สารพฤษเคมีเชิงปริมาณในพืชกระท่อมก้านแดงสดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟและการปรับความเป็นกรดช่วยในการสกัด	S255-S264
อลิศรา เยื้องเสื่อ	การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี (UAV) เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบจากการเปลี่ยนแปลง ของสภาพพื้นที่ก่อสร้างโครงการงานป้องกันน้ำท่วมกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย	S265-S274
ปวิพร สมบูรณ์เรศ	ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ของการแจกแจงปัวซอง-ฮัคและการประยุกต์	S275-S287
อิสริยา มานะดี	ประสิทธิผลของการออกกำลังกายแบบเสริมสร้างความยืดหยุ่นและการทรงตัวเพื่อ การป้องกันหัตถิยภูมิในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจ: การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบของการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ และการวิเคราะห์ห่อภิมาณ	S288-S309
ณัฐธิดา ได้เปรียบ	ผลของการทดแทนไขมันด้วยคาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลินต่อคุณภาพของน้กเกิดไก่	S310-S317
ผัสดี มาดุมาดาวิ มูนา ดินียา มานาเก	คุณภาพ ความเหมาะสม และมูลค่าทางเศรษฐกิจของการบริจาดยารักษา มะเร็งในช่วงวิกฤตเศรษฐกิจของศรีลังกา: การศึกษาภาคตัดขวางแบบย้อนหลัง	S318-S326
มณิรรา บุญคำ	การเตรียมและการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุคอมโพสิต Fe3O4/Cu2ZnSnS4-Au เพื่อใช้เป็นโฟโตคะตะลิสต์ภายใต้แสงวิสิเบิล	S327-S335

ชื่อ-นามสกุล	ชื่อบทความ	เลขที่หน้า
อัจฉราวรรณ สอน สนาม	ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ของการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียล	S336-S348
แอ่งห์ เหมียน ไทย เวียง	การวัดคุณภาพชีวิตด้านสุขภาพในผู้ป่วยเด็กโรคไตระยะสุดท้ายที่ได้รับ การรักษาด้วยการฟอกเลือดด้วยเครื่องไตเทียมและการล้างไตทางช่องท้องใน ประเทศเวียดนาม	S349-S358
เทวราช ทิพบุตร	การพัฒนาระบบยืม-คืน ครุภัณฑ์ออนไลน์โดยใช้ AppSheet โครงการจัดตั้ง วิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล	S359-S368
ขวัญใจ กลิ่นจก	การใช้เปลือกกุ้งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการไอโซเมอไรเซชันของน้ำตาลกลูโคส ไดสเป็นน้ำตาลทากาโทส	S369-S377
Suntisuk SInthunakorn	Studies on Mitragynine purification via Complexation with Picric Acid and in vitro Anticancer Activity	S378-S390
ประภาศิริ แก้ววงศ์	ผลของสภาวะน้ำทิ้งวิกฤตต่อลักษณะทางสเปกโทรสโกปีและการเกิดสีน้ำตาล ในโปรตีนไฮโดรไลเสตจากจิ้งหรีด	S391-S397
มุกดา จันทวิสุข	การประเมินความร่วมมือในการใช้ยาของผู้ป่วยโรคเบาหวานชนิดที่ 2 ณ โรงพยาบาล ระดับจังหวัดในสาธารณรัฐประชาธิปไตยประเทศลาว	S398-S407
ธนพงศ์ พิเศษเมธา	ผลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่ใช้ หลังคาแผ่นพอลิเอสเตอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วต่อพฤติกรรมการทำแห้ง ปลานิลแดดเดียว	S408-S416
ชนิสรา สนิธิ	ผลของกระบวนการพรีทรีทเมนต์และการอบแห้งต่อการคงตัวของเชื้อจุลินทรีย์ โพรไบโอติกและคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้ง	S417-S425
กิตติยา ธาระหาญ	การเตรียม การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ และการทดสอบการดูดซับ Au(III) เบื้องต้นของวัสดุคอมโพสิต Fe ₃ O ₄ /Cu ₂ ZnSnS ₄	S426-S434
อินทิรา คุ่มญาติ	อิทธิพลของวิธีการทำแห้งต่อพฤติกรรมการทำแห้งของเหง้าเร่วน้อย	S435-S443

ชื่อ-นามสกุล	ชื่อบทความ	เลขที่หน้า
อินทรา คุ่มญาติ	ผลของวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพทางกายภาพและเคมีของเห็ดำร่วนน้อยผง	S444-S452
ประติพรศรณ ช่างปั้น	ผลของเส้นใยงุ่นมะพร้าวที่ผ่านการแช่ด่างและระยะเวลาการเชื่อมข้าม โครงสร้างต่อสมบัติของอัลจินตไฮโดรเจลคอมโพสิต	S453-S461

การแทนที่ไขมันอิ่มตัวในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตสเปรดด้วยโอเลโอเจลจากน้ำมันรำข้าว ที่สร้างโครงสร้างด้วยไขผึ้งและไขแคนเดิลลิลลา

Replacement of saturated fats in chocolate spread by rice bran oil-based oleogels using
with beeswax and candelilla wax as gelling agents

อภิสร อ้นขวัญเมือง¹, Ngo Tri Huy², Nguyen Trung Hau² และ โสภาค สอนไว^{1*}

Apissara Ontkwanmuang¹, Ngo Tri Huy², Nguyen Trung Hau² and Sopark Sonwai^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพและพฤติกรรมการตกผลึกของ
โอเลโอเจลจากน้ำมันรำข้าวที่ใช้ไขผึ้งและไขแคนเดิลลิลลาในอัตราส่วนที่เท่ากัน (50:50 w/w) เป็นสารก่อเจลใน
ปริมาณ 6%, 9% และ 12% ในน้ำมันรำข้าว ผลการศึกษาพบว่าปริมาณของสารก่อเจลมีอิทธิพลอย่าง
มีนัยสำคัญต่อโครงสร้างและสมบัติของโอเลโอเจล โดยโอเลโอเจลทุกตัวอย่างมีค่า storage modulus (G') สูงกว่า
ค่า loss modulus (G'') แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะเป็นของแข็งมากกว่าของเหลว เมื่อปริมาณสารก่อเจลเพิ่มขึ้น
จาก 6% ไปยัง 9% และ 12% โอเลโอเจลมีโครงข่ายผลึกที่แข็งแรงขึ้นส่งผลให้ค่า G' , G'' และค่าความแข็ง
เพิ่มขึ้น จากนั้นทำการประเมินศักยภาพในการนำโอเลโอเจลสูตรที่มีสารก่อเจล 9% ไปใช้ทดแทนไขมันอิ่มตัวใน
ผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตสเปรด เนื่องจากมีสร้างโครงข่ายเจลที่แข็งแรงเพียงพอและไม่เปรอะ เปรียบเทียบกับ
ช็อกโกแลตสเปรดสูตรควบคุม 2 สูตรที่ใช้ไขมันอิ่มตัวเป็นน้ำมันปาล์มหรือไขมันส่วนแข็งจากน้ำมันรำข้าว พบว่า
ผลิตภัณฑ์สเปรดที่มีโอเลโอเจลเป็นส่วนผสมมีลักษณะเนื้อสัมผัส (ค่าความแข็ง) และคะแนนความชอบในทุก
คุณลักษณะใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมที่ผลิตจากน้ำมันปาล์ม แต่มีปริมาณไขมันอิ่มตัวลดลงมาก
ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโอเลโอเจลจากน้ำมันรำข้าวที่ใช้ไขผึ้งและไขแคนเดิลลิลลาเป็นสารก่อเจลมีศักยภาพ
ในการประยุกต์ใช้เป็นไขมันทางเลือกเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์สเปรดเพื่อสุขภาพต่อไป

คำสำคัญ: โอเลโอเจล, น้ำมันรำข้าว, ไขผึ้ง, ไขแคนเดิลลิลลา, ช็อกโกแลตสเปรด

Abstract

This study aimed to investigate the physicochemical properties and crystallization behavior
of rice bran oil-based oleogels structured with beeswax and candelilla wax at an equal ratio (50:50,
w/w) as gelling agents at concentrations of 6%, 9%, and 12% (w/w) in rice bran oil. The results

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย
Department of Food technology, Faculty of Engineering, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

² Faculty of Chemical Engineering and Food Technology, Nong Lam University Ho Chi Minh City, Linh Trung Ward,
Thu Duc City, Ho Chi Minh City, Vietnam



demonstrated that the concentration of gelling agents significantly influenced the structure and properties of the oleogels. All oleogel samples exhibited storage modulus (G') values higher than loss modulus (G''), indicating predominantly solid-like behavior. As the gelling agent concentration increased from 6% to 9% and 12%, the oleogels developed a stronger crystalline network, leading to increases in G' , G'' , and hardness values. Subsequently, the oleogel formulation containing 9% gelling agents was evaluated for its potential to replace saturated fat in chocolate spread products, as it provided a sufficiently robust but non-brittle gel network. Its performance was compared with two control chocolate spread formulations containing saturated fats in the form of palm oil or the stearin fraction of rice bran oil. The chocolate spread formulated with oleogel exhibited textural properties (hardness) and sensory preference scores across all attributes comparable to those of the palm oil-based control, while achieving a substantial reduction in saturated fat content. These findings indicate that rice bran oil-based oleogels structured with beeswax and candelilla wax have strong potential for application as alternative fats in the development of healthier spreadable food products.

Keywords: Oleogel, rice bran oil, beeswax, candelilla wax, chocolate spread

บทนำ

ผลิตภัณฑ์สเปรด (spread) เป็นผลิตภัณฑ์อาหารสำหรับใช้ทาและบริโภคพร้อมกับขนมปัง แครกเกอร์ หรือทำไส้เบเกอรี่ ที่สะดวกในการพกพาและบริโภค ทำให้เป็นที่นิยมทั้งในเด็กและผู้ใหญ่ ผลิตภัณฑ์สเปรดส่วนใหญ่มีปริมาณไขมันอิ่มตัวประมาณ 30% (Pawitchaya และคณะ, 2020) ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) ที่มีอนุภาคน้ำตาลและของแข็งอื่นๆ กระจายตัวอยู่ ไขมันเป็นส่วนประกอบสำคัญที่มีผลต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ในปัจจุบันประชากรโลกส่วนหนึ่งมีปัญหาเรื่องโรคไม่ติดต่อ เช่น โรคอ้วน โรคหัวใจ โรคเบาหวาน และโรคความดันโลหิตสูง โรคเหล่านี้มีสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากการรับประทานอาหารที่มีไขมันอิ่มตัวเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก เช่น ผลิตภัณฑ์สเปรด เนยเทียม ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ เป็นต้น ซึ่งไขมันอิ่มตัวนี้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ จึงทำให้ผู้บริโภคหันมาให้ความสนใจผลิตภัณฑ์ทางเลือกที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการศึกษาความเป็นไปได้ของการแทนที่ไขมันอิ่มตัวในผลิตภัณฑ์สเปรดด้วยไขมันไม่อิ่มตัว โดยในที่นี้จะใช้น้ำมันรำข้าว ซึ่งเป็นน้ำมันที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงถึง 75% (Ghosh, 2007) น้ำมันรำข้าวประกอบด้วยวิตามินอี (vitamin E) และ โอรีซานอล (oryzanol) ในปริมาณสูง จึงส่งผลดีต่อสุขภาพโดยการช่วยเพิ่มคอเลสเตอรอลที่ดีและลดคอเลสเตอรอลที่ไม่ดี ช่วยป้องกันการเกิดโรคต่างๆ สร้างความแข็งแรงให้ระบบภูมิคุ้มกัน และต้านอนุมูลอิสระ (Mishra, 2013) อย่างไรก็ตาม น้ำมันรำข้าวมีจุดหลอมเหลวต่ำและเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง การจะนำน้ำมันรำข้าวไปแทนที่ไขมันอิ่มตัวในอาหารโดยตรงจะผลเสียต่อสมบัติของอาหาร เช่น เกิดการสูญเสียโครงสร้าง เกิดการแยกชั้น หรือมีค่าความแข็งลดลง เป็นต้น จึงจำเป็นต้องนำน้ำมันรำข้าวมาเพิ่มโครงสร้างให้มีลักษณะคล้ายไขมันแข็งในรูปของ

โอลีโอเจล (oleogel) ที่มีโครงสร้างเป็นโครงข่าย (network) แบบต่อเนื่องของสารก่อเจลก่อน โครงข่ายดังกล่าวจะดักหรือจับน้ำมันเหลวไว้ในโครงข่าย ทำให้น้ำมันเหลวกลายเป็นเจลที่มีคุณสมบัติคล้ายไขมันแข็ง ซึ่งปัจจุบันโอลีโอเจลได้รับความสนใจอย่างมาก โดยได้มีงานวิจัยหลายงานที่ได้แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้โอลีโอเจลในผลิตภัณฑ์อาหารที่หลากหลาย เช่น การใช้ทดแทนไขมันแข็งและลดปริมาณไขมันอิ่มตัวในไอศกรีมและผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ (Wijarnprecha และคณะ, 2018) เป็นต้น ฉะนั้นงานวิจัยนี้จะเริ่มจากการศึกษาสมบัติของโอลีโอเจลจากน้ำมันรำข้าวที่มีปริมาณสารก่อเจลที่แตกต่างกัน โดยจะใช้ไขผึ้ง (beeswax) และไขแคนเดิลลิลลา (candelilla wax) เป็นสารก่อเจลร่วมกัน หลังจากนั้นจะเลือกโอลีโอเจลสูตรที่มีสมบัติเคมีกายภาพที่ดีไปแทนที่ไขมันอิ่มตัวในการผลิตผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตสเปรด และศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์สเปรดที่ได้เปรียบเทียบกับสเปรดสูตรควบคุมที่มีไขมันอิ่มตัวคือน้ำมันปาล์ม (palm oil) หรือไขมันส่วนแข็งจากน้ำมันรำข้าว (rice bran oil stearin) เป็นส่วนประกอบ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ และพฤติกรรมการตกผลึกของโอลีโอเจลที่ใช้ไขผึ้งร่วมกับไขแคนเดิลลิลลา เป็นสารก่อเจลในปริมาณที่แตกต่างกัน
2. เพื่อศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตสเปรดที่ผลิตจากโอลีโอเจล เปรียบเทียบกับสเปรดที่ผลิตจากไขมันอิ่มตัว

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่างโอลีโอเจล: ชั่งน้ำหนักไขผึ้งและไขแคนเดิลลิลลาในอัตราส่วนเท่ากันคือ 50:50 (w/w) ที่ระดับความเข้มข้นของไขที่ 6%, 9% และ 12% ในน้ำมันรำข้าว แล้วผสมไขกับน้ำมันควบคู่กับการให้ความร้อนในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที พร้อมทั้งกวนอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เกิดความเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องและพักทิ้งไว้ข้ามคืนก่อนนำไปวิเคราะห์
2. ทำการศึกษสมบัติต่างๆ ของโอลีโอเจลดังนี้: 1) โครงสร้างจุลภาคศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (polarized light microscopy; PLM) (Carl Zeiss Primo Star, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Germany) ร่วมกับกล้องดิจิทัล (Canon EOS 700D, Canon Inc., Taipei, Taiwan), 2) ลักษณะเนื้อสัมผัสใช้เครื่อง Texture Analyzer; TA-XT2i, Stable Micro Systems Ltd., Godalming, UK ใช้หัวโพรบ P-25 เพื่อบันทึกค่าความแข็ง (Hardness) และ 3) สมบัติรีโอโลยี (Rheological analysis) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ Physica รุ่น MCR 300 (Anton Paar, Graz, Austria) โดยทำการวัด strain sweep test ที่ค่า strain จาก 0.01% ถึง 100% ด้วยค่าความถี่ 1 Hz
3. เตรียมตัวอย่างช็อกโกแลตสเปรด ซึ่งประกอบด้วยไขมัน 25 กรัม (น้ำมันปาล์มหรือไขมันส่วนแข็งจากน้ำมันรำข้าว หรือโอลีโอเจลที่คัดเลือก) ไชรีป 36.5 กรัม ผงโกโก้ 19.5 กรัม นมขาดมันเนย 14 กรัม และผงนมขาดมันเนย 5 กรัม โดยโอลีโอเจลนั้นผสมด้วยเครื่องปั่นผสมเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติมไชรีป นมขาดมันเนย และผงนมขาดมันเนยโดยให้ความร้อนที่ 70 °C ก่อนเติมผงโกโก้และกวนด้วยเครื่องผสม

แบบ mechanical stirrer ที่ความเร็ว 1100 rpm เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นแช่ตัวอย่างในอ่างน้ำแข็ง 15 นาที และเก็บรักษาที่ 4 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และปรับอุณหภูมิที่ 25 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนการวิเคราะห์

4. ทำการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัส (ค่าความแข็ง) ของผลิตภัณฑ์ซ็อกโกแลตสเปรดด้วยเครื่อง Texture Analyzer และทำการทดสอบทางประสาทสัมผัส (Sensory analysis) ของผลิตภัณฑ์ซ็อกโกแลตสเปรด โดยผู้ทดสอบกึ่งผ่านการฝึกฝนจำนวน 15 คน มีการประเมินคุณลักษณะ ได้แก่ สี กลิ่น รสชาติ ความรู้สึกในปาก ความสามารถในการปาด และความชอบโดยรวม ซึ่งใช้แบบทดสอบความชอบ 9-point hedonic scale ดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร (Shahamati และคณะ, 2024)

ผลและวิจารณ์

1. โครงสร้างจุลภาคของโอลีโอเจล

จากภาพที่ 1 ซึ่งแสดงโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างโอลีโอเจล พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมไขมันและไขมันแคนเดลิลาในอัตราส่วนเท่ากัน จาก 6% ไปเป็น 12% ในน้ำมันรำข้าว โครงสร้างของโอลีโอเจลมีความหนาแน่นและต่อเนื่องมากขึ้น โดยผลึกไขมันมีการกระจายตัวและเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายสามมิติที่แน่นขึ้น ซึ่งน่าจะส่งผลให้สามารถกักเก็บน้ำมันรำข้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Wijarnprecha และคณะ, 2018) การใช้ไขมันมีบทบาทสำคัญในการสร้างผลึกขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอในระบบ เนื่องจากไขมันประกอบด้วยการจัดเรียงตัวของไขมันสายยาวและเอสเทอร์ซึ่งสามารถตกผลึกได้ดีในเฟสน้ำมัน ส่งผลให้เกิดโครงข่ายผลึกที่ช่วยเพิ่มความหนืดและความสามารถในการกักเก็บน้ำมันของโอลีโอเจล ขณะเดียวกัน ไขมันแคนเดลิลา ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าและให้ผลึกที่มีความแข็งและเป็นระเบียบมากกว่า มีส่วนช่วยเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างโอลีโอเจล โดยทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเครือข่ายเจล การเสริมกันของไขมันทั้งสองชนิดช่วยเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างเจล (Scharfe และคณะ, 2022)

2. สมบัติทางรีโอโลยีของโอลีโอเจล

จากภาพที่ 2 ผลของสมบัติทางรีโอโลยีของโอลีโอเจล พบว่าในช่วง %strain ต่ำกว่า 1% ทุกๆ ตัวอย่างโอลีโอเจลที่มีปริมาณไขมันแตกต่างกันมีค่า storage modulus (G') สูงกว่า loss modulus (G'') ซึ่งแสดงถึงการเกิดโครงข่ายไขมันที่สามารถยืดหยุ่นได้ดีส่งผลให้โอลีโอเจลทั้ง 3 ตัวอย่างมีลักษณะเป็นของแข็งมากกว่าของเหลว การเพิ่มความเข้มข้นของปริมาณไขมันจาก 6% ไปเป็น 12% ส่งผลให้ค่า G' เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีความเชื่อมโยงกับโครงสร้างผลึกไขมันที่แข็งแรงมากขึ้น เมื่อดูที่ค่า strain ที่ค่า G' และ G'' เกิดการตัดกัน (cross over) ซึ่งใช้เป็นจุดที่แสดงถึงการที่โครงสร้างของตัวอย่างเริ่มถูกทำลาย ทำให้เริ่มมีลักษณะเป็นของเหลวมากกว่าของแข็ง พบว่าโอลีโอเจลที่มีปริมาณไขมัน 12% เกิดการตัดกันที่ strain ต่ำที่สุด (2.17% strain) และเพิ่มขึ้นสำหรับโอลีโอเจลที่มีปริมาณไขมัน 9% (4.65% strain) และ 6% (14.60% strain) แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณไขมันสูงเท่านั้น แม้จะทำให้ได้โอลีโอเจลที่มีลักษณะเป็นของแข็งมากกว่าแต่เจลที่ได้กลับโครงข่ายผลึกที่เปราะมากขึ้น (Ashok R.P. และคณะ, 2014)

3. สมบัติด้านความแข็งแรงของโอลิโอเจล

จากภาพที่ 3 ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส พบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณไขมันโอลิโอเจลเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าโอลิโอเจลที่มีปริมาณไขมันสูงสามารถทำหน้าที่คล้ายคลึงกับสมบัติของไขมันอิ่มตัวได้ดียิ่งขึ้น โดยโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้นมาจากสารก่อเจลทั้งสองชนิดที่มีสมบัติในการกักเก็บน้ำมันและโครงสร้างเครือข่ายผลึกที่หนาแน่น (Kumar, 2025) ซึ่งสอดคล้องกับผลของโครงสร้างจุลภาคที่เมื่อปริมาณไขมันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างหนาแน่นขึ้น

จากผลการศึกษาทั้งหมดที่ผ่านมา ทางผู้วิจัยได้เลือกโอลิโอเจลที่มีปริมาณไขมัน 9% ไปใช้ในการผลิตซ็อกโกแลตสเปรด เนื่องจากให้สมบัติทางรีโอโลยีและความแข็งแรงในระดับกลางและไม่เปราะ

4. สมบัติด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ซ็อกโกแลตสเปรด

ภาพที่ 4 แสดงค่าความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ซ็อกโกแลตสเปรด จากการเลือกโอลิโอเจลที่ความเข้มข้นไขมัน 9% เพื่อมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ผลิตจากไขมันอิ่มตัวที่ได้จากพืช ได้แก่ น้ำมันปาล์มและไขมันส่วนแข็งจากน้ำมันรำข้าว พบว่าตัวอย่างซ็อกโกแลตสเปรดที่ทดแทนด้วยโอลิโอเจลมีค่าความแข็งใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมที่ผลิตจากน้ำมันปาล์ม ซึ่งโอลิโอเจลทำหน้าที่กักเก็บน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้มีสมบัติใกล้เคียงกับโครงสร้างของน้ำมันปาล์ม (Fayaz และคณะ, 2017) ซึ่งตัวอย่างควบคุมที่ผลิตจากไขมันส่วนแข็งจากน้ำมันรำข้าวมีค่าความแข็งสูงสุด เนื่องจากไขมันส่วนแข็งจากน้ำมันรำข้าวมีปริมาณไขมันอิ่มตัวสูงและมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าเมื่อเทียบกับ น้ำมันปาล์ม และโอลิโอเจล ส่งผลให้เกิดการตกผลึกที่หนาแน่นและแข็งแรงกว่า (Prichapan et al., 2017)

5. สมบัติทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ซ็อกโกแลตสเปรด

จากภาพที่ 5 จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ซ็อกโกแลตสเปรดพบว่าตัวอย่างที่ทดแทนไขมันอิ่มตัวด้วยโอลิโอเจลมีคะแนนความชอบในทุกคุณลักษณะใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมที่ผลิตจากน้ำมันปาล์ม และไม่แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าโอลิโอเจลที่ใช้ทดแทนไขมันอิ่มตัวสามารถคงคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ซ็อกโกแลตสเปรดไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

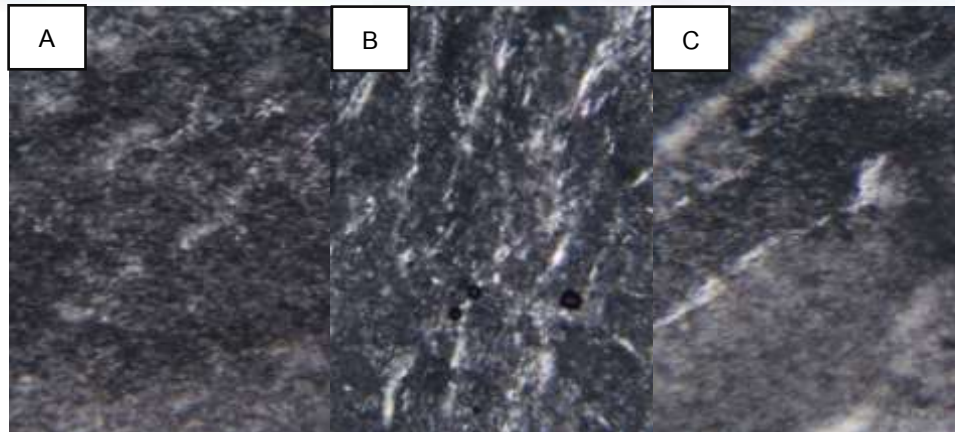
สรุป

การศึกษานี้มุ่งเน้นเพื่อพัฒนาโอลิโอเจลจากน้ำมันรำข้าวโดยใช้ไขมันและไขมันเดลิลลา เพื่อประเมินศักยภาพในการใช้ทดแทนไขมันอิ่มตัวในผลิตภัณฑ์ซ็อกโกแลตสเปรด ผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณไขมันเพิ่มขึ้น โครงสร้างจุลภาคของโอลิโอเจลมีความหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางรีโอโลยีและเนื้อสัมผัสที่ได้มีความใกล้เคียงกับไขมันอิ่มตัว เมื่อเลือกโอลิโอเจลที่มีปริมาณไขมัน 9% เพื่อนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ซ็อกโกแลตสเปรดพบว่าให้ค่าความแข็งและสมบัติทางประสาทสัมผัสใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมจากน้ำมันปาล์ม โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการยอมรับของผู้บริโภค แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของโอลิโอเจลในการใช้ทดแทนไขมันอิ่มตัวในผลิตภัณฑ์ซ็อกโกแลตสเปรดเพื่อสุขภาพ



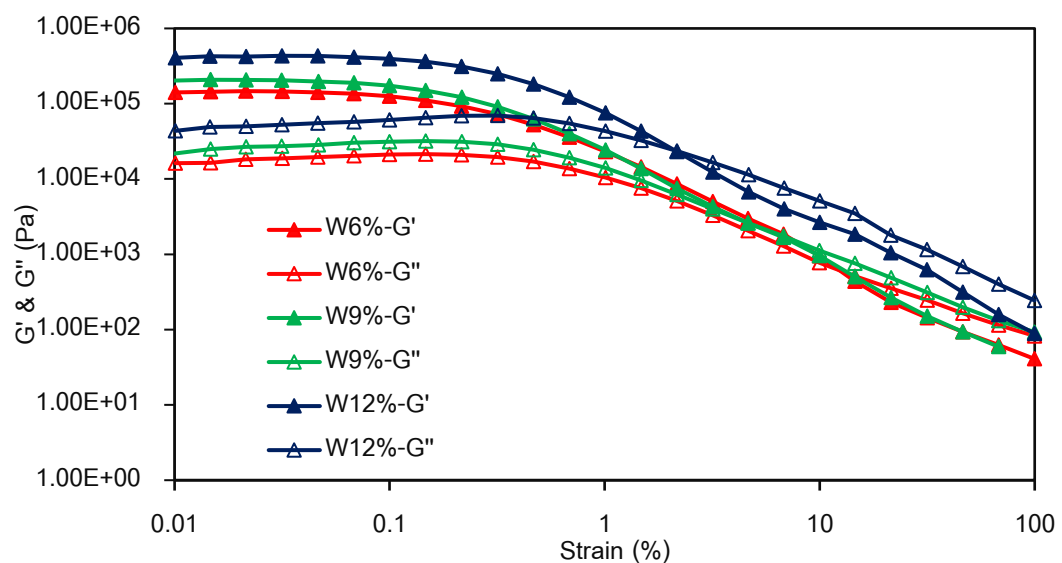
เอกสารอ้างอิง

- Ashok R.P., Pravin S.R., Agnieszka, G., Ozge, T., Ans, L., Winnok H.D., Wallea, D., & and Koen, D. (2014). Edible applications of shellac oleogels: spreads, chocolate paste and cakes†. Food & Function, 5, 61. <https://doi.org/DOI: 10.1039/c4fo00034j>
- Fayaz, G., Goli, S. A. H., Kadivar, M., Valoppi, F., Barba, L., Calligaris, S., & & Nicoli, M. C. (2017). Potential application of pomegranate seed oil oleogels based on monoglycerides, beeswax and propolis wax as partial substitutes of palm oil in functional chocolate spread. LWT - Food Science and Technology, 86, 523-529. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.036>.
- Ghosh, M. (2007). Review on Recent Trends in Rice Bran Oil Processing. J Amer Oil Chem Soc, 84, 315-324. <https://doi.org/DOI 10.1007/s11746-007-1047-3>
- Kumar, A., Kumar, N. & Sharma, H.K. . (2025). Development and characterization of groundnut oil-based oleogels for replacing saturated fats in cookies formulations. Discov Food 5(30). [https://doi.org/ https://doi.org/10.1007/s44187-025-00301-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s44187-025-00301-0)
- Pawitchaya, P. (2020). Study of Physicochemical Properties and Crystallization Behavior of Rice Bran Oil and Rice Bran Stearin Mixtures for Using in Spread
- Prichapan, N., Julian D. M., & Klinkesorn, U. (2017). Influence of rice bran stearin on stability, properties and encapsulation efficiency of polyglycerol polyricinoleate (PGPR)-stabilized water-in-rice bran oil emulsions. Food Research International, 93, 26-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.01.007>
- Scharfe, M., Niksch, J., & E., a. F. (2022). Influence of Minor Oil Components on Sunflower, Rice Bran, Candelilla, and Beeswax Oleogels. Journal of Lipid Science and Technology, 124(100068). <https://doi.org/DOI: 10.1002/ejlt.202100068>
- Shahamati, M., Ahmadi, P., Tabibiazar, M., Fazeliioskouei, T., Azadmard-Damirchi, S., & & Zargaraan, A. (2024). Characterization of acorn oil and its application on carnauba wax-based oleogel and chocolate spread. International Journal of Biological Macromolecules, 260(129571).
- Wijarnprecha, K., Aryusuk, K., Santiwattana, P., Sonwai, S., & and Rousseau, D. (2018). Structure and rheology of oleogels made from rice bran wax and rice bran oil. Food Research International, 112, 199-208. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.005>.



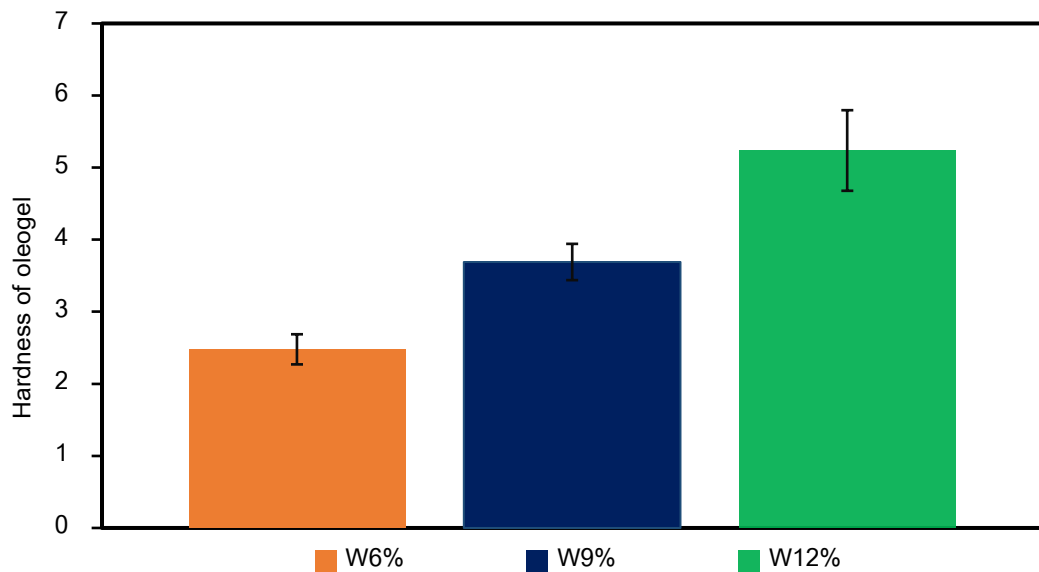
ภาพที่ 1 โครงสร้างทางจุลภาคของโอสีโอเจล

หมายเหตุ: ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคบันทึกที่กำลังขยาย 10 เท่า (A) W6%; (B) W9%; และ (C) W12%
ตัวย่อ: W หมายถึง Wax



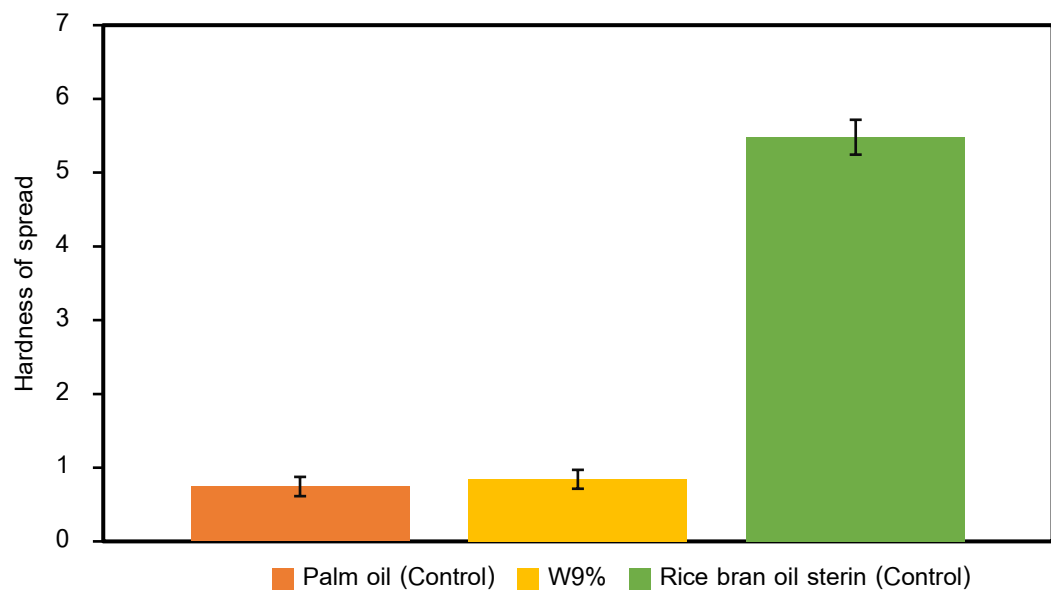
ภาพที่ 2 สมบัติทางรีโอโลยีของตัวอย่างโอสีโอเจล

ตัวย่อ: W หมายถึง Wax



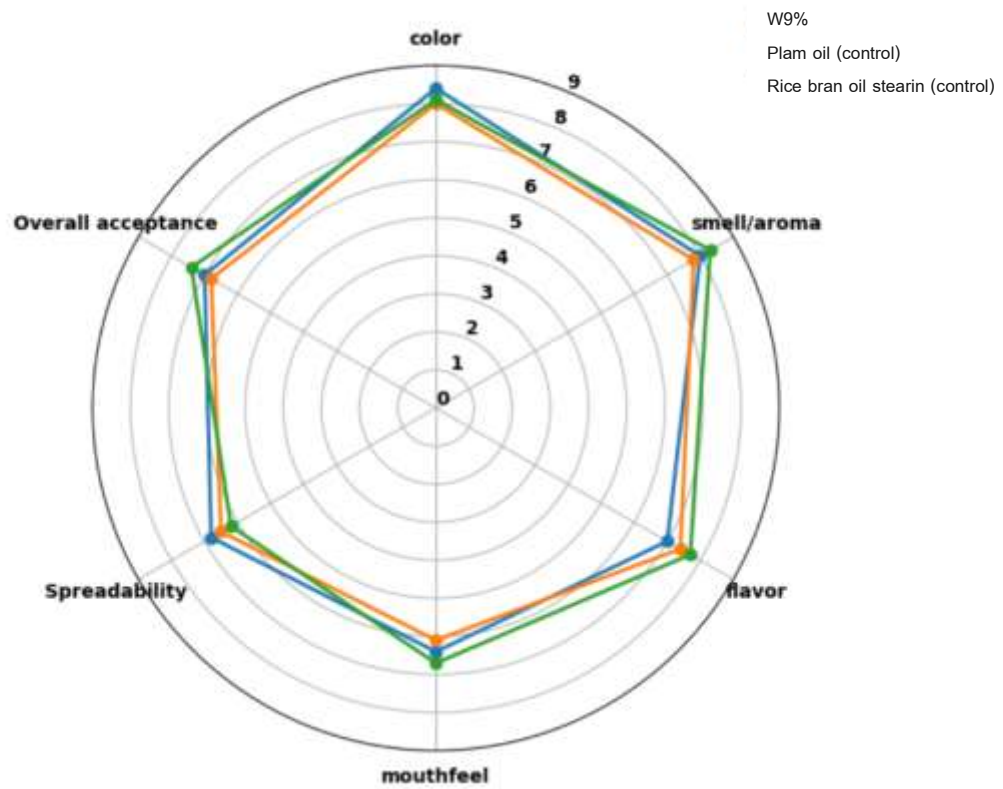
ภาพที่ 3 ค่าความแข็งของตัวอย่างโอเลโอเจล

ตัวย่อ: W หมายถึง Wax



ภาพที่ 4 สมบัติด้านความแข็งของผลิตภัณฑ์ซีอิ๊วโกแลตสเปรด

ตัวย่อ: W หมายถึง Wax



ภาพที่ 5 สมบัติทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ชีสอกโกแลตสเปรด
ตัวย่อ: W หมายถึง Wax

การพัฒนาแบบประเมินระดับวุฒิภาวะทางดิจิทัลสำหรับสำนักงานสาธารณสุขจังหวัด และโรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุข

Development of a digital maturity assessment tool for provincial health offices and hospitals under the Ministry of Public Health

อธิป ทิระรุ่งเรือง¹

Atip Tirarungruang¹

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบประเมินระดับวุฒิภาวะทางดิจิทัลสำหรับหน่วยงานสาธารณสุขภาครัฐ เพื่อให้มีเครื่องมือที่เหมาะสมกับบริบทการดำเนินงานด้านสุขภาพของประเทศไทย กระบวนการพัฒนาเครื่องมือเริ่มจากการทบทวนเอกสารและกรอบแนวคิดการประเมินวุฒิภาวะทางดิจิทัลทั้งในและต่างประเทศ จากนั้นสังเคราะห์เป็นโครงสร้างแบบประเมินครอบคลุม 8 ด้าน รวม 69 ข้อคำถาม ใช้มาตราประมาณค่าแบบลิเคิร์ต 5 ระดับแล้วนำไปตรวจสอบ ความตรงเชิงเนื้อหาโดย ผู้เชี่ยวชาญ พร้อมคำนวณดัชนีความสอดคล้องของข้อคำถาม กับวัตถุประสงค์ (IOC) และปรับปรุงตามข้อเสนอแนะ ก่อนนำไปทดสอบความเชื่อมั่นของแบบประเมิน

ผลการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาพบว่าข้อคำถามทุกข้อมีค่า IOC ผ่านเกณฑ์ (≥ 0.50) สะท้อนความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การประเมินในแต่ละด้านและผลการทดสอบความเชื่อมั่นของแบบประเมินทั้งฉบับ มีค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาคเท่ากับ 0.939 โดยรายด้านอยู่ในช่วง 0.921–0.950 แสดงถึงความเชื่อมั่น อยู่ในระดับสูง แบบประเมินที่พัฒนาขึ้นจึงมีคุณภาพด้านความตรงและความเชื่อมั่นเหมาะสมสำหรับใช้ประเมิน ระดับวุฒิภาวะทางดิจิทัลของหน่วยงานสาธารณสุข และสามารถประยุกต์ใช้เพื่อกำหนดแนวทาง พัฒนาและ ติดตามความก้าวหน้าด้านดิจิทัลขององค์กรได้อย่างเป็นระบบ

คำสำคัญ : วุฒิภาวะทางดิจิทัล, สำนักงานสาธารณสุขจังหวัด, โรงพยาบาล, กระทรวงสาธารณสุข

¹กลุ่มงานเภสัชกรรม โรงพยาบาลสุราษฎร์ธานี สุราษฎร์ธานี 84000 ประเทศไทย

¹Department of Pharmacy, Suratthani Hospital, Suratthani 84000, Thailand.



Abstract

This study aimed to develop a digital maturity assessment instrument for agencies under Thailand's Ministry of Public Health, specifically Provincial Public Health Offices and public hospitals, to ensure contextual relevance to national health service operations. The instrument development process began with a review of literature and existing digital maturity assessment frameworks in both domestic and international contexts. The evidence was then synthesized into an assessment framework comprising eight domains and 69 items, measured on a five-point Likert scale. Content validity was evaluated by an expert panel using the Item–Objective Congruence (IOC) index, and the instrument was revised according to expert feedback prior to reliability testing.

Results indicated that all items met the content validity criterion ($\text{IOC} \geq 0.50$), demonstrating adequate alignment with the intended assessment objectives across domains. Reliability analysis showed high internal consistency for the overall instrument (Cronbach's $\alpha = 0.939$), with domain-level alpha coefficients ranging from 0.921 to 0.950. These findings suggest that the developed instrument has strong content validity and reliability, supporting its use for assessing digital maturity in public health organizations. The instrument can also be applied to guide strategic digital development and to monitor organizational progress in a systematic manner.

Keyword : Digital Maturity, Provincial Public Health Office, Hospital, Ministry of Public Health

บทนำ

การเปลี่ยนแปลงทางดิจิทัล (Digital Transformation) ในระบบสาธารณสุขได้กลายเป็นวาระสำคัญระดับโลก องค์การอนามัยโลก (WHO) และองค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (OECD) ได้ให้ความสำคัญกับการนำเทคโนโลยีดิจิทัลและปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) มาประยุกต์ใช้ในระบบสุขภาพ เพื่อยกระดับคุณภาพการบริการ เพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการ และพัฒนาระบบการเฝ้าระวังโรคให้ทันสมัย การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวครอบคลุมตั้งแต่การนำระบบบันทึกสุขภาพอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Health Records: EHR) มาใช้ในหน่วยบริการ ไปจนถึงการพัฒนาระบบวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data Analytics) และการนำ AI มาสนับสนุนการวินิจฉัยโรคและการตัดสินใจทางคลินิก ทั้งนี้ การที่องค์กรสาธารณสุขจะสามารถรับมือกับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีความพร้อมและวุฒิภาวะทางดิจิทัล (Digital Maturity) ในระดับที่เหมาะสม (สำนักงานพัฒนารัฐบาลดิจิทัล (องค์การมหาชน), 2022)



สำหรับประเทศไทย ภาครัฐได้ให้ความสำคัญกับการพัฒนาดิจิทัลอย่างต่อเนื่อง โดยมีการดำเนินการสำคัญหลายประการ ได้แก่ การจัดตั้งคณะกรรมการสำนักงานพัฒนารัฐบาลดิจิทัล การประกาศใช้พระราชบัญญัติการบริหารงานและการให้บริการภาครัฐผ่านระบบดิจิทัล พ.ศ. 2562 และการจัดทำแผนพัฒนารัฐบาลดิจิทัลของประเทศไทย พ.ศ. 2566–2570 ซึ่งกำหนดทิศทางการพัฒนาดิจิทัลภาครัฐในภาพรวม ในส่วนของกระทรวงสาธารณสุข ได้มีการผลักดันนโยบายสุขภาพดิจิทัล โดยมุ่งเน้นการเชื่อมโยงข้อมูลด้านสุขภาพระหว่างหน่วยงาน เพื่อให้เกิดระบบข้อมูลสุขภาพที่บูรณาการและเข้าถึงได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ กระทรวงสาธารณสุขยังมีเป้าหมายในการพัฒนาสู่ "องค์กรดิจิทัล" เพื่อยกระดับการให้บริการสาธารณสุข ของประเทศให้ทันสมัยและตอบสนองต่อความต้องการของประชาชนได้อย่างครอบคลุม (สำนักงานเลขาธิการวุฒิสภา, 2019)

แม้ว่าจะมีนโยบายและแผนพัฒนาดิจิทัลที่ชัดเจน แต่หน่วยงานสาธารณสุขภาครัฐในแต่ละระดับ ไม่ว่าจะเป็นสำนักงานสาธารณสุขจังหวัด โรงพยาบาลศูนย์ โรงพยาบาลทั่วไป หรือโรงพยาบาลชุมชน ต่างมีบริบท ทรัพยากร และความพร้อมทางดิจิทัลที่แตกต่างกัน (กระทรวงสาธารณสุข, 2021) การประเมินระดับวุฒิภาวะทางดิจิทัล (Digital Maturity Assessment) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้ผู้บริหารและผู้กำหนดนโยบายสามารถเข้าใจสถานะปัจจุบันขององค์กรในมิติต่างๆ ระบุจุดแข็งและช่องว่างในการพัฒนา ตลอดจนวางแผนการลงทุนด้านดิจิทัลได้อย่างมีทิศทางและสอดคล้องกับบริบทของหน่วยงาน

ในปัจจุบันมีแบบประเมิน Digital Maturity หลายรูปแบบที่ได้รับการพัฒนาขึ้นในระดับสากล เช่น HIMSS Digital Maturity Model, Digital Health Maturity Model รวมถึงกรอบแนวคิดจาก Deloitte, Westerman และคณะ อย่างไรก็ตาม แบบประเมินส่วนใหญ่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้กับบริบทขององค์กรในประเทศที่พัฒนาแล้ว (Rossmann, 2019) หรือมุ่งเน้นการประเมินเฉพาะด้านใดด้านหนึ่ง เช่น ด้านเทคโนโลยีหรือด้านคลินิก โดยไม่ครอบคลุมมิติที่สำคัญในภาพรวม เช่น ด้านภาวะผู้นำ วัฒนธรรมองค์กร ธรรมาภิบาล และนวัตกรรม ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงกับบริบทของหน่วยงานสาธารณสุขภาครัฐของไทย ซึ่งมีโครงสร้างการบริหารและกระบวนการทำงานที่มีลักษณะเฉพาะแตกต่างออกไป

ด้วยเหตุผลดังกล่าว การพัฒนาแบบประเมินระดับวุฒิภาวะทางดิจิทัลที่เหมาะสมกับบริบทของหน่วยงานสาธารณสุขภาครัฐไทยจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง การศึกษาครั้งนี้จึงได้พัฒนาแบบประเมินที่มีลักษณะเป็น Generic Tool ซึ่งสามารถใช้ได้กับหน่วยงานสาธารณสุขภาครัฐในหลากหลายระดับ โดยบูรณาการกรอบแนวคิดและงานวิจัยระดับสากลจากหลายแหล่ง ประกอบด้วย 8 ด้านหลัก ได้แก่ (1) ด้านยุทธศาสตร์และนโยบายดิจิทัล (2) ด้านการนำการเปลี่ยนแปลงสู่องค์กรดิจิทัล (3) ด้านการจัดการประสบการณ์ดิจิทัลของผู้รับบริการ (4) ด้านกระบวนการทำงานและการให้บริการดิจิทัล (5) ด้านทักษะดิจิทัลของบุคลากร (6) ด้านความเข้มแข็งของวัฒนธรรมองค์กรดิจิทัล (7) ด้านโครงสร้างและระบบงานดิจิทัล และ (8) ด้านเทคโนโลยีดิจิทัลและระบบสารสนเทศ ซึ่งการประเมินทั้ง 8 ด้านนี้จะช่วยให้ผู้บริหารสามารถมองเห็นภาพรวมของวุฒิภาวะทางดิจิทัลขององค์กรได้อย่างครบถ้วนและรอบด้าน



การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและตรวจสอบคุณภาพของแบบประเมินระดับวุฒิภาวะทางดิจิทัลสำหรับสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดและโรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุข โดยแบบประเมินที่พัฒนาขึ้นได้ผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) โดยผู้ทรงคุณวุฒิ และการตรวจสอบความเที่ยง (Reliability) โดยนำไปทดสอบกับโรงพยาบาลนอกสังกัดกระทรวงสาธารณสุข เพื่อให้ได้เครื่องมือที่มีคุณภาพและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในการประเมินและพัฒนาศักยภาพด้านดิจิทัลของหน่วยงานสาธารณสุขภาครัฐต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาแบบประเมินระดับวุฒิภาวะทางดิจิทัลสำหรับสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดและโรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุข

อุปกรณ์และวิธีการ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงพัฒนา (Development Research) มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและตรวจสอบคุณภาพของแบบประเมินระดับวุฒิภาวะทางดิจิทัลสำหรับสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดและโรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุข โดยดำเนินการเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การทบทวนวรรณกรรมและสังเคราะห์กรอบแนวคิด (2) การสร้างแบบประเมินฉบับร่าง และ (3) การตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือทั้งในด้านความตรงเชิงเนื้อหาและความเชื่อมั่น

(1).การทบทวนวรรณกรรมและสังเคราะห์กรอบแนวคิด

ผู้วิจัยดำเนินการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Literature Review) จากฐานข้อมูลวิชาการระดับสากล ได้แก่ PubMed, Scopus และ Google Scholar โดยมุ่งเน้นการศึกษารอบแนวคิดและแบบจำลองวุฒิภาวะทางดิจิทัล (Digital Maturity Model) ที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล อาทิ HIMSS Digital Maturity Model, Digital Health Maturity Model และกรอบแนวคิดจากงานวิจัยของ Westerman และคณะ Carvalho และคณะ รวมถึง Flott และคณะ จากนั้นจึงสกัดองค์ประกอบสำคัญของวุฒิภาวะทางดิจิทัลจาก framework ต่างๆ นำมาบูรณาการและจัดกลุ่มให้เป็นโครงสร้างเดียว พร้อมปรับให้สอดคล้องกับบริบทของระบบสาธารณสุขไทย จนได้แบบประเมินที่ครอบคลุม 8 มิติหลัก ได้แก่ (1) ด้านยุทธศาสตร์และภาวะผู้นำ (Strategy/Leadership) (2) ด้านกระบวนการและการดำเนินงาน (Process/Operation) (3) ด้านประสบการณ์ผู้รับบริการ (Patient Experience) (4) ด้านวัฒนธรรมองค์กร (Culture) (5) ด้านธรรมาภิบาลและโครงสร้าง (Governance/Structure) (6) ด้านนวัตกรรมและเทคโนโลยีขั้นสูง (Innovation/Advanced Technology) (7) ด้านข้อมูลและการวิเคราะห์ (Data/Analytics) และ (8) ด้านโครงสร้างพื้นฐานด้านเทคโนโลยี (Technology Infrastructure)



(2).การสร้างแบบประเมินฉบับร่าง

จากกรอบแนวคิดที่ได้รับการสังเคราะห์ ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบประเมินฉบับร่างที่ประกอบด้วยข้อคำถามทั้งสิ้น 69 ข้อ ครอบคลุมทั้ง 8 มิติ โดยใช้มาตรวัดแบบ Likert scale 5 ระดับ ตั้งแต่ระดับ 1 (น้อยที่สุด/ไม่มีการดำเนินการ) ถึงระดับ 5 (มากที่สุด/ดำเนินการอย่างเต็มรูปแบบ) การแปลผลคะแนนเฉลี่ยใช้เกณฑ์ของ Best (1977) โดยแบ่งช่วงคะแนนออกเป็น 5 ระดับ ด้วยช่วงกว้าง 0.80 ดังนี้ คะแนนเฉลี่ย 1.00–1.80 หมายถึงระดับเริ่มต้น คะแนน 1.81–2.60 หมายถึงระดับพื้นฐาน คะแนน 2.61–3.40 หมายถึงระดับกำลังพัฒนา คะแนน 3.41–4.20 หมายถึงระดับก้าวหน้า และคะแนน 4.21–5.00 หมายถึงระดับเชี่ยวชาญ

(3).การตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือทั้งในด้านความตรงเชิงเนื้อหาและความเชื่อมั่น

(3.1).การตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity)

แบบประเมินฉบับร่างได้รับการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน ซึ่งมีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย (1) แพทย์ผู้ดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการด้านสารสนเทศของโรงพยาบาล (2) เกษตรกรผู้เชี่ยวชาญด้านการพัฒนาโปรแกรมและระบบสารสนเทศสุขภาพ และ (3) วิศวกรคอมพิวเตอร์ผู้มีประสบการณ์การทำงานทั้งในประเทศและต่างประเทศ การประเมินความตรงเชิงเนื้อหาใช้ดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item-Objective Congruence: IOC) โดยกำหนดเกณฑ์ยอมรับที่ค่า IOC มากกว่า 0.50 ข้อคำถามใดที่มีค่า IOC ต่ำกว่าเกณฑ์จะได้รับการปรับปรุงหรือตัดออก

(3.2).การตรวจสอบความเชื่อมั่น (Reliability)

การตรวจสอบความเชื่อมั่นของแบบประเมินดำเนินการโดยนำแบบประเมินไปทดสอบกับเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานในสายงานสารสนเทศของหน่วยงานสาธารณสุขนอกสังกัดกระทรวงสาธารณสุข จำนวน 30 แห่ง แบ่งเป็นหน่วยงานสังกัดกระทรวงกลาโหม 25 แห่ง สังกัดกรุงเทพมหานคร 3 แห่ง และสังกัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม 7 แห่ง โดยใช้แบบสอบถามออนไลน์เป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ความเชื่อมั่นใช้สัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient)

ผลและวิจารณ์

การพัฒนาแบบประเมินระดับวุฒิภาวะทางดิจิทัลของสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดและโรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุขในการศึกษานี้ ได้แบบประเมินที่ประกอบด้วย 8 ด้าน จำนวน 69 ข้อคำถาม โดยมีจำนวนข้อในแต่ละด้านดังนี้ ด้านที่ 1 จำนวน 8 ข้อ ด้านที่ 2 จำนวน 8 ข้อ ด้านที่ 3 จำนวน 9 ข้อ ด้านที่ 4 จำนวน 9 ข้อ ด้านที่ 5 จำนวน 9 ข้อ ด้านที่ 6 จำนวน 9 ข้อ ด้านที่ 7 จำนวน 8 ข้อ และด้านที่ 8 จำนวน 9 ข้อ เครื่องมือดังกล่าวออกแบบให้ใช้ประเมินในระดับองค์กร โดยผู้ตอบที่เหมาะสมคือผู้มีหน้าที่รับผิดชอบงานด้านเทคโนโลยีสารสนเทศของหน่วยงานโดยตรง



ผลการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน ด้วยดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (Item-Objective Congruence: IOC) พบว่า ข้อคำถามทุกข้อผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ($IOC \geq 0.50$) แสดงให้เห็นว่าเนื้อหาของข้อคำถามมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การประเมินในแต่ละด้าน ทั้งนี้ จากการกระบวนการตรวจสอบโดยผู้เชี่ยวชาญ ไม่พบข้อคำถามที่ต้องตัดออกหรือปรับแก้ในขั้นตอนสุดท้าย

การทดสอบความเชื่อมั่นของแบบประเมินดำเนินการในหน่วยงานจำนวน 30 แห่ง โดยได้รับแบบประเมินตอบกลับจาก 26 หน่วยงาน ผู้ตอบแบบประเมินเป็นผู้มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับงานสารสนเทศของหน่วยงาน กลุ่มตัวอย่างคัดเลือกจากโรงพยาบาลในสังกัดกระทรวงกลาโหม กระทรวงการอุดมศึกษา และสังกัดกรุงเทพมหานคร เนื่องจากมีลักษณะการทำงานและบริบทองค์กรที่ใกล้เคียงกับโรงพยาบาลในสังกัดกระทรวงสาธารณสุข

ผลการวิเคราะห์ความเชื่อมั่นภายในของแบบประเมินด้วยค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's alpha) พบว่า แบบประเมินทั้งฉบับมีค่าเท่ากับ 0.939 สะท้อนความเชื่อมั่นอยู่ในระดับสูง เมื่อพิจารณารายด้าน พบว่า ด้านที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.950 ด้านที่ 2 เท่ากับ 0.946 ด้านที่ 3 เท่ากับ 0.944 ด้านที่ 4 เท่ากับ 0.929 ด้านที่ 5 เท่ากับ 0.937 ด้านที่ 6 เท่ากับ 0.947 ด้านที่ 7 เท่ากับ 0.921 และด้านที่ 8 เท่ากับ 0.939 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบประเมินมีความสอดคล้องภายในที่ดีในทุกด้าน

จากผลการพัฒนาและตรวจสอบคุณภาพเบื้องต้น แบบประเมินนี้จึงเหมาะสำหรับใช้ประเมินระดับวุฒิภาวะทางดิจิทัลของหน่วยงานสาธารณสุขภาครัฐในระดับองค์กร โดยเฉพาะสำนักงานสาธารณสุขจังหวัด และโรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุข เพื่อใช้สะท้อนจุดแข็ง จุดอ่อน และกำหนดแนวทางพัฒนาองค์กรด้านดิจิทัลอย่างเป็นระบบ

ผลการศึกษาี้แสดงให้เห็นว่าแบบประเมินระดับวุฒิภาวะทางดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นมีคุณภาพเบื้องต้นในด้านความตรงเชิงเนื้อหาและความเชื่อมั่นภายใน โดยข้อคำถามทุกข้อผ่านเกณฑ์ IOC ที่กำหนด สะท้อนว่าองค์ประกอบและรายการประเมินมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการประเมินในแต่ละด้าน ทั้งนี้ จุดเด่นของการพัฒนาเครื่องมือฉบับนี้คือการบูรณาการองค์ความรู้จากวรรณกรรมและกรอบแนวคิดทั้งในและต่างประเทศ แล้วนำมาสังเคราะห์ให้เหมาะสมกับบริบทของระบบสาธารณสุขไทย ซึ่งแตกต่างจากการนำแบบประเมินจากต่างประเทศมาใช้โดยตรง

ในด้านความเชื่อมั่น พบว่าแบบประเมินทั้งฉบับมีค่า Cronbach's alpha เท่ากับ 0.939 และรายด้านอยู่ระหว่าง 0.921–0.950 ซึ่งอยู่ในระดับสูง สะท้อนว่าข้อคำถามในแต่ละด้านมีความสอดคล้องกันดีและสามารถใช้ประเมินมิติของวุฒิภาวะทางดิจิทัลได้อย่างเป็นระบบ อย่างไรก็ตาม ค่าแอลฟาที่อยู่ในระดับสูงมากในบางด้านอาจสะท้อนว่าข้อคำถามบางข้อมีเนื้อหาที่ใกล้เคียงกัน จึงเป็นประเด็นที่ควรนำไปพิจารณาในการพัฒนาเครื่องมือระยะต่อไป เพื่อเพิ่มความกระชับของแบบประเมินโดยยังคงความครอบคลุมของเนื้อหาไว้

แม้ว่าการศึกษาี้จะไม่ได้ทำการเปรียบเทียบแบบประเมินที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องมือเฉพาะฉบับใดฉบับหนึ่งโดยตรง แต่เครื่องมือนี้ได้รับการพัฒนาจากการบูรณาการแนวคิดและองค์ประกอบจากแบบประเมิน

วุฒิภาวะทางดิจิทัลหลายแหล่ง เพื่อให้เหมาะสมกับบริบทของหน่วยงานราชการไทยและระบบบริการสุขภาพของประเทศ ดังนั้น คุณูปการสำคัญของเครื่องมือนี้จึงอยู่ที่การปรับใช้แนวคิดสากลให้สอดคล้องกับบทบาทของสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดและโรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุข ซึ่งมีการกิจ โครงสร้างการบริหาร และข้อจำกัดด้านทรัพยากรแตกต่างจากองค์กรสุขภาพในต่างประเทศ

อีกประเด็นหนึ่งที่ควรพิจารณาคือ ขอบเขตการใช้เครื่องมือ การศึกษานี้ออกแบบแบบประเมินเพื่อใช้ในระดับองค์กร ไม่ใช่ระดับบุคคล ดังนั้น ผู้ตอบที่เหมาะสมควรเป็นผู้ที่รับผิดชอบงานด้านเทคโนโลยีสารสนเทศของหน่วยงานโดยตรง ซึ่งมีความเข้าใจทั้งด้านระบบสารสนเทศ โครงสร้างพื้นฐานดิจิทัล และการดำเนินงานเชิงองค์กร อย่างไรก็ตาม แม้การทดสอบความเชื่อมั่นจะดำเนินการกับหน่วยงานนอกสังกัดกระทรวงสาธารณสุขบางแห่งที่มีบริบทใกล้เคียงกัน แต่การนำแบบประเมินไปใช้ในทางปฏิบัติยังคงจำกัดอยู่กับสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดและโรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุขเท่านั้น เนื่องจากหน่วยงานในสังกัดอื่นอาจมีบริบทองค์กรแตกต่างกัน

จุดแข็งของการศึกษานี้คือการพัฒนาเครื่องมือจากการสังเคราะห์วรรณกรรมทั้งในและต่างประเทศ และผ่านการตรวจสอบโดยผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ทั้งในด้านระบบสารสนเทศและเทคโนโลยีสารสนเทศ ทำให้เครื่องมือมีความเหมาะสมเชิงเนื้อหาและสามารถนำไปใช้ประเมินสถานะด้านดิจิทัลของหน่วยงานเพื่อระบุจุดแข็ง จุดอ่อน และใช้ประกอบการวางแผนพัฒนาองค์กรได้

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัดหลายประการ ประการแรก ยังไม่ได้มีการวิเคราะห์องค์ประกอบ (factor analysis) เพื่อตรวจสอบว่าโครงสร้างของข้อคำถามสอดคล้องกับกรอบแนวคิดที่กำหนดไว้หรือไม่ ประการที่สอง กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบความเชื่อมั่นมีจำนวนจำกัด และไม่ได้เก็บข้อมูลจากหน่วยงานในสังกัดกระทรวงสาธารณสุขโดยตรงทุกประเภท ประการที่สาม ยังไม่ได้ตรวจสอบความเชื่อมั่นแบบทดสอบซ้ำ (test-retest reliability) และยังไม่ได้ตรวจสอบความตรงเชิงเกณฑ์ (criterion validity) ดังนั้น การศึกษาในอนาคตควรขยายการทดสอบเครื่องมือไปยังหน่วยงานเป้าหมายโดยตรงในสังกัดกระทรวงสาธารณสุขด้วยขนาดตัวอย่างที่มากขึ้น พร้อมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบของเครื่องมือ และตรวจสอบคุณภาพด้านอื่นเพิ่มเติม เพื่อยืนยันความเหมาะสมของแบบประเมินสำหรับการใช้งานในระดับนโยบายและการบริหารจัดการองค์กรต่อไป

สรุป

การวิจัยนี้มุ่งพัฒนาแบบประเมินระดับวุฒิภาวะทางดิจิทัลสำหรับสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดและโรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุข โดยเริ่มจากการทบทวนวรรณกรรมและกรอบแนวคิดเครื่องมือประเมินที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาสังเคราะห์เป็นองค์ประกอบและตัวชี้วัดให้สอดคล้องกับบริบทการดำเนินงานของหน่วยงานภาครัฐ จากนั้นพัฒนาเครื่องมือในลักษณะการประยุกต์จากหลายกรอบอ้างอิง (ไม่ยึดต้นแบบเพียงฉบับเดียว) และจัดโครงสร้างการประเมินเป็น 8 ด้าน ได้แก่ (1) ความพร้อมด้านยุทธศาสตร์และนโยบายดิจิทัล (2) ความพร้อมด้านการนำการเปลี่ยนแปลงสู่องค์กรดิจิทัล (3) ความพร้อมด้านการจัดการประสบการณ์ดิจิทัลของผู้รับบริการ (4) ความสมบูรณ์ของกระบวนการทำงานและการให้บริการดิจิทัล



(5) ความพร้อมด้านทักษะดิจิทัลของบุคลากร (6) ความเข้มแข็งของวัฒนธรรมองค์กรดิจิทัล (7) ความสมบูรณ์ของโครงสร้างและระบบงานดิจิทัล และ (8) ความพร้อมด้านเทคโนโลยีดิจิทัลและระบบสารสนเทศ เครื่องมือเป็นแบบสอบถามมาตรฐานค่าแบบลิเคิร์ต 5 ระดับ รวม 69 ข้อ และกำหนดการแปลผลคะแนนเฉลี่ยเป็น 5 ระดับคุณภาพ ได้แก่ ระดับเริ่มต้น, ระดับพื้นฐาน, ระดับกำลังพัฒนา, ระดับก้าวหน้า และ ระดับเชี่ยวชาญ เพื่อให้สะท้อนระดับความพร้อมและความก้าวหน้าด้านดิจิทัลของหน่วยงานอย่างเป็นระบบและเอื้อต่อการใช้ประโยชน์เชิงนโยบายและการพัฒนาองค์กร

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรวง รุ่งประกายพรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำเชิงวิชาการอย่างต่อเนื่อง ครอบคลุมการกำหนดกรอบแนวคิด การออกแบบการวิจัย ตลอดจนการพัฒนาและปรับปรุงแบบประเมินระดับคุณภาพทางดิจิทัลให้มีความเหมาะสมกับบริบทของหน่วยงานเป้าหมาย และมีความถูกต้องตามหลักวิชาการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 3 ท่าน ได้แก่ คุณรพี อัญญาวุฒิเจริญ, คุณวัชรพงษ์ กุลศิริ และ คุณคมกฤษ ศรีไสว ที่ได้กรุณาสละเวลาให้ข้อเสนอแนะ ตรวจสอบความสอดคล้องและความเหมาะสมของรายการคำถาม ตลอดจนร่วมพิจารณาปรับปรุงสาระและถ้อยคำของเครื่องมือ อันเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้แบบประเมินมีความตรงเชิงเนื้อหาและสามารถนำไปใช้ประเมินระดับคุณภาพทางดิจิทัลได้อย่างมีประสิทธิภาพ



เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงสาธารณสุข. (2021). ยุทธศาสตร์สุขภาพดิจิทัล กระทรวงสาธารณสุข (2564 - 2568). Retrieved 19 January from https://cnto.moph.go.th/upload_files/ดาวน์โหลด/ยุทธศาสตร์สุขภาพดิจิทัล
- สำนักงานพัฒนารัฐบาลดิจิทัล (องค์การมหาชน). (2022, 21 June 2022). แผนพัฒนารัฐบาลดิจิทัลของประเทศไทย พ.ศ.2566-2570. Retrieved January 19 from <https://www.dga.or.th/policy-standard/policy-regulation/dga-019/dga-027/dg-plan-2566-2570/>
- สำนักงานเลขาธิการวุฒิสภา. (2019, 4 April 2019). แผนแม่บทภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติ (๗) ประเด็น โครงสร้างพื้นฐาน ระบบโลจิสติกส์ และดิจิทัล (พ.ศ. ๒๕๖๑ - ๒๕๘๐) Retrieved January 19 from <https://www.senate.go.th/assets/portals/181/fileups/180/files/07-โครงสร้างพื้นฐาน-ระบบโลจิสติกส์-และดิจิทัล.pdf>
- Rossmann, A. (2019). Digital Maturity: Conceptualization and Measurement Model. *Conference Paper*. <https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/345760193>

การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับจัดการข้อมูลผู้ป่วยที่ใช้ยาต้านการแข็งตัวของเลือด ในงานเภสัชกรรมคลินิก

Development of a Web Application for Managing Patient Data of Anticoagulant Therapy in Clinical Pharmacy Practice

เจษฎากร ทองอินทร¹ และ พีรยศ ภมรศิลป์ธรรม¹

Jedsadakorn Thonginthon¹ and Perayot Pamonsinlapatham¹

บทคัดย่อ

การดูแลผู้ป่วยที่ใช้ยาต้านการแข็งตัวของเลือดจำเป็นต้องมีการติดตามผลการรักษาอย่างใกล้ชิด เนื่องจากยาในกลุ่มนี้มีช่วงการรักษาแคบและมีความเสี่ยงต่อการเกิดภาวะแทรกซ้อน โดยเฉพาะผู้ป่วยที่ใช้ยา warfarin ซึ่งต้องมีการติดตามค่า International Normalized Ratio (INR) อย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม การจัดเก็บข้อมูลในคลินิกยังคงใช้การบันทึกแบบเอกสารหรือโปรแกรมพื้นฐาน ซึ่งมีข้อจำกัดในการจัดการข้อมูล และการสืบค้นข้อมูลย้อนหลัง การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการจัดการและติดตามข้อมูลผู้ป่วยที่ใช้ยาต้านการแข็งตัวของเลือดในงานเภสัชกรรมคลินิก

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงพัฒนา (development research) โดยใช้กระบวนการ System Development Life Cycle (SDLC) แบบ waterfall model ในการออกแบบและพัฒนาระบบเว็บแอปพลิเคชันถูกพัฒนาโดยใช้ภาษา HTML, CSS, JavaScript และ Bootstrap สำหรับส่วนติดต่อผู้ใช้ และใช้ภาษา PHP ร่วมกับฐานข้อมูล MySQL สำหรับการจัดการข้อมูลในรูปแบบ client-server architecture การประเมินระบบดำเนินการโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน ซึ่งประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านเภสัชกรรมคลินิก และด้านสารสนเทศศาสตร์ทางสุขภาพ โดยใช้แบบประเมินแบบผ่าน/ไม่ผ่าน ครอบคลุมด้านการใช้งานทั่วไป ด้านการสืบค้นและเรียกใช้ข้อมูล และด้านประสิทธิภาพในการใช้งานระบบ

ผลการศึกษา พบว่า ผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ท่านให้ผลการประเมินผ่านในทุกด้าน แสดงให้เห็นว่าระบบมีความเหมาะสมในระดับที่ยอมรับได้ และสามารถรองรับฟังก์ชันหลักที่จำเป็นสำหรับการติดตามข้อมูลผู้ป่วย เช่น การบันทึกข้อมูลผู้ป่วย การบันทึกค่า INR และประวัติการปรับขนาดยา สรุปได้ว่าเว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมในระดับต้น และมีศักยภาพในการนำไปพัฒนาเพิ่มเติมและทดลองใช้งานจริงในอนาคต อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อประเมินการใช้งานในกลุ่มผู้ใช้จริงและผลลัพธ์ทางคลินิกต่อไป

¹ คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

Faculty of Pharmacy, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand



คำสำคัญ: เว็บแอปพลิเคชัน, เภสัชกรรมคลินิก, ยาต้านการแข็งตัวของเลือด, INR

Abstract

Patients receiving anticoagulant therapy require close monitoring due to the narrow therapeutic index and the risk of complications, particularly among those using warfarin, which necessitates regular monitoring of the International Normalized Ratio (INR). However, data management in anticoagulant clinics is often conducted using paper-based records or basic software, resulting in limitations in data organization and retrieval. This study aimed to design and develop a web application for managing and monitoring patient data in clinical pharmacy settings.

This study employed a development research design using the System Development Life Cycle (SDLC) based on the waterfall model. The web application was developed using HTML, CSS, JavaScript, and Bootstrap for the front-end interface, and PHP with MySQL database for back-end data management in a client-server architecture. The system was evaluated by three experts in clinical pharmacy and health informatics using a pass/fail evaluation form covering three domains: general usability, data retrieval, and system performance.

The results showed that all three experts rated the system as “pass” in all domains, indicating that the application is acceptable at an initial level and capable of supporting essential functions, including patient data recording, INR monitoring, and dosage adjustment history. In conclusion, the developed web application demonstrates initial appropriateness and has the potential for further development and real-world implementation. However, further studies are required to evaluate usability among actual users and clinical outcomes.

Keywords : Web application, Clinical pharmacy, Anticoagulant therapy, INR monitoring

บทนำ

การบริหารทางเภสัชกรรม (pharmaceutical care) เป็นแนวคิดสำคัญในการดูแลผู้ป่วย โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ผู้ป่วยได้รับการใช้ยาที่เหมาะสม ปลอดภัย และเกิดประสิทธิผลทางการรักษาสูงสุด เภสัชกรมีบทบาทสำคัญในการติดตามผลการรักษา การประเมินปัญหาที่เกี่ยวข้องกับยา (Hepler & Strand, 1990) และการให้คำแนะนำแก่ผู้ป่วยเพื่อส่งเสริมการใช้ยาอย่างเหมาะสม

ยาต้านการแข็งตัวของเลือด เช่น warfarin เป็นยาที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการป้องกันและรักษาภาวะลิ่มเลือดอุดตันในผู้ป่วยหลายกลุ่ม เช่น ผู้ป่วยภาวะหัวใจเต้นผิดจังหวะ ผู้ป่วยลิ่มเลือดอุดตันในหลอดเลือดดำ

และผู้ป่วยที่ได้รับการผ่าตัดเปลี่ยนลิ้นหัวใจ อย่างไรก็ตาม warfarin เป็นยาที่มีช่วงการรักษาแคบและมีความแปรปรวนของการตอบสนองต่อยาในผู้ป่วยแต่ละราย ดังนั้นผู้ป่วยจึงจำเป็นต้องได้รับการติดตามค่า International Normalized Ratio (INR) อย่างสม่ำเสมอ เพื่อปรับขนาดยาให้เหมาะสมและลดความเสี่ยงต่อการเกิดภาวะแทรกซ้อน (Ageno et al., 2012) การติดตามค่า INR และการปรับขนาดยา warfarin จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลหลายด้าน เช่น ประวัติการใช้ยา โรคร่วม ยาอื่นที่ผู้ป่วยใช้ และพฤติกรรมกรการใช้ยา ดังนั้นการจัดการข้อมูลผู้ป่วยอย่างเป็นระบบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการดูแลผู้ป่วยที่ใช้ยาต้านการแข็งตัวของเลือด (Entezari-Maleki et al., 2016)

อย่างไรก็ตาม ในหลายสถานพยาบาล การจัดเก็บข้อมูลผู้ป่วยในคลินิกยาต้านการแข็งตัวของเลือดยังคงใช้ระบบการบันทึกข้อมูลแบบเอกสารหรือโปรแกรมพื้นฐาน ซึ่งมีข้อจำกัดในการจัดการข้อมูล การสืบค้นข้อมูลย้อนหลัง และการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิก เทคโนโลยีสารสนเทศทางสุขภาพสามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการจัดการข้อมูลผู้ป่วยและลดข้อผิดพลาดทางการแพทย์ (APaP & P., 2022) การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับติดตามการรักษาของผู้ป่วยที่ใช้ยาต้านการแข็งตัวของเลือดจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาใช้สนับสนุนการบริหารทางเภสัชกรรมและเพิ่มประสิทธิภาพในการดูแลผู้ป่วย

วัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบและพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับติดตามการรักษาของผู้ป่วยที่ใช้ยาต้านการแข็งตัวของเลือดในงานเภสัชกรรมคลินิก

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษานี้เป็นงานวิจัยเชิงพัฒนา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการจัดการข้อมูลผู้ป่วยที่ใช้ยาต้านการแข็งตัวของเลือดในงานเภสัชกรรมคลินิก

กระบวนการพัฒนาระบบ

การพัฒนาระบบดำเนินการตามแนวคิด System Development Life Cycle (SDLC) แบบ waterfall model ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ (Udomthanatheera K., 2019) ได้แก่

1. การวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งาน

ผู้วิจัยทำการศึกษาความต้องการของผู้ใช้งานระบบ ประกอบด้วยเภสัชกรและผู้ป่วยที่อยู่ในคลินิกยาต้านการแข็งตัวของเลือด โรงพยาบาลราชวิถี 2 (รังสิต) ได้แก่ เภสัชกรที่ปฏิบัติงานในคลินิกยาต้านการแข็งตัวของเลือด จำนวน 5 ท่าน และผู้ป่วยที่อยู่ในคลินิกยาต้านการแข็งตัวของเลือด จำนวน 5 ท่าน โดยดำเนินการสัมภาษณ์กลุ่มผู้ใช้งานเชิงลึกทั้ง 2 กลุ่ม เพื่อให้ได้แนวทางที่ต้องการในการใช้งานเว็บแอปพลิเคชัน โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ 1 ข้อมูลหรือฟังก์ชันที่ต้องการใช้งาน และส่วนที่ 2 รูปแบบที่ต้องการให้ จากนั้น



วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์ เพื่อกำหนดคุณสมบัติหลักของเว็บแอปพลิเคชัน ใช้เวลาสัมภาษณ์ประมาณ 10 นาทีต่อท่าน

2. การออกแบบระบบ

ผู้วิจัยได้ออกแบบโครงสร้างของระบบและฐานข้อมูล รวมถึงส่วนติดต่อผู้ใช้ให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้งาน โดยระบบถูกออกแบบในรูปแบบ client-server architecture เพื่อให้สามารถจัดเก็บข้อมูลผู้ป่วยได้อย่างเป็นระบบ

3. การพัฒนาโปรแกรม

ระบบถูกพัฒนาในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน โดยมีรายละเอียดการเขียนโปรแกรมเว็บแอปพลิเคชัน

ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1. รายละเอียดการเขียนโปรแกรมเว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น

เนื้อหา	รายละเอียด	ภาษาคอมพิวเตอร์
Front End	เป็นส่วนที่ใช้ในการติดต่อผู้ใช้ (user interface) เช่น หน้าแรก หน้าเว็บที่แสดงเนื้อหาข้อมูลต่าง ๆ รูปภาพ เป็นต้น เป็นส่วนที่ผู้ใช้งานทั่วไปสามารถเห็นและเข้ามาใช้งานเว็บไซต์ ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ หน้าจอแล็ปท็อป และหน้าจอผู้ป่วย	ภาษา HTML ,CSS ,JavaScript และ Bootstrap 5
Back End	เป็นส่วนที่ผู้พัฒนาใช้ในการจัดระบบจัดการเว็บไซต์ เช่น การจัดการฐานข้อมูล โครงสร้างเว็บไซต์ (การเพิ่มข้อมูล การลบข้อมูล การแก้ไขข้อมูล)	ภาษา PHP
Database	ใช้โปรแกรม phpMyAdmin ในการจัดการฐานข้อมูล สร้างตารางเก็บข้อมูล โครงสร้างข้อมูล เนื่องจากเป็นระบบการจัดฐานข้อมูลเชิงวัตถุสัมพันธ์ (object-relational) นอกจากนี้เป็นระบบฐานข้อมูล Opensource ที่ใช้ได้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย	ภาษา SQL

ในการพัฒนาระบบครั้งนี้ได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เป็นเครื่องมือช่วยในการพัฒนาโปรแกรม โดย AI ถูกนำมาใช้ในการสร้างโค้ดเบื้องต้น การแนะนำรูปแบบการเขียนโค้ด และการตรวจสอบข้อผิดพลาดของโปรแกรม ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการพัฒนาระบบและลดระยะเวลาในการพัฒนา อย่างไรก็ตาม ผู้พัฒนาได้ตรวจสอบและปรับปรุงโค้ดทุกส่วนก่อนนำไปใช้งานจริง เพื่อให้มั่นใจว่าระบบมีความถูกต้องและมีความปลอดภัยในการใช้งาน

4. การประเมินและทดสอบระบบ

4.1 ผู้วิจัยทำการทดสอบเพื่อประเมินการทำงานของระบบเบื้องต้นซึ่งได้ออกแบบตามข้อมูลความต้องการของผู้ใช้งาน เช่น การบันทึกข้อมูลผู้ป่วย การบันทึกค่า INR การแสดงข้อมูลย้อนหลัง

4.2 ผู้วิจัยนำเว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนา ให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน ประกอบด้วย

- ผู้เชี่ยวชาญด้านกลุ่มยาต้านการแข็งตัวของเลือด จำนวน 1 ท่าน เพื่อประเมินความถูกต้องและความครบถ้วนของข้อมูลทางคลินิก
- ผู้เชี่ยวชาญด้านสารสนเทศศาสตร์ทางสุขภาพ จำนวน 2 ท่าน เพื่อประเมินด้านการใช้งานของระบบ ได้แก่ ส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface) ความสะดวกในการใช้งาน การสืบค้นข้อมูล และประสิทธิภาพของระบบ

โดยแบบประเมิน จะวัดผลใน 3 ด้านหลัก ได้แก่ ด้านการใช้งานทั่วไป การสืบค้นและเรียกใช้ข้อมูล และประสิทธิภาพในการใช้งาน ใช้เกณฑ์การประเมินแบบผ่าน/ไม่ผ่าน และแบบประเมินเว็บแอปพลิเคชันจะผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา ด้วยวิธี Index of Item-Objective Congruence: IOC (Rovinelli and Hambleton, 1997) พร้อมให้ผู้เชี่ยวชาญ ได้แสดงข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ ใช้เวลาประมาณ 15–20 นาทีต่อท่าน

5. การนำระบบไปใช้งาน

หลังจากทดสอบระบบและปรับปรุงแก้ไขตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญแล้ว ระบบจะถูกนำไปใช้ทดลองในงานจริงที่ กลุ่มงานเภสัชกรรม โรงพยาบาลราชวิถี 2 (รังสิต) ซึ่งการศึกษานี้ยังไม่ได้มีการนำเว็บแอปพลิเคชันที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นนี้ไปใช้งานในคลินิกจริง

ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาความต้องการของผู้ใช้งานในงานเภสัชกรรมคลินิก พบว่าการติดตามผู้ป่วยที่เข้ายาต้านการแข็งตัวของเลือดจำเป็นต้องมีการจัดเก็บข้อมูลหลายประเภท ได้แก่ ข้อมูลพื้นฐานของผู้ป่วย ค่า International Normalized Ratio (INR) ประวัติการใช้ยา ข้อมูลการปรับขนาดยา ซึ่งสะท้อนถึงความซับซ้อนของการดูแลผู้ป่วยกลุ่มดังกล่าว

จากผลการพัฒนา ระบบเว็บแอปพลิเคชันสามารถรองรับการจัดเก็บข้อมูลดังกล่าวได้อย่างเป็นระบบ และประกอบด้วยฟังก์ชันหลัก ได้แก่ ระบบบันทึกข้อมูลผู้ป่วย ระบบบันทึกค่า INR และประวัติการรักษา ระบบติดตามการปรับขนาดยา และระบบสืบค้นข้อมูล โดยระบบถูกออกแบบในรูปแบบ client-server architecture ซึ่งช่วยให้สามารถจัดเก็บและเรียกใช้ข้อมูลย้อนหลังได้อย่างเป็นระบบดังรูปที่ 2 และ 3 เว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยฟังก์ชันหลัก ได้แก่

1. ระบบบันทึกข้อมูลผู้ป่วย

ระบบสามารถบันทึกข้อมูลพื้นฐานของผู้ป่วยและข้อมูลการใช้ยา ซึ่งช่วยให้เภสัชกรสามารถเข้าถึงข้อมูลผู้ป่วยได้สะดวกและลดความซ้ำซ้อนในการบันทึกข้อมูล

2. ระบบบันทึกค่า INR และประวัติการรักษา

ระบบสามารถบันทึกค่า INR ของผู้ป่วยในแต่ละครั้งที่มาติดตามการรักษา รวมถึงประวัติการใช้ยาและการปรับขนาดยา ทำให้สามารถติดตามแนวโน้มของค่า INR ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีความสำคัญต่อการปรับขนาดยา warfarin ให้เหมาะสมกับผู้ป่วย

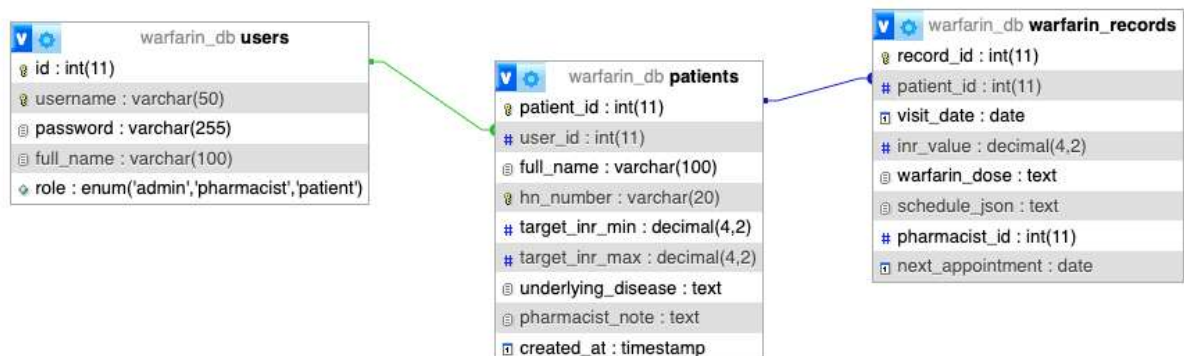
3. ระบบติดตามการปรับขนาดยา

ระบบสามารถแสดงประวัติการปรับขนาดยาในแต่ละครั้งที่ผู้ป่วยมาติดตามการรักษา ซึ่งช่วยให้เภสัชกรสามารถทบทวนข้อมูลย้อนหลังและใช้ข้อมูลดังกล่าวประกอบการตัดสินใจในการปรับขนาดยาในครั้งถัดไป

4. ระบบสืบค้นข้อมูลผู้ป่วย

ผู้ใช้งานสามารถค้นหาข้อมูลผู้ป่วยจากฐานข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการค้นหาเอกสารและเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามการรักษา

นอกจากนี้ ระบบยังถูกออกแบบให้สามารถรองรับการใช้งานของผู้ใช้หลายระดับ โดยมีการกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูลตามบทบาทของผู้ใช้งาน เช่น ผู้ดูแลระบบและเภสัชกร เพื่อเพิ่มความปลอดภัยของข้อมูล ซึ่งการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องมือปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) เป็นเครื่องมือสนับสนุนในการพัฒนาโปรแกรม โดย AI ถูกนำมาใช้ช่วยในกระบวนการเขียนโค้ด การตรวจสอบความถูกต้องของคำสั่ง และการแก้ไขข้อผิดพลาดของโปรแกรม ซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพในการเขียนโปรแกรม



รูปที่ 1. แผนภาพความสัมพันธ์ของฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ของระบบเว็บแอปพลิเคชัน



รูปที่ 2. ตัวอย่างหน้าจอภาพแสดงระบบการทำงานของเว็บแอปพลิเคชัน (หน้าแรกของ Admin)



รูปที่ 3. ตัวอย่างหน้าจอภาพแสดงระบบการทำงานของเว็บแอปพลิเคชัน (หน้าแสดงข้อมูลของผู้ป่วย)

ตารางที่ 1 ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ

ด้านการประเมิน	ผู้เชี่ยวชาญท่านที่ 1	ผู้เชี่ยวชาญท่านที่ 2	ผู้เชี่ยวชาญท่านที่ 3
ด้านการใช้งานทั่วไป (4 ข้อ)	4/4 (ผ่าน)	4/4 (ผ่าน)	4/4 (ผ่าน)
ด้านการสืบค้นและเรียกใช้งานข้อมูล (1 ข้อ)	1/1 (ผ่าน)	1/1 (ผ่าน)	1/1 (ผ่าน)
ด้านประสิทธิภาพต่อการใช้งาน (5 ข้อ)	5/5 (ผ่าน)	5/5 (ผ่าน)	5/5 (ผ่าน)
ผลการประเมินโดยรวมทั้ง 10 ข้อ	10/10 (ผ่าน)	10/10 (ผ่าน)	10/10 (ผ่าน)



ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน พบว่า ระบบผ่านการประเมินในทุกด้านทั้ง 10 ข้อคำถาม ได้แก่ ด้านการใช้งานทั่วไปจำนวน 4 ข้อ ด้านการสืบค้นและเรียกใช้ข้อมูลจำนวน 1 ข้อ และด้านประสิทธิภาพในการใช้งานจำนวน 5 ข้อ ดังตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าระบบมีความครบถ้วนของฟังก์ชันและมีความเหมาะสมในระดับต้นสำหรับการนำไปพัฒนาต่อยอด นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะจากผู้เชี่ยวชาญเพื่อใช้ในการปรับปรุงระบบก่อนการใช้งาน เช่น เพิ่มวิธีการติดต่อหากผู้ใช้งานลืมรหัสผ่าน การแสดงผลในโทรศัพท์มือถือที่มีขนาดเล็ก เป็นต้น

ผลการศึกษาสอดคล้องกับแนวโน้มการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาใช้ในการสนับสนุนการจัดการข้อมูลผู้ป่วยในระบบบริการสุขภาพ (Chen et al ,2024, Wu ,2024) อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้เป็นเพียงการพัฒนาและประเมินความเหมาะสมของระบบในระยะเริ่มต้น โดยยังไม่ได้มีการนำไปใช้งานจริงหรือประเมินผลลัพธ์ทางคลินิก เช่น การควบคุมค่า INR ให้อยู่ในช่วงที่กำหนด ความร่วมมือในการใช้ยา เป็นต้น

บทสรุป

การศึกษานี้เป็นการออกแบบและพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการจัดการข้อมูลผู้ป่วยที่เข้ายาด้านการแข็งตัวของเลือดในงานเภสัชกรรมคลินิก โดยระบบสามารถรองรับการจัดเก็บข้อมูลผู้ป่วย ค่า INR และประวัติการปรับขนาดยาได้อย่างเป็นระบบ ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญพบว่า ระบบมีความเหมาะสมในด้านการใช้งานทั่วไป การสืบค้นและเรียกใช้ข้อมูล และประสิทธิภาพในการใช้งานในระดับที่ยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่าระบบมีความครบถ้วนของฟังก์ชันตามที่ออกแบบในระยะเริ่มต้น

ดังนั้น เว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นจึงมีศักยภาพในการนำไปพัฒนาเพิ่มเติมและทดลองใช้งานจริงในอนาคต อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อประเมินการใช้งานในกลุ่มผู้ใช้งานจริงและผลลัพธ์ทางคลินิกต่อไป



เอกสารอ้างอิง

Ageno, W., Gallus, A. S., Wittkowsky, A., Crowther, M., Hylek, E. M., & Palareti, G. (2012). Oral anticoagulant therapy: Antithrombotic therapy and prevention of thrombosis (9th ed.): American College of Chest Physicians evidence-based clinical practice guidelines. *Chest*, 141(2 Suppl), e44S–e88S.

Chen, W., Chen, J., Jiang, S., Wang, C., & Zhang, J. (2024). Web-based warfarin management (Alfalfa App) versus traditional warfarin management: Multicenter prospective cohort study. *Journal of Medical Internet Research*, 26, e46319.

Entezari-Maleki, T., Dousti, S., Hamishehkar, H., & Gholami, K. (2016). A systematic review comparing two common models for management of warfarin therapy: Pharmacist-led service versus usual medical care. *Journal of Clinical Pharmacology*, 56(1), 24–38.

Hepler, C. D., & Strand, L. M. (1990). Opportunities and responsibilities in pharmaceutical care. *American Journal of Hospital Pharmacy*, 47(3), 533–543.

P., A. P., & P., P. (2022). Development and design of web application for handling medication errors information in hospital: Concept and problem solving using health-related informatics. *Thai Journal of Pharmacy Practice*, 14(3), 556–568.

Rovinelli, R. J., & Hambleton, R. K. (1977). On the use of content specialists in the assessment of criterion-referenced test item validity. *Dutch Journal of Educational Research*, 2, 49-60.

Udomthanatheera K. System Development Life Cycle : SDLC Division of Logistics 2019 [21/08/2025]. Available from: <https://dol.dip.go.th/th/category/2019-02-08-08-57-30/2019-03-15-11-06-29>

Wu, Y., Wang, X., Zhou, M., Huang, Z., Liu, L., & Cong, L. (2024). Application of eHealth tools in anticoagulation management after cardiac valve replacement: Scoping review coupled with bibliometric analysis. *JMIR mHealth and uHealth*, 12, e48716.



การวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงในการขนส่งย้อนกลับในอุตสาหกรรมอีคอมเมิร์ซแบบย้อนกลับ โดยใช้กระบวนการการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น

Risk Factors Analysis of Reverse Transport in the E-Commerce Industry's Reverse Logistics Using Analytic Hierarchy Process

พลกฤต วัชรพลานนท์¹ และนพคุณ แสงเขียว¹

Ponlakit Watcharaparanon¹ and Noppakun Sangkhiew¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในกระบวนการขนส่งย้อนกลับของภาคส่วนโลจิสติกส์ย้อนกลับในอุตสาหกรรมอีคอมเมิร์ซ และจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงดังกล่าว การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการโดยใช้แบบสอบถามจากบุคลากรที่ปฏิบัติงานด้านโลจิสติกส์ย้อนกลับในธุรกิจอีคอมเมิร์ซ ได้แก่ พนักงานขนส่ง ผู้ประสานงานด้านการขนส่ง ผู้จัดการฝ่ายโลจิสติกส์ และตำแหน่งที่เกี่ยวข้อง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) เพื่อประเมินและจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยความเสี่ยง ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยความเสี่ยงหลักในกระบวนการขนส่งย้อนกลับสามารถจำแนกได้เป็น 6 ประเภท ได้แก่ ความเสี่ยงด้านการดำเนินงาน ความเสี่ยงด้านเทคโนโลยี ความเสี่ยงด้านข้อมูล ความเสี่ยงด้านการเงิน ความเสี่ยงด้านนโยบาย และความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อม โดยผลการจัดลำดับความสำคัญด้วยวิธี AHP พบว่า ความเสี่ยงด้านการดำเนินงานมีความสำคัญสูงสุด คิดเป็นค่าน้ำหนักร้อยละ 41 รองลงมาคือ ความเสี่ยงด้านเทคโนโลยี ร้อยละ 31 ความเสี่ยงด้านข้อมูล ร้อยละ 11 ความเสี่ยงด้านนโยบาย ร้อยละ 8 ความเสี่ยงด้านการเงิน ร้อยละ 5 และความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อม ร้อยละ 4 ตามลำดับ ผลการวิจัยสะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของการบริหารจัดการความเสี่ยงด้านการดำเนินงานและเทคโนโลยีในกระบวนการขนส่งย้อนกลับ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการจัดลำดับความสำคัญดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางในการวางแผนบริหารความเสี่ยงเชิงรุก การจัดสรรทรัพยากรอย่างเหมาะสม และการปรับปรุงประสิทธิภาพการดำเนินงาน เพื่อยกระดับคุณภาพการให้บริการ เพิ่มความพึงพอใจของลูกค้า และเสริมสร้างความยั่งยืนให้กับระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับในอุตสาหกรรมอีคอมเมิร์ซในระยะยาว

คำสำคัญ : ปัจจัยเสี่ยง อีคอมเมิร์ซ การขนส่งย้อนกลับ วิธีการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น

¹ ภาควิชา Engineering วิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

Department of Industrial and Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.



Abstract

This research aims to investigate the risk factors occurring in the reverse transportation process within the reverse logistics sector of the e-commerce industry and to prioritize these risks systematically. Data was collected through a structured questionnaire distributed to personnel directly involved in reverse logistics operations in e-commerce businesses, including transport staff, transportation coordinators, logistics managers, and other related positions. The data collected were analyzed using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to evaluate and rank the identified risk factors. The findings indicate that the major risk factors in the reverse transportation process can be classified into six main categories: operational risk, technology risk, information risk, financial risk, policy risk, and environmental risk. The prioritization results derived from the AHP analysis reveal that operational risk holds the highest level of significance, with a relative weight of 41%. This is followed by technology risk (31%), information risk (11%), policy risk (8%), financial risk (5%), and environmental risk (4%), respectively. The results highlight the critical importance of managing operational and technological risks in reverse transportation processes. Prioritization outcomes provide practical insights that can support organizations in developing proactive risk management strategies, allocating resources effectively, and improving operational performance. Ultimately, these efforts contribute to enhancing service quality, increasing customer satisfaction, and strengthening the long-term sustainability of reverse logistics systems in the e-commerce industry.

Keyword : Risk factors, E-commerce, Reverse transportation, the Analytic Hierarchy Process

บทนำ

อุตสาหกรรมอีคอมเมิร์ซ (E-commerce) มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ซึ่งทำให้ผู้บริโภคต้องอยู่บ้านมากขึ้นและไม่สะดวกออกไปซื้อสินค้า การซื้อสินค้าออนไลน์จึงเข้ามาตอบโต้ภัยดังกล่าว พร้อมทั้งตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในหลายด้าน เช่น ราคาที่ต่ำกว่าการซื้อหน้าร้าน ความสะดวกในการเปรียบเทียบราคากับร้านค้าอื่นได้อย่างรวดเร็ว บริการจัดส่งถึงบ้าน และสิทธิประโยชน์จากผู้ให้บริการแพลตฟอร์มอีคอมเมิร์ซ เช่น คุปองส่วนลดสินค้า ด้วยเหตุนี้ อุตสาหกรรมอีคอมเมิร์ซจึงเติบโตอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ.2569 มีการเติบโตมากถึง 153% (กระทรวงพาณิชย์, 2569)

อย่างไรก็ตาม ความท้าทายสำคัญของอุตสาหกรรมอีคอมเมิร์ซยังคงอยู่ที่กระบวนการโลจิสติกส์ย้อนกลับ ซึ่งมักเกิดจากการคืนสินค้าของผู้บริโภค อันเนื่องมาจากสินค้าชำรุดเสียหายหรือไม่ตรงตามความต้องการของลูกค้า สินค้าที่ถูกส่งคืนจะเข้าสู่กระบวนการขนส่งย้อนกลับ เริ่มจากผู้บริโภคส่งมอบให้บริษัท



ขนส่ง จากนั้นส่งต่อไปยังผู้ขาย และในบางกรณีอาจส่งต่อไปยังผู้ผลิตเพื่อซ่อมแซมหรือดำเนินการเพิ่มเติม ส่งผลให้กระบวนการมีความซับซ้อนและต้นทุนสูงขึ้น (Lorenzo-Espejo, 2024)

การขนส่งย้อนกลับจึงมีบทบาทสำคัญในการอำนวยความสะดวกให้การส่งคืนสินค้าเป็นไปอย่างรวดเร็วและลดความเสียหาย อย่างไรก็ตาม ยังเผชิญกับความท้าทายด้านต้นทุน ความซับซ้อนของรูปแบบการขนส่ง และการจัดการข้อมูล ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญในระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับของอีคอมเมิร์ซ (Kabo-Bah, 2025)

งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการศึกษาปัจจัยเสี่ยงที่เกิดขึ้นในกระบวนการขนส่งย้อนกลับของธุรกิจอีคอมเมิร์ซโดยใช้และทำการจัดลำดับความเสี่ยงโดยใช้กระบวนการการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาปัจจัยความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในกระบวนการขนส่งย้อนกลับ และจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงโดยใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยกระบวนการการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการดำเนินการวิจัยในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การทบทวนวรรณกรรมและการระบุปัจจัยความเสี่ยง เริ่มจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ ความเสี่ยงในการขนส่งย้อนกลับในอีคอมเมิร์ซ (Prayogo et al., 2024; Kraugusteeliana & Violin, 2024; Khoshnampour & Nosrati, 2011) และกระบวนการการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Jomtong, P., & Pornsing, C.2023) จากนั้นทำการระบุปัจจัยความเสี่ยงที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการขนส่งย้อนกลับโดยปัจจัยเหล่านี้ได้รับการจัดหมวดหมู่ และวิเคราะห์ร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการขนส่ง เพื่อยืนยันความสอดคล้องกับบริบทของกระบวนการขนส่งย้อนกลับในอุตสาหกรรมอีคอมเมิร์ซของประเทศไทย ปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้องจะถูกคัดออกเหลือเฉพาะปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ

จากการทบทวนวรรณกรรมและตรวจสอบถามถูกต้องโดยผู้เชี่ยวชาญ พบว่าปัจจัยความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในกระบวนการขนส่งย้อนกลับของอีคอมเมิร์ซสามารถจำแนกได้เป็น 6 ประเภท โดยแต่ละประเภทสะท้อนมิติของความเสียหายที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและประสิทธิผลของการขนส่งย้อนกลับ ดังนี้

1. ความเสี่ยงด้านการดำเนินงาน (Operational Risk)

ความเสี่ยงนี้เกี่ยวข้องกับปัญหาในการปฏิบัติงานประจำวันของกระบวนการขนส่งย้อนกลับ เช่น ความล่าช้าในการรับหรือจัดส่งสินค้า การจัดการสินค้าผิดพลาด การขาดการประสานงานระหว่างผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในห่วงโซ่อุปทาน หรือการมีบุคลากรและทรัพยากรไม่เพียงพอ ความไม่มีประสิทธิภาพในการดำเนินงานอาจนำไปสู่ต้นทุนที่สูงขึ้นและความพึงพอใจของลูกค้าที่ลดลง (Yu & Sun, 2024; Gupta et al., 2023)

2. ความเสี่ยงด้านเทคโนโลยี (Technology Risk)

โดยส่วนใหญ่ความเสี่ยงนี้มักเกิดจากจากความขัดข้องของระบบหรือโครงสร้างพื้นฐานด้านเทคโนโลยีที่ไม่เพียงพอ เช่น ระบบล่ม ข้อผิดพลาดของซอฟต์แวร์ ความไม่เข้ากันของแพลตฟอร์ม หรือการขาดระบบอัตโนมัติในการจัดการสินค้า หากไม่มีเทคโนโลยีที่ทันสมัยและเชื่อถือได้ การติดตามและประมวลผลสินค้าคงคลังจะมีความซับซ้อนและเกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย (Sonar et al, 2024; Yu & Sun, 2024)

3. ความเสี่ยงด้านข้อมูล (Information Risk)

เกิดจากการสื่อสารข้อมูลที่ไม่ถูกต้อง ไม่ครบถ้วน หรือเกิดความล่าช้าระหว่างผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง เช่น บัณฑิตสินค้าผิดพลาด การขาดการอนุมัติการคืนสินค้า หรือเงื่อนไขการคืนสินค้าที่ไม่ชัดเจน ซึ่งอาจทำให้เกิดความสับสนและข้อผิดพลาดในกระบวนการ การแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ถูกต้องและทันท่วงทีจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง (Sonar et al, 2024)

4. ความเสี่ยงด้านการเงิน (Financial Risk)

ความเสี่ยงด้านนี้เกี่ยวข้องกับต้นทุนในการจัดการสินค้าคงคลัง เช่น ค่าใช้จ่ายด้านการขนส่ง ค่าธรรมเนียมการนำสินค้าเข้าสต็อกใหม่ ค่าใช้จ่ายในการคืนเงิน และความสูญเสียจากสินค้าที่เสียหายหรือไม่สามารถจำหน่ายได้ หากบริหารจัดการไม่ดี อาจส่งผลกระทบต่อกำไรและผลประกอบการโดยรวมของบริษัท (Naseem et al, 2024)

5. ความเสี่ยงด้านนโยบาย (Policy Risk)

ความเสี่ยงด้านนโยบายจะครอบคลุมความเสี่ยงที่เกิดจากนโยบายการคืนสินค้าที่ไม่ชัดเจน ไม่สอดคล้องกัน หรือมีการเปลี่ยนแปลงบ่อยครั้ง ทั้งนโยบายภายในองค์กรและข้อกำหนดจากหน่วยงานกำกับดูแล รวมถึงการปฏิบัติตามกฎหมายการค้า ภาษี และข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อม นโยบายที่ออกแบบไม่เหมาะสมอาจสร้างความสับสนแก่ลูกค้าและเป็นอุปสรรคต่อการดำเนินงาน (Sonar et al, 2024)

6. ความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Risk)

ความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อมมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับผลกระทบของการขนส่งย้อนกลับต่อความยั่งยืนและสิ่งแวดล้อม เช่น ขยะจากบรรจุภัณฑ์ที่ถูกส่งคืน การปล่อยก๊าซคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจากการขนส่ง และการกำจัดสินค้าที่ไม่เหมาะสม ปัจจุบันธุรกิจถูกกดดันให้พัฒนากระบวนการคืนสินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสอดคล้องกับมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้น (Wadhawan et al, 2024; Naseem et al, 2024)

ส่วนที่ 2 การออกแบบและตรวจสอบแบบสอบถาม จัดทำแบบสอบถามโดยอ้างอิงจากปัจจัยความเสี่ยงที่ผ่านการคัดเลือก และใช้วิธีการตรวจสอบความสอดคล้องของข้อความคำถามกับวัตถุประสงค์การวิจัย ด้วยดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item-Objective Congruence: IOC) เพื่อยืนยันความถูกต้องของเครื่องมือวิจัยโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน จากนั้นนำแบบสอบถามไปแจกจ่ายให้กับกลุ่มตัวอย่างที่คัดเลือกอย่างเหมาะสม ซึ่งเป็นผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องโดยตรงกับการดำเนินงานขนส่งย้อนกลับประกอบไปด้วย พนักงานขนส่ง ผู้ประสานงานด้านการขนส่ง ผู้จัดการโลจิสติกส์ พนักงานศูนย์กระจายสินค้า หัวหน้าแผนกโลจิสติกส์ และอื่น ๆ โดยมีประสบการณ์ทำงานในด้านการขนส่งอย่างน้อย 3 เดือน รวมทั้งหมด 400 คน



ส่วนที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูลและจัดลำดับความเสี่ยง ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยกระบวนการการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) เพื่อจัดลำดับและประเมินความสำคัญของปัจจัยความเสี่ยงในการขนส่งย้อนกลับในอุตสาหกรรมอีคอมเมิร์ซ โดยผลการจัดลำดับจะช่วยให้ผู้บริหารและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียสามารถมุ่งเน้นการบริหารจัดการความเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลและวิจารณ์

จากแบบสอบถามถูกวิเคราะห์โดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) เพื่อเปรียบเทียบและหาน้ำหนักของปัจจัยที่มีความเสี่ยงสูงสุด โดยระบุปัจจัยและตัวย่อยของปัจจัยเสี่ยงแต่ละประการดังที่แสดงในตารางที่ 1.

ตารางที่ 1 คำย่อปัจจัยเสี่ยง

ปัจจัยเสี่ยง	คำย่อ
ความเสี่ยงด้านการดำเนินงาน	O
ความเสี่ยงด้านเทคโนโลยี	T
ความเสี่ยงด้านข้อมูล	I
ความเสี่ยงด้านการเงิน	F
ความเสี่ยงด้านนโยบาย	P
ความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อม	E

เนื่องจากการรวบรวมข้อมูลจำนวนมากและข้อมูลของผู้ทำแบบสอบถามมีความหลากหลายจึงได้มีการคำนวณค่าน้ำหนักของเมทริกซ์ของปัจจัยเสี่ยงสร้างขึ้นโดยค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric mean) โดยมีวิธีการคำนวณดังสมการที่ 1. เพื่อที่จะสามารถสร้างค่าน้ำหนักโดยรวมที่มีความเที่ยงตรงมากที่สุด จากข้อมูลที่เกิดขึ้นในแบบสอบถาม หลังจากการวิเคราะห์กระบวนการ

$$\text{ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต} = (X_1 x X_2 x X_3 x \dots x X_n)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

เมื่อนำข้อมูลของแต่ละปัจจัยเสี่ยงมาคำนวณค่าน้ำหนักโดยใช้วิธีการคำนวณจากสมการที่ 1 โดยมีการคำนวณผ่านโปรแกรม Microsoft Excel จะตารางวางค่าน้ำหนักเมทริกซ์ของปัจจัยเสี่ยงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2. เมทริกซ์ปัจจัยเสี่ยง

เกณฑ์	O	T	I	F	P	E
O	1	2	5	7	8	6
T	0.5	1	5	6	7	6
I	0.2	0.2	1	3	4	2
F	0.14	0.17	0.33	1	0.33	2
P	0.12	0.14	0.25	3	1	3
E	0.17	0.17	0.5	0.5	0.33	1

จากตารางที่ 2. เมทริกซ์ของปัจจัยความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในการขนส่งย้อนกลับในอุตสาหกรรมอีคอมเมิร์ซ เป็นเมทริกซ์ขนาด 6x6 และเมื่อคำนวณโดยใช้วิธี AHP ผลลัพธ์และน้ำหนักของความเสี่ยงดังในตารางที่ 3 โดยตัวอย่างการการคำนวณค่าน้ำหนักของปัจจัย O เป็นดังนี้

$$\text{ค่าผลรวมของ O} = 1 + 0.5 + 0.2 + 0.14 + 0.12 + 0.17 = 2.13$$

$$\text{ค่าน้ำหนักของปัจจัย O} = \frac{1}{2.13} = 0.469$$

ตารางที่ 3 ค่าน้ำหนักปัจจัยเสี่ยง

เกณฑ์	O	T	I	F	P	E	น้ำหนัก
O	0.469	0.543	0.414	0.341	0.387	0.300	0.409
T	0.235	0.272	0.414	0.293	0.339	0.300	0.309
I	0.094	0.054	0.083	0.146	0.194	0.100	0.112
F	0.066	0.046	0.027	0.049	0.016	0.100	0.051
P	0.056	0.038	0.021	0.146	0.048	0.150	0.077
E	0.080	0.046	0.041	0.024	0.016	0.050	0.043
ผลรวม	1	1	1	1	1	1	1

จากตารางที่ 3. เมื่อใช้ค่าค่าน้ำหนักในการคำนวณ $\lambda_{\max}$, CI, CR จะได้ค่าดังต่อไปนี้: $\lambda_{\max} = 6.617$, $CI = 0.123$, $CR = 0.010$ ค่าของ CR ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ซึ่งไม่เกิน 0.1 และสามารถจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยความเสี่ยงหลักในการขนส่งย้อนกลับในโลจิสติกส์ย้อนกลับของอีคอมเมิร์ซตามที่เกิดขึ้นในตารางที่ 4.

ตารางที่ 4 ลำดับน้ำหนักปัจจัยเสี่ยง

ลำดับ	ปัจจัยเสี่ยง	ค่าน้ำหนัก	ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก
1	ความเสี่ยงด้านการดำเนินงาน	0.409	41%
2	ความเสี่ยงด้านเทคโนโลยี	0.309	31%
3	ความเสี่ยงด้านข้อมูล	0.112	11%
4	ความเสี่ยงด้านนโยบาย	0.077	8%
5	ความเสี่ยงด้านการเงิน	0.057	5%
6	ความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อม	0.043	4%

จากตาราง 4. จัดลำดับความสำคัญของปัจจัยความเสี่ยงหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการขนส่งย้อนกลับในอุตสาหกรรมอีคอมเมิร์ซ ปัจจัยความเสี่ยงที่มีน้ำหนักสูงสุดคือความเสี่ยงด้านการดำเนินงาน ตามด้วยความเสี่ยงด้านเทคโนโลยี ความเสี่ยงด้านข้อมูล ความเสี่ยงด้านนโยบาย ความเสี่ยงด้านการเงิน และสุดท้ายปัจจัยที่มีน้ำหนักต่ำสุดคือความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อม

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุและวิเคราะห์ปัจจัยความเสี่ยงที่สำคัญในการขนส่งย้อนกลับซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการโลจิสติกส์ย้อนกลับในอุตสาหกรรมอีคอมเมิร์ซ โดยประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) เพื่อจัดโครงสร้างปัญหา ประเมิน และจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงตามความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ ทั้งนี้เพื่อสนับสนุนผู้บริหารในการกำหนดแนวทางบริหารความเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ การวิจัยดำเนินการโดยการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และเก็บข้อมูลผ่านแบบสอบถามจากผู้ปฏิบัติงานและผู้เชี่ยวชาญด้านการขนส่งย้อนกลับในอุตสาหกรรมอีคอมเมิร์ซ ผลการวิเคราะห์พบปัจจัยความเสี่ยงหลัก 6 ประเภท โดยเรียงลำดับความสำคัญดังนี้ 1. ความเสี่ยงด้านการดำเนินงาน (ร้อยละ 41) 2. ความเสี่ยงด้านเทคโนโลยี (ร้อยละ 31) 3. ความเสี่ยงด้านข้อมูล (ร้อยละ 11) 4. ความเสี่ยงด้านนโยบาย (ร้อยละ 8) 5. ความเสี่ยงด้านการเงิน (ร้อยละ 5) 6. ความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อม (ร้อยละ 4) จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าความเสี่ยงด้านการดำเนินงานและเทคโนโลยีเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบมากที่สุดต่อประสิทธิภาพของกระบวนการขนส่งย้อนกลับ ซึ่งสะท้อนถึงปัญหาความล่าช้า ความไม่เพียงพอของระบบ และข้อจำกัดด้านต้นทุนที่เกิดขึ้นจริงในภาคปฏิบัติ

งานวิจัยนี้มีส่วนสำคัญในการเพิ่มพูนองค์ความรู้ด้านการขนส่งย้อนกลับในระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับของอุตสาหกรรมอีคอมเมิร์ซ พร้อมนำเสนอแนวทางเชิงระบบและเชิงปริมาณในการประเมินและจัดลำดับความเสี่ยง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนบริหารความเสี่ยง ปรับปรุงกระบวนการโลจิสติกส์ และเสริมสร้างความยั่งยืนและประสิทธิภาพของระบบโลจิสติกส์ย้อนกลับในระยะยาว



คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโดยภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการคณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย



เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงพาณิชย์. (2569). การสำรวจมูลค่าพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย (Value of e-Commerce Survey in Thailand). <https://www.etda.or.th>
- Gupta, S., Kushwaha, P. S., Badhera, U., Chatterjee, P., & Gonzalez, E. D. S. (2023). Identification of benefits, challenges, and pathways in E-commerce industries: An integrated two-phase decision-making model. *Sustainable Operations and Computers*, 4, 200-218.
- Jomtong, P., & Pornsing, C. (2023). *A Novel Analytic Hierarchy Process Technique for Large and Fuzzy Criteria Decision Making Problems* (Doctoral dissertation, Silpakorn University).
- Kabo-Bah, J. B. W., & Bannor, R. K. (2025). E-commerce among grain traders and its impact on marketing. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, 4(1), 100090.
- Khoshnampour, M., & Nosrati, M. (2011). An overview of E-commerce. *World Applied Programming*, 1(2), 94-99.
- Kraugusteeliana, K., & Violin, V. (2024). Application of Decision Support in Performance Assessment of Delivery Services in the E-Commerce Industry. *Jurnal Galaksi*, 1(1), 53-61.
- Lorenzo-Espejo, A., Muñuzuri, J., Pegado-Bardayo, A., & Guadix, J. (2024). A framework for analyzing service disruptions in last-mile and first-mile reverse logistics. *Research in Transportation Economics*, 108, 101485.
- Naseem, M. H., Yang, J., & Xiang, Z. (2021). Prioritizing the solutions to reverse logistics barriers for the e-commerce industry in pakistan based on a fuzzy ahp-topsis approach. *Sustainability*, 13(22), 12743.
- Prayogo, D. H., Domanski, R., & Golinska-Dawson, P. (2024). The Key Factors for Improving Returns Management in E-Commerce in Indonesia from Customers' Perspectives—An Analytic Hierarchy Process Approach. *Sustainability*, 16(17), 7303.
- Sonar, H., Sarkar, B. D., Joshi, P., Ghag, N., Choubey, V., & Jagtap, S. (2024). Navigating barriers to reverse logistics adoption in circular economy: An integrated approach for sustainable development. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 12, 100165.
- Wadhawan, I. B., & Rizvi, M. M. (2024). Optimizing Inventory Management through Multiobjective Reverse Logistics with Environmental Impact. *arXiv preprint arXiv:2406.13226*.
- Yu, H., & Sun, X. (2024). Uncertain remanufacturing reverse logistics network design in industry 5.0: Opportunities and challenges of digitalization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108578.

การพัฒนาต้นแบบการตรวจวิเคราะห์การเคลื่อนไหวของตัวอสุจิด้วยเทคนิค ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์

PROTOTYPE DEVELOPMENT OF SPERM MOTILITY ANALYSIS USING QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE TECHNIQUE

นัทชนก ชัยกิตติพิพัทธ์¹, วชรี บุญลู², ศวิษฐ์ ณ สงขลา³ และระวีนันท์ มิ่งภักดิ์⁴

Natchanok Chaikittipat¹, Watcharee Boonlue², Sawit Na Songkhla³ and Raveenan Mingpakane⁴

บทคัดย่อ

ภาวะมีบุตรยากเป็นภาวะที่คู่สมรสมีเพศสัมพันธ์กันอย่างสม่ำเสมอ และไม่ได้คุมกำเนิดเป็นระยะเวลา 12 เดือนแล้วไม่สามารถตั้งครรภ์ได้ มีสาเหตุมาจากความบกพร่องของระบบสืบพันธุ์ฝ่ายชายหรือหญิง ผู้ชายมักไม่ทราบเพราะไม่มีอาการ จึงส่งผลให้อัตราเจริญพันธุ์รวมของประชากรไทยช่วง 10 ปีที่ผ่านมาลดลงอย่างต่อเนื่อง และกระทบต่อโครงสร้างประชากรกลุ่มวัยแรงงาน ปัจจุบันการประเมินภาวะมีบุตรยากของฝ่ายชายเป็นตรวจการเคลื่อนไหวของอสุจิด้วยวิธีมาตรฐานจากกล้องจุลทรรศน์มีข้อจำกัดคือ กล้องจุลทรรศน์มีขนาดใหญ่เคลื่อนย้ายไม่สะดวก ต้องอ่านผลด้วยตาเปล่า ทำให้ผลตรวจขึ้นอยู่กับความเชี่ยวชาญของผู้ปฏิบัติงาน งานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาระบบการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ชนิดควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM) โดยนำน้ำอสุจิที่เหลือจากการตรวจทางห้องปฏิบัติการแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ตัวอสุจิเคลื่อนไหวและไม่เคลื่อนไหว เพื่อนำมาทดสอบการเคลื่อนไหวด้วยเซนเซอร์ QCM และวิเคราะห์ผลด้วยหลักการ Principal Component Analysis (PCA) ซึ่งเซนเซอร์ QCM เป็นเทคโนโลยีสำหรับตรวจวัดสารทางชีวภาพโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ของแผ่นผลึกควอตซ์ เมื่อมีสิ่งที่ต้องการตรวจวัดมายึดเกาะบนผิวของผลึก

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ระดับโมเลกุลทางจุลชีววิทยาทางการแพทย์และวิทยาภูมิคุ้มกัน ภาควิชาเวชศาสตร์การธนาคารเลือดและจุลชีววิทยาคลินิก คณะสหเวชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย

Master of Science Program in Molecular Science of Medical Microbiology and Immunology, Department of Transfusion Medicine and Clinical Microbiology, Faculty of Allied Health Sciences, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

² ภาควิชาโภชนาการและการกำหนดอาหาร คณะสหเวชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย
Department of Nutrition and Dietetics, Faculty of Allied Health Sciences, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

³ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

⁴ ภาควิชาเวชศาสตร์การธนาคารเลือดและจุลชีววิทยาคลินิก คณะสหเวชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย

Department of Transfusion Medicine and Clinical Microbiology, Faculty of Allied Health Sciences, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand



ควอตซ์ โดยการยืดเกาะที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของแผ่นผลึกควอตซ์ลดลง ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์จากการยึดติดของสpermกับผิวเซนเซอร์นี้ พบว่าสามารถแยกสpermที่เคลื่อนไหวและไม่เคลื่อนไหวได้ และแสดงศักยภาพของเซนเซอร์ QCM ซึ่งใช้เครื่องมือขนาดกะทัดรัด และอาจช่วยลดต้นทุนการตรวจวิเคราะห์ในอนาคต

คำสำคัญ : คุณภาพน้ำอสุจิ, เทคนิคควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์, การเคลื่อนไหวของตัวอสุจิ

Abstract

Infertility is a condition defined by the inability of a couple to achieve pregnancy after more than 12 months of regular unprotected sexual intercourse, which is caused by defects in reproductive systems in either or both. Male infertility is not having clear symptoms, and the male may be having an infertility without realizing it. As a result, a continuous decline in Thailand's total fertility rates over the past 10 years, affected the demographic structure of the working-age population. Standard sperm motility assessment relies on large, operator-dependent microscopy. This research develops a prototype QCM-based system for sperm motility assessment. Semen samples remaining from fertility clinic laboratory analysis were classified into motile and immotile groups and tested using the QCM sensor, followed by data analysis using Principal Component Analysis (PCA). QCM is a biosensing technique that detects biological substances by measures their resonant frequency changes. When the measured substance attaches to the quartz plate, it makes the quartz plate vibrate at a lower resonant frequency. The detection of frequency changes can distinguish between motile and immotile sperm using a coated quartz sensor. The methods reduce costs and require no operator expertise, offering an alternative approach for developing a prototype for human sperm motility assessment in future applications.

Keyword : Semen analysis, Quartz crystal microbalance, Sperm motility

บทนำ

ปัจจุบันอัตราเจริญพันธุ์รวมของประชากรไทยลดลงอย่างต่อเนื่อง และต่ำกว่าระดับทดแทน (NESDC, 2022; สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ) อาจมีสาเหตุจากภาวะมีบุตรยากในคู่สมรสเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อประชากรวัยแรงงานลดลง เกิดการขาดแคลนทรัพยากรมนุษย์ เป็นปัญหาต่อการพัฒนาประเทศไทย จากข้อมูลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าภาวะมีบุตรยากมีสาเหตุจากฝ่ายชายประมาณครึ่งหนึ่งของกรณีทั้งหมด โดยสาเหตุหลักเกิดจากความผิดปกติของการหลั่งสperm ปั่นธุกรรม และการอุดตันของท่อในระบบสืบพันธุ์ เป็นผลให้การสร้างและคุณภาพของตัวอสุจิลดลง (Elussein, Magid, Omer, & Adam, 2008; Vander Borcht

& Wyns, 2018) การตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำอสุจิตามเกณฑ์ขององค์การอนามัยโลก (WHO) (Organization, 27 July 2021) อาศัยการตรวจนับอสุจิด้วยตาเปล่าภายใต้กล้องจุลทรรศน์ชนิด Phase contrast และใช้ความเชี่ยวชาญของผู้ปฏิบัติงาน ทำให้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนของผลการตรวจ โดยเฉพาะการประเมินการเคลื่อนไหวของตัวอสุจิ (Sperm motility) ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวชี้วัดภาวะเจริญพันธุ์เพศชาย เนื่องจากอสุจิต้องอาศัยความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านระบบสืบพันธุ์เพศหญิงเพื่อไปปฏิสนธิกับเซลล์ไข่ หากอสุจิมีการเคลื่อนไหวต่ำหรือไม่เคลื่อนไหว จะส่งผลให้โอกาสในการปฏิสนธิลดลง แม้ว่าจะมีการพัฒนาเครื่องวิเคราะห์น้ำอสุจิด้วยคอมพิวเตอร์ (Talarczyk-Desole et al., 2017) และเทคโนโลยี Artificial Intelligent (AI) (Agarwal, Panner Selvam, & Ambar, 2021) แต่เครื่องมือเหล่านี้ยังมีราคาสูง, มีขนาดใหญ่ และต้องปฏิบัติตามขั้นตอนอย่างเคร่งครัด งานวิจัยก่อนหน้านี้ในปี ค.ศ. 2007 Newton, M.I. และคณะ (M. Newton, Evans, Simons, & Hughes, 2007) ได้นำเทคนิคควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (Quartz Crystal Microbalance, QCM) มาใช้ตรวจวัดการเคลื่อนไหวของตัวอสุจิในสุกรด้วยการเปลี่ยนแปลงของความถี่ และความต้านทานไฟฟ้าจากการสั่นของแผ่นผลึกควอตซ์บนเซนเซอร์ที่เคลือบสาร Poly-L-lysine และในปี ค.ศ. 2009 Atherton, S. และคณะ (Atherton et al., 2009) เพิ่มการใช้เซนเซอร์ที่เคลือบสาร Cysteamine ซึ่งเซนเซอร์ QCM เป็นเทคโนโลยีของไบโอเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดสารทางชีวภาพ ซึ่งเซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีองค์ประกอบเป็นอิเล็กโทรดโลหะทั้ง 2 ข้างประกบด้านบนและล่างของแผ่นผลึกควอตซ์ (Quartz crystal) มีหลักการคือ ผลึกควอตซ์มีสมบัติที่เรียกว่าอินเวอร์สเพียโซอิเล็กทริก (Inverse Piezoelectric Effect) โดยเมื่อป้อนความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ผลึกควอตซ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Shear Deformation) ซึ่งจะทำให้ผลึกควอตซ์สั่นในแนวเฉือนตามความหนาด้วยค่าความถี่เฉพาะที่เรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency) โดยเมื่อมีสารมาสัมผัสบนพื้นผิวอิเล็กโทรดที่ประกบกับแผ่นผลึกควอตซ์ของเซนเซอร์ ทำให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์นี้เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์หรือความถี่ในการสั่นเชิงกลนี้สามารถแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ ดังนั้นหากมวลหรือความหนืดของสารบนเซนเซอร์เปลี่ยนไป ความถี่เรโซแนนซ์ในการสั่น รวมถึงความต้านทานไฟฟ้าของผลึกควอตซ์จะเปลี่ยนไป ทำให้ค่าที่วัดได้แตกต่างกัน สำหรับการประยุกต์ใช้กับน้ำอสุจิ ตัวอสุจิที่มีการเคลื่อนไหวแตกต่างกันจะสามารถยึดติดบนผิวเซนเซอร์ได้แตกต่างกัน ส่งผลให้ได้รูปแบบสัญญาณที่วัดได้แตกต่างกัน จึงสามารถนำมาใช้ประเมินการเคลื่อนไหวของอสุจิ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ของศักยภาพการเจริญพันธุ์เพศชายได้

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีตรวจวิเคราะห์การเคลื่อนไหวของตัวอสุจิมนุษย์ด้วยเซนเซอร์ชนิด QCM โดยใช้ผลการตรวจมาตรฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์เป็นค่าอ้างอิงในการจำแนกกลุ่มตัวอย่าง เพื่อประเมินศักยภาพของเทคนิคดังกล่าวในการเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการตรวจการเคลื่อนไหวของตัวอสุจิในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือและอุปกรณ์

ประกอบด้วย ตู้ปลอดเชื้อ ตู้เย็น กล้องจุลทรรศน์ชนิด phase contrast เครื่องชั่งดิจิตอล คอมพิวเตอร์พกพา เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer; VNA รุ่น DG8SAQ VNWA 3) เซนเซอร์ QCM ชนิดความถี่ 12.1 MHz รวมถึงอุปกรณ์พื้นฐานในห้องปฏิบัติการ เช่น Micropipettes, Tips, Microtubes, หลอดทดลอง และอุปกรณ์นับตัวเซลล์ Neubauer hemocytometer

น้ำยาและสารเคมี

น้ำ DI water (deionized water), phosphate-buffered saline (PBS), poly-D-lysine (Scientific, USA) ความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (mg/mL), Cysteamine (Sigma-Aldrich, USA) ความเข้มข้น 1 mmol ใน toluene และ 95% ethanol

วิธีการทดลอง

- 1) นำเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์แบบพกพา (VNA) ที่มีความถี่แบนด์วิดท์ 1.3 กิกะเฮิรตซ์ (Gigahertz, GHz) ต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์พกพา (Na Songkhla & Nakamoto, 2021; Songkhla & Nakamoto, 2019) และเซนเซอร์ QCM ชนิด 12.1 MHz ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยรูปที่ 1A ฝั่งซ้ายเป็นแผนภาพการทดลองวาดเอง และรูปที่ 1B ฝั่งขวาเป็นภาพถ่ายการทดลองจริง
- 2) เปิดโปรแกรม DG8SAQ VNWA 3 ให้ทำงานเพื่อเริ่มจ่ายสัญญาณความถี่ไปยังเซนเซอร์ แล้วเปิดโปรแกรม MATLAB และใช้โค้ดโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อบันทึกผล และประมวลผลข้อมูลสัญญาณค่าความถี่เรโซแนนซ์ และค่าความต้านทานสมมูลของเซนเซอร์ QCM
- 3) น้ำอสุจิที่นำมาทดสอบเป็นตัวอย่างไม่เหลือจากการตรวจคุณภาพน้ำอสุจิของผู้เข้ารับบริการที่บริษัท เจเนซิส เพอร์ฟิเล็คซี เซ็นเตอร์ จำกัด (มหาชน) โดยไม่ระบุชื่อเจ้าของตัวอย่าง และผ่านการรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในคน กลุ่มสหสถาบันชุดที่ 1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีเกณฑ์คัดเลือกดังนี้

3.1) เกณฑ์คัดเข้า

- 3.1.1) น้ำอสุจิของผู้เข้ารับบริการเพศชายที่ให้ตัวอย่างเพื่อตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำอสุจิ โดยไม่จำกัดอายุ
- 3.1.2) น้ำอสุจิละลายตัวจากกึ่งของแข็งกึ่งของเหลวเป็นของเหลวภายในเวลา 60 นาที
- 3.1.3) มีผลการทดสอบความหนืดของน้ำอสุจิด้วยการใช้ปิเปตหยดน้ำอสุจิอย่างต่อเนื่องให้มีความยาวต่อกันไม่เกิน 2 เซนติเมตร
- 3.1.4) มีจำนวนตัวอสุจิทั้งหมดตั้งแต่ 1 ล้านตัว/มิลลิลิตรขึ้นไป และมีตัวอสุจิที่เคลื่อนไหวได้ตั้งแต่ร้อยละ 1 ขึ้นไป เพื่อให้มีจำนวนตัวอสุจิเพียงพอสำหรับการทดสอบด้วยเซนเซอร์

3.2) เกณฑ์คัดออก

- 3.2.1) น้ำอสุจิที่เก็บมานานเกิน 3 ชั่วโมง เนื่องจากทำให้ตัวอสุจิที่เคลื่อนไหวได้น้อยกว่าค่าจริงของตัวอสุจิที่ตรวจวัดได้
- 3.2.2) น้ำอสุจิที่มีเม็ดเลือดขาว, เม็ดเลือดแดง, แบคทีเรีย หรือเชื้อราปนเปื้อน

- จากนั้นนำมาตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำอสุจิด้วยวิธีมาตรฐานจากกล้องจุลทรรศน์ตามเกณฑ์องค์การอนามัยโลก (WHO) เพื่อประเมินจำนวนตัวอสุจิในน้ำอสุจิ (Sperm concentration) และการเคลื่อนไหวของตัวอสุจิ (Sperm motility) โดยใช้ผลจากกล้องจุลทรรศน์เป็นวิธีอ้างอิงมาตรฐาน (Reference method) สำหรับจำแนกตัวอย่างเป็นกลุ่มที่ตัวอสุจิที่เคลื่อนไหว (Motile) และไม่เคลื่อนไหว (Immotile) ซึ่งกลุ่มไม่เคลื่อนไหวเตรียมโดยการให้ความร้อนตามวิธีของ (Chao et al., 2012)
- 4) ตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่มถูกนำมาทดสอบด้วยเซนเซอร์ QCM จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ เซนเซอร์ไม่เคลือบสาร, เซนเซอร์เคลือบ Poly-D-lysine และเซนเซอร์เคลือบ Cysteamine เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการจำแนกกลุ่มตัวอย่าง แต่ละเงื่อนไขทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง โดยรายละเอียดจำนวนตัวอย่าง และจำนวนการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1
 - 5) เซนเซอร์ที่เคลือบด้วย Poly-D-lysine ใช้สารละลายความเข้มข้น 0.1 mg/mL (Sanchez-Martos et al., 2021) และเซนเซอร์ที่เคลือบด้วย Cysteamine ใช้สารละลายความเข้มข้น 1 mM ในสารละลาย Toluene (Gruppen et al., 1995)
 - 6) หยดน้ำอสุจิที่ต้องการทดสอบปริมาตร 20 ไมโครลิตร (ul) ลงบนเซนเซอร์แผ่นผลึกควอตซ์ ณ เวลาวินาทีที่ 100 จากนั้นบันทึกสัญญาณต่อเนื่องเป็นเวลา 10 นาที โดยใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับรับและบันทึกข้อมูล แต่ละกลุ่มทำการทดสอบซ้ำชนิดละ 3 ครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 1 และบันทึกสัญญาณในรูปแบบไฟล์ Excel
 - 7) นำข้อมูลสัญญาณความถี่เรโซแนนซ์กับความต้านทานสมมูลที่ได้จากการทดสอบมาประมวลผลด้วยโปรแกรมบนซอฟต์แวร์ MATLAB โดยกำหนดค่าอ้างอิงเริ่มต้นก่อนหยดตัวอย่างเป็น 0 ซึ่งได้ตัวอย่างกราฟสัญญาณแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นข้อมูลจากชุดการทดสอบของเซนเซอร์ไม่เคลือบสารในกลุ่มตัวอสุจิที่เคลื่อนไหว และไม่เคลื่อนไหวอย่างละ 1 ตัวอย่าง (ทดสอบซ้ำกลุ่มละ 3 ครั้ง) เพื่อแสดงรูปแบบสัญญาณเบื้องต้นสำหรับประเมินความสามารถของเซนเซอร์ QCM ในการตรวจวัดการเคลื่อนไหวของตัวอสุจิ
 - 8) หลังจากทดสอบข้อ 7 แล้วพบว่าเซนเซอร์ QCM สามารถตรวจวัดการเคลื่อนไหวของตัวอสุจิได้ จึงนำข้อมูลสัญญาณทั้งหมด คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่, การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน, เวลาที่ค่าความถี่ลดลง และเวลาที่ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น มาวิเคราะห์ด้วย Principal Component Analysis (PCA) บนโปรแกรม MATLAB เพื่อจำแนกกลุ่มของตัวอสุจิที่เคลื่อนไหว และไม่เคลื่อนไหว

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการทดสอบการเคลื่อนไหวของตัวอสุจิด้วยเซนเซอร์ QCM ของน้ำอสุจิ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ตัวอสุจิเคลื่อนไหว และไม่เคลื่อนไหว พบว่าหลังหยดตัวอย่างบนเซนเซอร์ที่เวลา 100 วินาที พบว่ากราฟสัญญาณค่าความถี่เรโซแนนซ์มีแนวโน้มลดลง (กราฟสีน้ำเงิน) ขณะที่ค่าความต้านทานสมมูลเพิ่มขึ้น (กราฟสีส้ม) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยกราฟ Sample 1,2,3 แทนตัวอย่างกลุ่มเคลื่อนไหว และกราฟ Sample 1,2,3 im แทนกลุ่มไม่เคลื่อนไหว เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ 3 ชนิด คือ เซนเซอร์ไม่เคลือบสาร, เซนเซอร์เคลือบ Poly-D-lysine และเซนเซอร์เคลือบ Cysteamine ตามงานวิจัยของ Atherton, S. (Atherton et al., 2009)

และ Newton, M.I. (M. I. Newton et al., 2010) แล้วนำสัญญาณที่วัดได้ในรูปแบบตัวแปร 4 ค่า ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงความถี่, การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน, เวลาที่ค่าความถี่ลดลง และเวลาที่ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น มาวิเคราะห์ด้วยหลักการ Principal Component Analysis (PCA) (Corradi et al., 2020; Shlens, 2014) การวิเคราะห์ PCA ดำเนินการด้วยโปรแกรม MATLAB โดยคำนวณค่าน้ำหนักของตัวแปรทั้ง 4 ค่า (Loadings) เพื่อแสดงระดับอิทธิพลของแต่ละตัวแปรต่อแกนองค์ประกอบหลัก และคำนวณค่าพิคตของตัวอย่างแต่ละตัวอย่างบนแกนองค์ประกอบหลัก (Scores) เพื่อใช้แสดงการกระจายตัวของข้อมูลในกราฟ โดยเลือกพิจารณาแกน PC1 และ PC2 จากองค์ประกอบหลักที่มีค่าความแปรปรวนที่อธิบายข้อมูลได้สูงที่สุด เนื่องจากทั้งสองแกนสามารถสะท้อนความแตกต่างหลักของข้อมูลได้มากกว่าแกนอื่น แสดงให้เห็นว่าทั้งตัวแปรค่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณและทั้งตัวแปรเชิงเวลา มีบทบาทร่วมกันในการจำแนกกลุ่มตัวอย่างแล้วนำเสนอผลในรูปของกราฟดังนี้

1) เซนเซอร์ที่ไม่เคลือบสาร พบว่ากราฟสีน้ำเงินของกลุ่มตัวอย่างเคลื่อนไหวซ้อนทับกับกราฟสีส้มของกลุ่มตัวอย่างที่ไม่เคลื่อนไหว จึงไม่สามารถจำแนกน้ำอสุจิทั้ง 2 กลุ่มนี้ออกจากกันได้ ดังรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์ที่ไม่เคลือบสารไม่มีความจำเพาะในการยึดติดของตัวอสุจิ

2) เซนเซอร์ที่เคลือบสาร Poly-D-lysine และ Cysteamine พบว่ากราฟของน้ำอสุจิทั้ง 2 กลุ่มแยกออกจากกันได้ชัดเจน จึงสามารถจำแนกของน้ำอสุจิ 2 กลุ่มนี้ ดังรูปที่ 4 และ 5 แสดงให้เห็นว่าสารเคลือบช่วยเพิ่มการยึดติดและลดสัญญาณรบกวน โดยเฉพาะเซนเซอร์ที่เคลือบด้วย Poly-D-lysine เป็นพอลิเมอร์ที่มีประจุบวกมากกว่า Cysteamine คาดว่าทำให้ตัวอสุจิที่ผิวเป็นประจุลบสามารถยึดติดกับเซนเซอร์ได้ดีกว่า ดังนั้นสาร Poly-D-lysine เป็นสารเคลือบเซนเซอร์ที่มีแนวโน้มเหมาะสมกว่า และมีศักยภาพในการจำแนกกลุ่มตัวอย่างได้ดีกว่า

ผลการวิเคราะห์ด้วย PCA ของเซนเซอร์ที่เคลือบสาร Poly-D-lysine ดังรูปที่ 3 โดยค่าน้ำหนัก (weights) ของแกนหลัก (PC1) ขึ้นกับเวลาที่ค่าความถี่ลดลงมากที่สุด ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการจำแนกกลุ่มข้อมูล และผลรองลงมาขึ้นกับเวลาที่ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น จากรูปกลุ่มข้อมูลของกลุ่มที่ตัวอสุจิมีและไม่มี การเคลื่อนไหวแยกออกจากกันได้ด้วยแกน PC1 แสดงให้เห็นว่าค่าเวลาที่ค่าความถี่ลดลงร่วมกับเวลาที่ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นใช้จำแนกกลุ่มที่ตัวอสุจิมีและไม่มี การเคลื่อนไหวได้ ถัดมาแกนรอง (PC2) พบว่าค่าน้ำหนักของแกนขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความถี่และเวลาที่ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น โดยค่าน้ำหนักของทั้งสองตัวแปรมีผลใกล้เคียงกันแต่ทิศทางตรงกันข้าม จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของการเปลี่ยนแปลงเวลาเมื่อค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มสูงกว่า ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงศักยภาพในการแยกแยะที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามควรยืนยันผลด้วยจำนวนตัวอย่างที่มากขึ้น

กรณีถัดมาเซนเซอร์ที่เคลือบสาร Cysteamine ผลการวิเคราะห์ด้วย PCA ดังรูปที่ 4 พบว่าแกน PC1 ขึ้นกับค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่และความต้านทานมากใกล้เคียงกัน แต่พบว่าจุดข้อมูลของทั้ง 2 กลุ่ม (กลุ่มตัวอสุจิมีและไม่มี การเคลื่อนไหว) ยังมีการทับซ้อนกันบนแกน PC1 แสดงให้เห็นว่าการพิจารณาเฉพาะแกน PC1 ยังไม่เพียงพอ ถัดมาแกน PC2 ค่าน้ำหนักขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความถี่และเวลาที่ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นมากใกล้เคียงกัน แต่ผลของเวลาที่ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นมีผลในทิศทางตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงความถี่ (ค่าน้ำหนักของค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นมีค่าติดลบ) โดยแกน PC2 นี้สามารถจำแนกกลุ่มที่ตัวอสุจิมี

และไม่มีการเคลื่อนไหวได้ คล้ายกับกรณีของ Poly-D-lysine และในชุดข้อมูลนี้พบว่า SNR ของเวลาที่ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มสูงกว่ากรณีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ ซึ่งอาจสะท้อนว่าตัวแปรเวลาที่ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นมีศักยภาพในการช่วยจำแนกกลุ่มตัวอย่าง

จากผลดังกล่าวสรุปได้ว่าการเพิ่มความจำเพาะการยึดติดของตัวอสุจิบนเซนเซอร์สามารถช่วยลดปัญหาสัญญาณรบกวน จึงทำให้ระบบการตรวจวัดมีความถูกต้อง และเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น แม้ว่าสาร Poly-D-lysine และ Cysteamine ให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกัน แต่สาร Poly-D-lysine สามารถแยกความแตกต่างของข้อมูลได้ทั้งตามแกน PC1 และแกน PC2 ในขณะที่สาร Cysteamine สามารถแยกความแตกต่างได้เฉพาะตามแกน PC2 เท่านั้น ดังนั้นสาร Poly-D-lysine มีแนวโน้มเหมาะสมกว่าสำหรับใช้ในการทดสอบวิเคราะห์คุณภาพน้ำอสุจิ

เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานตามเกณฑ์ WHO สำหรับตรวจนับจำนวนอสุจิด้วยตาเปล่าภายใต้กล้องจุลทรรศน์ชนิด Phase contrast (WHO, 2021) ซึ่งประเมินได้หลายพารามิเตอร์ ได้แก่ ปริมาตรน้ำอสุจิ, จำนวนของตัวอสุจิ (ความเข้มข้น), การเคลื่อนไหวของตัวอสุจิ และรูปร่างของตัวอสุจิ วิธีดังกล่าวมีข้อจำกัดคือ ผลตรวจขึ้นอยู่กับผู้ปฏิบัติงาน, กล้องจุลทรรศน์มีขนาดใหญ่พกพาไม่สะดวก และราคาค่อนข้างสูง งานวิจัยนี้จึงนำเซนเซอร์ QCM (Chen, Penn, & Xi, 2018) มาใช้เป็นทางเลือกในการตรวจวิเคราะห์ โดยระยะเริ่มต้นมุ่งเน้นการจำแนกตัวอย่างน้ำอสุจิที่มีและไม่มีการเคลื่อนไหวได้จากรูปแบบสัญญาณความถี่และความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีข้อได้เปรียบด้านความเรียบง่ายของระบบ, ใช้อุปกรณ์ขนาดกะทัดรัด และอาจมีต้นทุนต่ำกว่าระบบ Computer-assisted sperm analysis (CASA) และเทคโนโลยี AI โดยเซนเซอร์ QCM ในงานวิจัยนี้ออกแบบเพื่อประเมินการเคลื่อนไหวของตัวอสุจิเป็นหลัก ส่วนพารามิเตอร์อื่น เช่น ปริมาตรน้ำอสุจิ ซึ่งโดยปกติวัดด้วยอุปกรณ์วัดปริมาตรโดยตรง ทำให้ยังคงต้องอาศัยวิธีตรวจอื่นร่วมด้วย อย่างไรก็ตามข้อมูลจากเซนเซอร์ QCM ในงานวิจัยนี้ยังอยู่ในลักษณะการจำแนกเชิงคุณภาพ (Qualitative classification) คือใช้แยกกลุ่มตัวอย่างตามการเคลื่อนไหวของตัวอสุจิ แต่ยังไม่สามารถรายงานค่าเชิงปริมาณ เช่น ปริมาตรน้ำอสุจิ, จำนวนของตัวอสุจิ (ความเข้มข้น), ร้อยละการเคลื่อนไหวของตัวอสุจิ และรูปร่างของตัวอสุจิได้โดยตรง ซึ่งในอนาคตสามารถพัฒนาต่อไปสู่การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis) ได้ โดยเพิ่มจำนวนตัวอย่างให้มากขึ้น, จำแนกกลุ่มตัวอย่างให้หลากหลายครอบคลุมทั้งการเคลื่อนไหวของตัวอสุจิ หรือจำนวนตัวอสุจิ, วิเคราะห์ผลด้วยหลักการของสถิติอื่นที่จำแนกกลุ่มได้ชัดเจนมากขึ้น และทดสอบหาแบบจำลองทางสถิติสำหรับทำนายค่าร้อยละการเคลื่อนไหวของอสุจิ หรือจำนวนของตัวอสุจิให้ใกล้เคียงวิธีมาตรฐานมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามต้นแบบนี้ยังต้องมีการประเมินด้านต้นทุน, ความแม่นยำ และความสามารถในการใช้งานจริงเพิ่มเติมก่อนนำไปประยุกต์ใช้เชิงคลินิก

สรุป

งานวิจัยนี้พัฒนาต้นแบบการตรวจวิเคราะห์การเคลื่อนไหวของตัวอสุจิจากมนุษย์ด้วยเซนเซอร์ QCM โดยอาศัยการประมวลผลสัญญาณจากการเปลี่ยนแปลงความถี่, การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน, เวลาที่ค่าความถี่ลดลง และเวลาที่ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น แล้ววิเคราะห์ผลด้วย PCA จากการทดลองเปรียบเทียบเซนเซอร์ 3 ชนิด พบว่าเซนเซอร์ที่ไม่เคลือบสารไม่สามารถจำแนกกลุ่มตัวอสุจิที่เคลื่อนไหวและไม่เคลื่อนไหวออก



จากกันได้ ในขณะที่เซนเซอร์ที่เคลือบสาร Poly-D-lysine และ Cysteamine สามารถจำแนกน้ำอสุจิทั้ง 2 กลุ่มออกจากกันได้ โดยเซนเซอร์ที่เคลือบสาร Poly-D-lysine สามารถแยกความแตกต่างของข้อมูลได้ทั้งตามแกน PC1 และแกน PC2 ส่วนเซนเซอร์ที่เคลือบสาร Cysteamine สามารถแยกความแตกต่างได้เฉพาะตามแกน PC2 นอกจากนี้เซนเซอร์ที่เคลือบสาร Poly-D-lysine ให้ผลการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ชัดเจนกว่า และมีความแปรปรวนน้อยกว่า แสดงถึงความเสถียรของสัญญาณที่ดีกว่า จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์ QCM ที่เคลือบสาร Poly-D-lysine มีศักยภาพในการพัฒนาเป็นต้นแบบสำหรับการตรวจวิเคราะห์การเคลื่อนไหวของตัวอสุจิในมนุษย์ที่มีความถูกต้อง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในอนาคต



เอกสารอ้างอิง

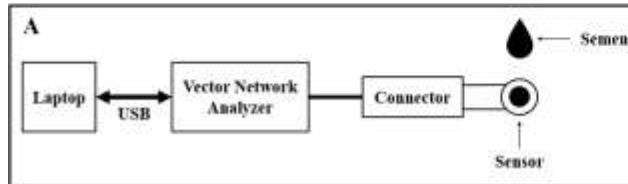
- สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. ข้อมูลตัวชี้วัดสังคม (สถิติด้านประชากร). Retrieved from <https://www.nesdc.go.th/main.php?filename=PageSocial>
- Agarwal, A., Panner Selvam, M. K., & Ambar, R. F. (2021). Validation of LensHooke® X1 PRO and Computer-assisted semen analyzer compared with laboratory-based manual semen analysis. *World J Mens Health*, 39(3), 496-505. doi:10.5534/wjmh.200185
- Atherton, S., R. Evans, C., Roach, P., C. Hughes, D., McHale, G., & I. Newton, M. (2009). Investigation of operating parameters for a semen quality analysis system. *Proceedings of the International Conference on Biomedical Electronics and Devices (BIOSTEC 2009) - BIODEVICES*. doi:10.5220/0001429600130016
- Chao, S. B., Guo, L., Ou, X. H., Luo, S. M., Wang, Z. B., Schatten, H., . . . Sun, Q. Y. (2012). Heated spermatozoa: effects on embryonic development and epigenetics. *Hum Reprod*, 27(4), 1016-1024. doi:10.1093/humrep/des005
- Chen, J. Y., Penn, L. S., & Xi, J. (2018). Quartz crystal microbalance: Sensing cell-substrate adhesion and beyond. *Biosensors and Bioelectronics*, 99, 593-602. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.08.032>
- Corradi, E., Agostini, M., Greco, G., Massidda, D., Santi, M., Calderisi, M., . . . Cecchini, M. (2020). An objective, principal-component-analysis (PCA) based, method which improves the quartz-crystal-microbalance (QCM) sensing performance. *Sensors and Actuators A: Physical*, 315, 112323. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112323>
- Elusseini, E. A., Magid, Y. M., Omer, M. M., & Adam, I. (2008). Clinical patterns and major causes of infertility among Sudanese couples. *Tropical Doctor*, 38(4), 243-244. doi:10.1258/td.2007.070125
- Gruppen, C. G., Nagashima, H., & Nottle, M. B. (1995). Cysteamine enhances in vitro development of porcine oocytes Matured and fertilized in vitro. *Biology of Reproduction*, 53(1), 173-178. doi:10.1095/biolreprod53.1.173
- Na Songkhla, S., & Nakamoto, T. (2021). Interpretation of Quartz Crystal Microbalance Behavior with Viscous Film Using a Mason Equivalent Circuit. *Chemosensors*, 9(1). doi:10.3390/chemosensors9010009
- NESDC. (2022). Population Development Plan for National Long-Term Development, 2022–2037 (แผนพัฒนาประชากรเพื่อการพัฒนาประเทศระยะยาว พ.ศ. 2565-2580) [in Thai].



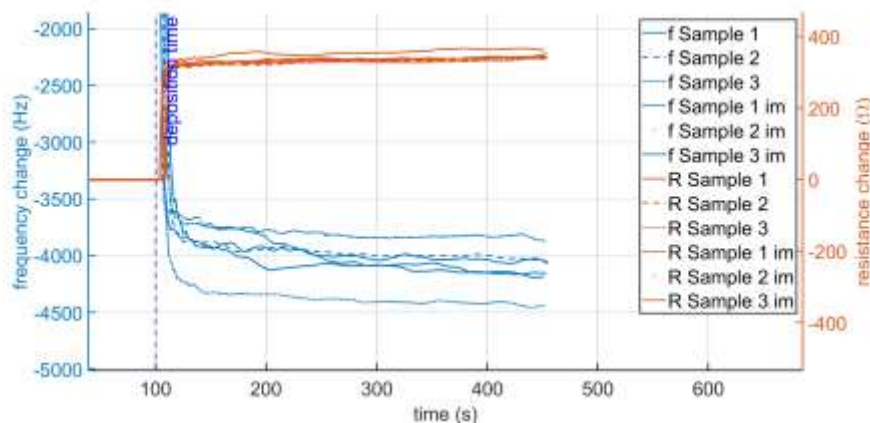
- Newton, M., Evans, C., Simons, J., & Hughes, D. (2007). Semen quality detection using time of flight and acoustic wave sensors. *Applied Physics Letters*, 90, 154103-154103. doi:10.1063/1.2721858
- Newton, M. I., Atherton, S., Morris, R. H., Stanley, S. M., Evans, C. R., Hughes, D. C., & McHale, G. (2010). Low-cost QCM sensor system for screening semen samples. *Journal of Sensors*, 2010, 326365. doi:10.1155/2010/326365
- Organization, W. H. (27 July 2021). WHO laboratory manual for the examination and processing of human semen. Retrieved from <https://www.who.int/publications/i/item/9789240030787>
- Sanchez-Martos, M., Martinez-Navarrete, G., Bernabeu-Zornoza, A., Humphreys, L., & Fernandez, E. (2021). Evaluation and Optimization of Poly-d-Lysine as a Non-Natural Cationic Polypeptide for Gene Transfer in Neuroblastoma Cells. *Nanomaterials*, 11(7). doi:10.3390/nano11071756
- Scientific, T. F. Gibco Poly-D-Lysine. Retrieved from <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/BID/Flyers/gibco-poly-d-lysine-flyer.pdf>
- Shlens, J. (2014). A tutorial on principal component analysis. *arXiv e-prints*, arXiv:1404.1100. doi:10.48550/arXiv.1404.1100
- Sigma-Aldrich, M. Cysteamine. Retrieved from <https://www.sigmaaldrich.com/TH/en/product/sigma/30070>
- Songkhla, S. N., & Nakamoto, T. (2019). Signal Processing of Vector Network Analyzer Measurement for Quartz Crystal Microbalance With Viscous Damping. *IEEE Sensors Journal*, 19(22), 10386-10392. doi:10.1109/JSEN.2019.2930733
- Talarczyk-Desole, J., Berger, A., Taszarek-Hauke, G., Hauke, J., Pawelczyk, L., & Jedrzejczak, P. (2017). Manual vs. computer-assisted sperm analysis: can CASA replace manual assessment of human semen in clinical practice? *Ginekologia Polska*, 88(2), 56-60. doi:10.1016/j.ginekpol.2017.03.012
- Vander Borgh, M., & Wyns, C. (2018). Fertility and infertility: Definition and epidemiology. *Clinical Biochemistry*, 62, 2-10. doi:10.1016/j.clinbiochem.2018.03.012

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนการทดสอบน้ำอสุจิกับเซนเซอร์

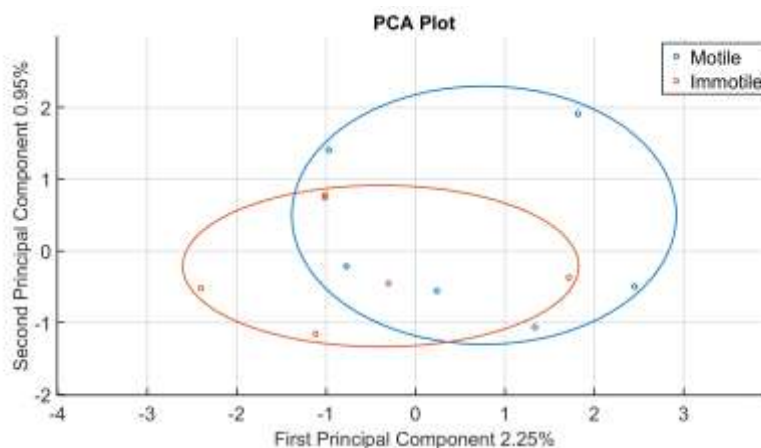
ชนิดของเซนเซอร์	น้ำอสุจิที่ตัวอสุจิเคลื่อนไหว	น้ำอสุจิที่ตัวอสุจิไม่เคลื่อนไหว
เซนเซอร์ไม่เคลือบสาร	2 ตัวอย่าง (3 ครั้ง)	2 ตัวอย่าง (3 ครั้ง)
เซนเซอร์เคลือบสาร Poly-D-lysine	2 ตัวอย่าง (3 ครั้ง)	2 ตัวอย่าง (3 ครั้ง)
เซนเซอร์เคลือบสาร Cysteamine	1 ตัวอย่าง (3 ครั้ง)	1 ตัวอย่าง (3 ครั้ง)



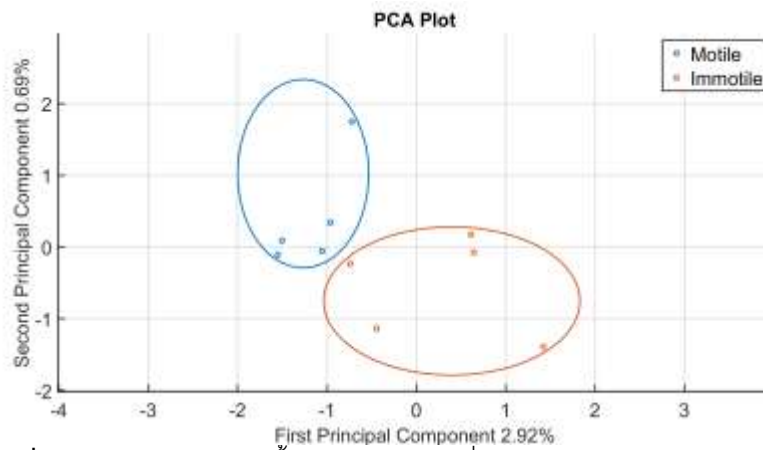
รูปที่ 1 แสดงแผนผังการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์เทคนิคควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (A) แผนภาพจำลองของอุปกรณ์ทดสอบ (B) ภาพถ่ายอุปกรณ์การทดลองจริง



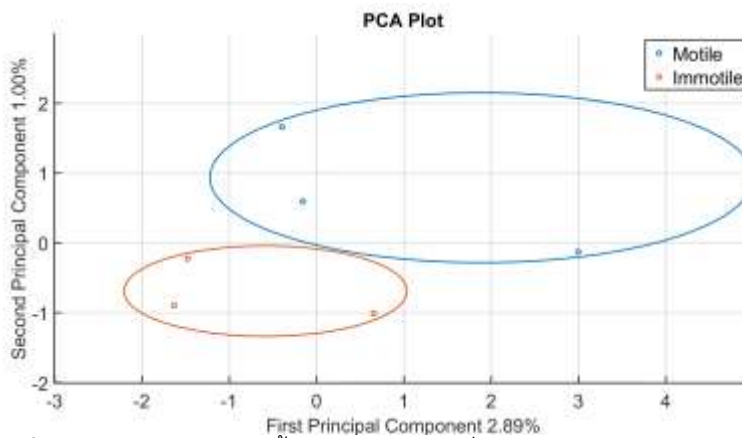
รูปที่ 2 แสดงกราฟค่าความถี่เรโซแนนซ์ (กราฟสีน้ำเงิน) และค่าความต้านทานสมมูล (กราฟสีส้ม) จากการทดสอบน้ำสุจิด้วยเซนเซอร์ QCM ชนิดไม่เคลือบสาร โดย Sample 1-3 แทนกลุ่มตัวอสุจิเคลื่อนไหว และ Sample 1-3 im แทนกลุ่มตัวอสุจิไม่เคลื่อนไหว



รูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบน้ำสุจิกับเซนเซอร์ที่ไม่เคลือบสาร



รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบน้ำอสุจิกับเซนเซอร์ที่เคลือบสาร Poly-D-lysine



รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบน้ำอสุจิกับเซนเซอร์ที่เคลือบสาร Cysteamine



การประเมินความเสี่ยงด้านความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการวิจัยพื้นฐานทางทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

Risk Assessment of Safety in a Basic Dental Research Laboratory at the University of Phayao

ปภาอร เขียวสีมา¹

Paphaon Kheawseema¹

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินระดับความเสี่ยง ระบุประเด็นความเสี่ยงสำคัญ และจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงจากกิจกรรมในห้องปฏิบัติการวิจัยพื้นฐานทางทันตแพทยศาสตร์มหาวิทยาลัยพะเยา โดยใช้ Risk Assessment Matrix ร่วมกับการสังเกตการปฏิบัติงานจริง เก็บรวบรวมข้อมูลด้วยแบบตรวจสอบความปลอดภัยและแบบบันทึกการสังเกตพฤติกรรมการทำงาน

จากนั้นประเมินความเสี่ยงจากโอกาสการเกิดเหตุและความรุนแรงของผลกระทบ โดยกำหนดเกณฑ์การให้คะแนนไว้ล่วงหน้า ใช้เกณฑ์เดียวกันทุกกิจกรรม และบันทึกเหตุผลการประกอบกรให้คะแนน ผลการศึกษาพบว่า กิจกรรมส่วนใหญ่มีความเสี่ยงระดับต่ำ จำนวน 10 กิจกรรม คิดเป็นร้อยละ 83.33 ขณะที่ 2 กิจกรรมมีความเสี่ยงระดับปานกลาง คิดเป็นร้อยละ 16.67 ได้แก่ การใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล และการปฏิบัติงานทั่วไป โดยมีคะแนนความเสี่ยงเท่ากับ 12 จาก 25 คะแนน ซึ่งเป็นคะแนนสูงที่สุดในการศึกษา เมื่อวิเคราะห์ร่วมกับบริบทการปฏิบัติงานจริง พบว่าความเสี่ยงสำคัญเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการใช้ PPE ที่ไม่สม่ำเสมอ การปฏิบัติตามขั้นตอนความปลอดภัย และการจัดการพื้นที่ปฏิบัติงาน นอกจากนี้ การจัดเก็บสารเคมีแม้มีคะแนนความเสี่ยงรวมอยู่ในระดับต่ำ แต่มีค่าความรุนแรงของผลกระทบสูง จึงควรจัดเป็นประเด็นเฝ้าระวัง

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้ Risk Assessment Matrix ในบริบทพื้นที่จริงสามารถช่วยจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงและสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อปรับปรุงความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ โดยควรมุ่งเน้นการติดตามการใช้ PPE การทบทวนการจัดเก็บสารเคมี และการส่งเสริมพฤติกรรมความปลอดภัยอย่างต่อเนื่อง

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ความเสี่ยง, ความปลอดภัยห้องปฏิบัติการ, Risk Assessment Matrix, พฤติกรรมความปลอดภัย

¹ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา

¹ School of Dentistry, University of Phayao, Phayao

*Corresponding Author: E-mail: paphaon.kh@up.ac.th, Tel. 0820325565



Abstract

This study aimed to assess risk levels, identify key risk issues, and prioritize risks associated with activities in a basic dental research laboratory at the University of Phayao using a Risk Assessment Matrix combined with direct observation of actual laboratory practices. Data were collected using a safety checklist and an observation record form for laboratory work practices.

Risk levels were then assessed based on the likelihood of occurrence and the severity of consequences. Scoring criteria were predetermined, consistently applied to all activities, and supported by written justifications for each score. The results showed that most activities were classified as low risk, comprising 10 activities or 83.33%, whereas 2 activities, or 16.67%, were classified as moderate risk. These activities were the use of personal protective equipment and general laboratory practices, each with a risk score of 12 out of 25, representing the highest score found in this study. When analyzed in relation to the actual work context, the key risk issues were associated with inconsistent PPE use, noncompliance with safety procedures, and workplace organization. In addition, although chemical storage had a low overall risk score, it had a high severity score and should therefore be considered an issue requiring ongoing monitoring.

The findings indicate that applying a Risk Assessment Matrix in a real-world laboratory context can help prioritize risks and support decision-making for improving laboratory safety. Safety improvement should focus on monitoring PPE use, reviewing chemical storage practices, and continuously promoting safe work behaviors.

Keywords: Risk analysis, Laboratory safety, Risk Assessment Matrix, Safety behavior

บทนำ

ห้องปฏิบัติการทางทันตแพทยศาสตร์เป็นพื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีอันตราย วัสดุชีวภาพ และอุปกรณ์เฉพาะทางที่มีความซับซ้อน ซึ่งอาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุหรือผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน หากขาด การจัดการความปลอดภัยที่เหมาะสม โดยเฉพาะในงานวิจัยพื้นฐานที่มีขั้นตอนหลากหลาย การประเมินความเสี่ยงจึงเป็นกลไกสำคัญในการระบุอันตรายและกำหนดมาตรการควบคุม (National Research Council, 2011)

ปัจจุบันมีการนำแนวทางการประเมินความเสี่ยง เช่น Risk Assessment Matrix มาใช้ในการพิจารณาโอกาสการเกิดเหตุและความรุนแรงของผลกระทบ เพื่อจัดระดับความเสี่ยงและกำหนดมาตรการควบคุมที่เหมาะสมกับบริบทของห้องปฏิบัติการ(โครงการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยห้องปฏิบัติการวิจัยใน



ประเทศไทย, 2557; International Organization for Standardization, 2018; World Health Organization, 2020) อย่างไรก็ตาม ยังพบข้อจำกัดในการเชื่อมโยงผลการประเมินไปสู่การปรับปรุงมาตรการในทางปฏิบัติ (Lin et al., 2024; Yan et al., 2025)

แม้ประเทศไทยมีแนวทาง ESPReL เป็นกรอบประเมินความปลอดภัยห้องปฏิบัติการวิจัย แต่ข้อมูลเฉพาะของห้องปฏิบัติการทางทันตแพทยศาสตร์ในระดับหน่วยงานยังมีอยู่อย่างจำกัด (โครงการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยห้องปฏิบัติการวิจัยในประเทศไทย, 2557) จึงควรมีการประเมินความเสี่ยงในบริบทของห้องปฏิบัติการวิจัยพื้นฐานทางทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จากการสำรวจในคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา พบว่ายังไม่มีการใช้ผลการประเมินเพื่อกำกับและพัฒนามาตรการอย่างต่อเนื่อง (Thai Occupational Safety and Health Bureau, 2020) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินระดับความเสี่ยงระบุประเด็นความเสี่ยงสำคัญ และจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงจากกิจกรรมในห้องปฏิบัติการวิจัยพื้นฐานทางทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา โดยใช้ Risk Assessment Matrix

วัตถุประสงค์

เพื่อประเมินระดับความเสี่ยง ระบุประเด็นความเสี่ยงสำคัญ และจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงจากกิจกรรมในห้องปฏิบัติการวิจัยพื้นฐานทางทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา โดยใช้ Risk Assessment Matrix

อุปกรณ์และวิธีการ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงประเมินความเสี่ยงร่วมกับการวิเคราะห์บริบทการปฏิบัติงานจริง โดยใช้ Risk Assessment Matrix เพื่อประเมินระดับความเสี่ยงของกิจกรรมในห้องปฏิบัติการวิจัยพื้นฐานทางทันตแพทยศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

ผู้วิจัยศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ การจัดการสารเคมี และการประเมินความเสี่ยงด้วย Risk Assessment Matrix จากแหล่งอ้างอิงหลัก ได้แก่ คู่มือ ESPReL แนวทางการบริหารความเสี่ยงในห้องปฏิบัติการ คู่มือความปลอดภัยห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยหรือหน่วยงานภาครัฐ และมาตรฐาน ISO 31000 เพื่อใช้เป็นกรอบในการกำหนดรายการกิจกรรม หลักการจัดกลุ่มอันตราย และเกณฑ์การให้คะแนนโอกาสและผลกระทบที่ใช้ใน Risk Matrix

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ 1) แบบประเมินความเสี่ยงด้วย Risk Assessment Matrix และ 2) แบบบันทึกการสังเกตพฤติกรรมปฏิบัติงาน โดยพัฒนาจากแนวคิดการประเมินความเสี่ยงและแนวทางด้านความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ แล้วปรับให้เหมาะสมกับบริบทของห้องปฏิบัติการวิจัยพื้นฐานทางทันตแพทยศาสตร์

ก่อนนำไปใช้ ผู้วิจัยได้ตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือในเชิงเนื้อหาและการใช้งาน โดยกำหนดนิยามเกณฑ์การให้คะแนน และเกณฑ์การจัดระดับความเสี่ยงไว้อย่างชัดเจน ใช้เกณฑ์เดียวกันกับทุกกิจกรรม และบันทึกเหตุผลประกอบการประเมิน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากดุลยพินิจของผู้ประเมิน อย่างไรก็ตาม เครื่องมือนี้เป็นการประเมินเชิงเกณฑ์ ไม่ใช่แบบวัดเชิงจิตพิสัย จึงไม่ได้ใช้การตรวจสอบ IOC เป็นวิธีหลัก



(Rovinelli & Hambleton, 1977; Turner & Carlson, 2003) และยังไม่ได้ตรวจสอบความเชื่อมั่นเชิงสถิติ เช่น ความสอดคล้องระหว่างผู้ประเมิน ซึ่งระบุไว้เป็นข้อจำกัดของการศึกษา

ผู้วิจัยเก็บข้อมูลโดยสำรวจสภาพแวดล้อมของห้องปฏิบัติการและสังเกตการปฏิบัติงานจริงในกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ ข้อมูลจากการสังเกตประกอบด้วยข้อมูลเชิงปริมาณ ได้แก่ คะแนนโอกาสการเกิดเหตุ คะแนนความรุนแรง และคะแนนความเสี่ยง และข้อมูลเชิงคุณภาพ ได้แก่ รายละเอียดพฤติกรรม สภาพพื้นที่ และข้อสังเกตเกี่ยวกับปัจจัยที่อาจเพิ่มหรือลดความเสี่ยง

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณใช้สถิติเชิงพรรณนา โดยคำนวณคะแนนความเสี่ยงจากโอกาสการเกิดเหตุคูณความรุนแรงของผลกระทบ และจัดระดับความเสี่ยงตาม Risk Matrix เป็นต่ำ ปานกลาง และสูง ส่วนข้อมูลเชิงคุณภาพได้รับการวิเคราะห์ตามแนวทางการวิเคราะห์เนื้อหา (content analysis) โดยการจัดกลุ่มประเด็นหลัก ได้แก่ การใช้ PPE การปฏิบัติตามขั้นตอนความปลอดภัย การใช้และจัดเก็บสารเคมี การใช้เครื่องมือ และการจัดการพื้นที่ปฏิบัติงาน เพื่อนำมาใช้ประกอบการตีความคะแนนความเสี่ยงและเสนอแนวทางปรับปรุง

เกณฑ์การประเมินความเสี่ยง

การประเมินระดับความเสี่ยงใช้เมทริกซ์ความเสี่ยงแบบ 5×5 โดยพิจารณาจาก 2 องค์ประกอบ ได้แก่ โอกาสเกิดเหตุการณ์ (Likelihood) และผลกระทบหรือความรุนแรง (Impact/Severity) ซึ่งเป็นแนวทางที่ใช้ในการประเมินและจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยง โดยเมทริกซ์ความเสี่ยงช่วยให้สามารถมองเห็นระดับความเสี่ยงและใช้ประกอบการตัดสินใจในการกำหนดมาตรการจัดการความเสี่ยงได้อย่างเป็นระบบ (International Civil Aviation Organization [ICAO], n.d.; Department of Finance, 2020)

ค่าระดับความเสี่ยงคำนวณจากผลคูณระหว่างระดับโอกาสเกิดเหตุการณ์และระดับผลกระทบ/ความรุนแรง ดังสูตร $Risk\ Score = Likelihood \times Impact/Severity$ โดยคะแนนที่ได้ถูกนำมาจำแนกระดับความเสี่ยงเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 1-7 คะแนน หมายถึง ความเสี่ยงต่ำ 8-14 คะแนน หมายถึง ความเสี่ยงปานกลาง และตั้งแต่ 15 คะแนนขึ้นไป หมายถึง ความเสี่ยงสูง ทั้งนี้ การกำหนดเกณฑ์คะแนนดังกล่าวเป็นเกณฑ์ที่ผู้วิจัยกำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการแปลผลตามแผนที่ความร้อนของความเสี่ยงในการศึกษาครั้งนี้ (ICAO, n.d.; Health and Safety Executive [HSE], 2022)

ผลการศึกษา

ผลการประเมินความเสี่ยงของกิจกรรมภายในห้องปฏิบัติการวิจัยพื้นฐานทางทันตแพทยศาสตร์ จำนวน 12 กิจกรรม ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า กิจกรรมส่วนใหญ่จำนวน 10 กิจกรรม มีระดับความเสี่ยงต่ำ คิดเป็นร้อยละ 83.33 และมี 2 กิจกรรม มีระดับความเสี่ยงปานกลาง คิดเป็นร้อยละ 16.67 ได้แก่ การใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (PPE) และการปฏิบัติงานทั่วไป โดยไม่พบกิจกรรมที่มีความเสี่ยงระดับสูง

การแปลผลคะแนนความเสี่ยงพิจารณาจากผลคูณระหว่างค่าโอกาสเกิดเหตุการณ์ (Likelihood: L) และค่าความรุนแรงของผลกระทบ (Impact/Severity: I) โดยคะแนนความเสี่ยงมีค่าอยู่ระหว่าง 1-25 คะแนน แบ่งเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 1-7 คะแนน หมายถึง ความเสี่ยงต่ำ 8-14 คะแนน หมายถึง ความเสี่ยงปานกลาง และ



ตั้งแต่ 15 คะแนนขึ้นไป หมายถึง ความเสี่ยงสูง ดังนั้น คะแนนความเสี่ยงเท่ากับ 12 จาก 25 คะแนนของกิจกรรมการใช้ PPE และการปฏิบัติงานทั่วไป จึงจัดอยู่ในระดับความเสี่ยงปานกลางค่อนข้างสูง และเป็นคะแนนสูงที่สุดที่พบในการศึกษา

เมื่อพิจารณารายการกิจกรรมจากตารางที่ 1 พบว่า การใช้ PPE มีค่า $L = 3$ และ $I = 4$ สะท้อนว่ากิจกรรมนี้มีโอกาสเกิดเหตุในระดับปานกลาง แต่มีผลกระทบค่อนข้างรุนแรงหากเกิดการสัมผัสสารเคมีหรือสารกระตุ้นเข้าสู่ตาและผิวหนัง ส่วนการปฏิบัติงานทั่วไปมีค่า $L = 4$ และ $I = 3$ สะท้อนว่ากิจกรรมนี้มีโอกาสเกิดเหตุค่อนข้างสูง แม้ความรุนแรงของผลกระทบอยู่ในระดับปานกลาง เช่น การหกล้ม แก้วแตก หรือการบาดเจ็บจากของมีคม ดังนั้น ทั้งสองกิจกรรมจึงควรได้รับการจัดลำดับความสำคัญในการปรับปรุงเป็นอันดับแรก

สำหรับกิจกรรมที่มีความเสี่ยงต่ำ จำนวน 10 กิจกรรม มีคะแนนความเสี่ยงอยู่ระหว่าง 3-5 คะแนน จากคะแนนเต็ม 25 คะแนน อย่างไรก็ตาม กิจกรรมบางรายการแม้มีคะแนนรวมต่ำ แต่มีค่าความรุนแรงของผลกระทบสูง คือ $I = 5$ ได้แก่ การจัดเก็บสารเคมี การใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับตัวอย่างชีวภาพ การเตรียมพร้อมฉุกเฉิน และเครื่องนั่งฆ่าเชื้อ จึงควรกำหนดเป็นประเด็นเฝ้าระวังในการบริหารความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะการจัดเก็บสารเคมีซึ่งมีคะแนนความเสี่ยงรวมเท่ากับ 5 จาก 25 คะแนน แต่มีค่าความรุนแรงสูง หากเกิดเหตุรั่วไหล ไฟไหม้ หรือปฏิกิริยาระหว่างสารเคมีที่เข้ากันไม่ได้

เมื่อสังเคราะห์ผลการประเมินร่วมกับบริบทการปฏิบัติงานจริง สามารถจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ความเสี่ยงที่ควรปรับปรุงเร่งด่วน คือ การใช้ PPE และการปฏิบัติงานทั่วไป เนื่องจากมีคะแนนความเสี่ยงสูงที่สุดและเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการปฏิบัติงานโดยตรง กลุ่มที่ 2 ความเสี่ยงที่ควรเฝ้าระวังต่อเนื่อง คือ กิจกรรมที่มีคะแนนรวมต่ำแต่มีค่าความรุนแรงสูง ได้แก่ การจัดเก็บสารเคมี การใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับตัวอย่างชีวภาพ การเตรียมพร้อมฉุกเฉิน และเครื่องนั่งฆ่าเชื้อ และกลุ่มที่ 3 ความเสี่ยงที่ควรรักษามาตรการควบคุมเดิม คือ กิจกรรมที่มีคะแนนความเสี่ยงต่ำและมีมาตรการควบคุมชัดเจน ได้แก่ การใช้ตู้ดูดควัน การจัดการของเสีย การระบายอากาศ เครื่องปั่นเหวี่ยง และเครื่องอบลมร้อน

ผลการประเมินความเสี่ยงถูกนำมาจัดตำแหน่งในแผนที่ความร้อนของระดับความเสี่ยง ดังภาพที่ 1 โดยพบว่ากิจกรรมส่วนใหญ่อยู่ในโซนความเสี่ยงต่ำ และมี 2 กิจกรรมอยู่ในโซนความเสี่ยงปานกลาง ได้แก่ การใช้ PPE และการปฏิบัติงานทั่วไป แผนที่ความร้อนช่วยให้เห็นตำแหน่งของกิจกรรมที่ควรได้รับการจัดลำดับความสำคัญ และใช้เป็นข้อมูลประกอบการกำหนดมาตรการปรับปรุงความปลอดภัยในบริบทของห้องปฏิบัติการที่ศึกษา

วิจารณ์

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการไม่ได้เกิดจากอันตรายของสารเคมี วัสดุชีวภาพ หรืออุปกรณ์เพียงอย่างเดียว แต่ยังเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของผู้ปฏิบัติงานและการบริหารจัดการความปลอดภัยภายในหน่วยงาน ดังนั้น ความเสี่ยงที่พบในการศึกษานี้จึงควรตีความในฐานะความเสี่ยงจากการปฏิบัติงานในบริบทจริงของห้องปฏิบัติการ



การที่กิจกรรมส่วนใหญ่มีความเสี่ยงอยู่ในระดับต่ำ อาจสะท้อนว่ามาตรการควบคุมพื้นฐาน เช่น อุปกรณ์ป้องกัน การจัดพื้นที่ และแนวทางปฏิบัติด้านความปลอดภัย มีอยู่ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวควรตีความภายใต้ข้อจำกัดของ Risk Assessment Matrix เนื่องจากคะแนนความเสี่ยงอาจได้รับอิทธิพลจากเกณฑ์การให้คะแนนโอกาสเกิดเหตุและความรุนแรงของผลกระทบ มากกว่าจะสะท้อนสถานะความปลอดภัยทั้งหมดของห้องปฏิบัติการ

กิจกรรมที่มีความเสี่ยงระดับปานกลาง ได้แก่ การใช้ PPE และการปฏิบัติงานทั่วไป แสดงให้เห็นว่าปัจจัยด้านพฤติกรรมยังเป็นประเด็นสำคัญที่ควรเฝ้าระวัง โดยเฉพาะการใช้อุปกรณ์ป้องกันไม่ครบถ้วน การปฏิบัติตามขั้นตอนความปลอดภัยไม่สม่ำเสมอ และการจัดการพื้นที่ปฏิบัติงานหลังเกิดเหตุหกล้มหรือแตก ข้อค้นพบนี้สอดคล้องกับแนวคิดด้านความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการที่ให้ความสำคัญกับการประเมินความเสี่ยง การใช้มาตรการควบคุมที่เหมาะสม และพฤติกรรมของผู้ปฏิบัติงานในการลดความเสี่ยงจากการทำงานในห้องปฏิบัติการ (World Health Organization, 2020; Centers for Disease Control and Prevention, 2022)

ในกรณีของการจัดเก็บสารเคมี แม้คะแนนความเสี่ยงรวมอยู่ในระดับต่ำ แต่ยังคงจัดเป็นประเด็นเฝ้าระวัง เนื่องจากมีระดับความรุนแรงของผลกระทบสูงหากเกิดการรั่วไหล ไฟไหม้ หรือปฏิกิริยาระหว่างสารเคมีที่เข้ากันไม่ได้ ประเด็นนี้แสดงให้เห็นว่าการพิจารณาความเสี่ยงไม่ควรพิจารณาจากคะแนนรวมเพียงอย่างเดียว แต่ควรพิจารณาค่าความรุนแรงของผลกระทบร่วมด้วย ซึ่งสอดคล้องกับหลักการจัดการความเสี่ยงที่ให้ความสำคัญกับการระบุ วิเคราะห์ ประเมิน จัดการ ติดตาม และสื่อสารความเสี่ยงอย่างเป็นระบบ (International Organization for Standardization, 2018)

จากผลการประเมิน สามารถจัดกลุ่มประเด็นความเสี่ยงเพื่อการปรับปรุงมาตรการความปลอดภัยได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ความเสี่ยงที่ควรปรับปรุงเร่งด่วน คือ การใช้ PPE และการปฏิบัติงานทั่วไป ซึ่งจัดเป็นความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการทำงาน กลุ่มที่ 2 ความเสี่ยงที่ควรเฝ้าระวังต่อเนื่อง คือ การจัดเก็บสารเคมีและกิจกรรมที่มีผลกระทบรุนแรงหากเกิดเหตุ ซึ่งเกี่ยวข้องกับปัจจัยด้านเทคนิค กายภาพ และการจัดการ และกลุ่มที่ 3 ความเสี่ยงที่ควรรักษามาตรการควบคุมเดิม คือ กิจกรรมที่มีความเสี่ยงต่ำและมีมาตรการควบคุมชัดเจน ทั้งนี้ การจัดกลุ่มดังกล่าวเป็นการจัดลำดับความสำคัญจากผลการประเมินความเสี่ยง ไม่ใช่การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างปัจจัยต่าง ๆ

ดังนั้น การยกระดับความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการควรมุ่งเน้นทั้งการคงไว้ซึ่งมาตรการควบคุมด้านอุปกรณ์และสิ่งแวดล้อม การติดตามพฤติกรรมการใช้ PPE การทบทวนการจัดเก็บสารเคมี และการส่งเสริมการรับรู้ความเสี่ยงของผู้ปฏิบัติงานอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ ผลการศึกษาควรนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการปรับปรุงมาตรการความปลอดภัยในบริบทของห้องปฏิบัติการที่ศึกษา มากกว่าการอ้างอิงทั่วไปแทนห้องปฏิบัติการทางทันตแพทยศาสตร์ทั้งหมด การศึกษานี้จึงมีลักษณะเป็นกรณีศึกษาเชิงประยุกต์ของการใช้ Risk Assessment Matrix ในบริบทห้องปฏิบัติการทางทันตแพทยศาสตร์ระดับหน่วยงาน โดยเน้นการแปลผลคะแนนความเสี่ยงไปสู่การจัดลำดับความสำคัญและข้อเสนอเชิงปฏิบัติ มากกว่าการนำเสนอผลในรูปแบบการจัดหมวดหมู่ความเสี่ยงเพียงอย่างเดียว



อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาควรตีความภายใต้ข้อจำกัดของ Risk Assessment Matrix เนื่องจากการกำหนดระดับโอกาสการเกิดเหตุและความรุนแรงยังมีส่วนที่อาศัยดุลยพินิจของผู้ประเมิน แม้ผู้วิจัยจะกำหนดเกณฑ์การให้คะแนนไว้ล่วงหน้าและพัฒนาเครื่องมือจากแนวทางด้านความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการแล้วก็ตาม ทั้งนี้ เครื่องมือดังกล่าวไม่ได้ตรวจสอบคุณภาพด้วยค่า IOC หรือความเชื่อมั่นเชิงสถิติ เช่น ความสอดคล้องระหว่างผู้ประเมิน เนื่องจากการประเมินเชิงเกณฑ์ ไม่ใช่แบบวัดเชิงจิตพิสัยของผู้ตอบ

สรุป

ผลการประเมินความเสี่ยงพบว่า กิจกรรมส่วนใหญ่อยู่ในระดับความเสี่ยงต่ำ ขณะที่การใช้ PPE และการปฏิบัติงานทั่วไปอยู่ในระดับความเสี่ยงปานกลาง จึงควรได้รับการปรับปรุงเป็นลำดับแรก อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวควรตีความภายใต้เกณฑ์ของ Risk Assessment Matrix ที่ใช้ในการศึกษานี้ เนื่องจากคะแนนความเสี่ยงอาจสะท้อนข้อจำกัดของวิธีการประเมินมากกว่าสถานะความปลอดภัยทั้งหมดของห้องปฏิบัติการ แม้ความเสี่ยงหลายรายการเป็นความเสี่ยงทั่วไปที่พบได้ในห้องปฏิบัติการ แต่คุณค่าของการศึกษานี้อยู่ที่การนำผลประเมินมาเชื่อมโยงกับบริบทพื้นที่จริง เพื่อจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยง กำหนดประเด็นเฝ้าระวัง และเสนอแนวทางปรับปรุงความปลอดภัยอย่างต่อเนื่อง

ข้อเสนอแนะ

ควรนำผลการประเมินไปใช้จัดทำแผนติดตามความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการ โดยเน้นการกำกับการใช้ PPE การตรวจพฤติกรรมกรรมการปฏิบัติงาน การทบทวนการจัดเก็บสารเคมีและอุปกรณ์ที่มีค่าความรุนแรงสูง รวมถึงการประเมินความเสี่ยงซ้ำเป็นระยะ เพื่อให้การจัดการความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการมีความต่อเนื่องและเป็นระบบ

คำขอบคุณ

การศึกษานี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้การสนับสนุนและเชื้อเชิญสถานที่ รวมถึงทรัพยากรที่จำเป็นต่อการดำเนินการศึกษาในครั้งนี้



เอกสารอ้างอิง

- โครงการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยห้องปฏิบัติการวิจัยในประเทศไทย. (2557). *คู่มือการประเมินความปลอดภัยห้องปฏิบัติการ ฉบับแก้ไขเพิ่มเติม*. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- Centers for Disease Control and Prevention. (2022). Biosafety in microbiological and biomedical laboratories (6th ed.). <https://www.cdc.gov/labs/BMBL.html>
- Department of Finance. (2020). *An overview of the risk management process*. Australian Government.
- Health and Safety Executive. (2022). *Complaints: Step 6: Risk matrix and local factors*.
- International Civil Aviation Organization. (n.d.). *Safety risk management methodologies (SRM): Use of the risk matrix*
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000: Risk management—Guidelines*. <https://www.iso.org/standard/65694.html>
- Lin, Y., Li, Y. Q., Liao, Z. S., & Deng, M. X. (2024). Analysis and management of laboratory safety causes in universities: A case study of J University. *Advances in Applied Sociology*, 14(2), 89–103. <https://doi.org/10.4236/aasoci.2024.142006>
- National Research Council. (2011). *Prudent practices in the laboratory: Handling and management of chemical hazards* (Updated ed.). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12654>
- Thai Occupational Safety and Health Bureau. (2020). *Laboratory safety management guidelines*. Ministry of Labour, Thailand.
- Turner, R. C., & Carlson, L. (2003). Indexes of item-objective congruence for multidimensional items. *International Journal of Testing*, 3(2), 163–171.
- Rovinelli, R. J., & Hambleton, R. K. (1977). On the use of content specialists in the assessment of criterion-referenced test item validity. *Dutch Journal of Educational Research*, 2, 49–60.
- World Health Organization. (2020). *Laboratory biosafety manual* (4th ed.). <https://www.who.int/publications/i/item/9789240011311>
- Yan, Y., Li, C., Xu, J., Gao, L., Jiang, Z., Lv, S., ... & Chen, Z. (2025). Biosafety status analysis and risk assessment of laboratories from 2021 to 2023 in Jiaying, China. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, 1442651.

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ระดับความเสี่ยงของกิจกรรมในห้องปฏิบัติการ

กิจกรรม	อันตราย	L	I	คะแนน	ระดับ	มาตรการควบคุม	ข้อเสนอแนะ
จัดเก็บสารเคมี	รั่วไหล/ไฟไหม้/ปฏิกิริยาสารเข้ากันไม่ได้	1	5	5	ต่ำ	ตู้เฉพาะ; แยกตามหมวด; ฉลากชัด	ทบทวนรายไตรมาส; ตรวจสอบสภาพตู้
ใช้ตู้ดูดควัน	ระบายไม่พอ/ไอระเหยสะสม	1	3	3	ต่ำ	ใช้ตามคู่มือ; ตรวจสอบพัด	ทดสอบความเร็วลมทุก 6 เดือน
ใช้ PPE	สัมผัสสาร/กระเด็นตา/ผิวหนัง	3	4	12	ปานกลาง	แจกจ่ายตามงาน; บำรุง	ติดตามจริง; บังคับก่อนเข้าแล็บ
จัดการของเสีย	รั่วไหล/กลิ่น/ไฟไหม้	1	4	4	ต่ำ	แยกประเภท; ภาชนะเหมาะสม	กำหนด WIs ลดของเสีย
อุปกรณ์ไฟฟ้า	ช็อต/ลัดวงจร/ไฟไหม้	1	5	5	ต่ำ	สายดิน; เบรกเกอร์	PM รายครึ่งปี; บันทึกการตรวจ
ตัวอย่างชีวภาพ	ติดเชื้อ/รั่วไหล	1	5	5	ต่ำ	BSC; PPE ครบ; กล่องทิ้งของมีคม	อบรม Biosafety; SOP spill kit
ระบายอากาศ	สะสมไอระเหย/ฝุ่น/กลิ่น	1	3	3	ต่ำ	HVAC; จุดดูด	ตรวจ PM/TVOCs รายปี
ปฏิบัติงานทั่วไป	หกล้ม/แก้วแตก/ของมีคม	4	3	12	ปานกลาง	ทำความสะอาดทันที; บำรุง	Walk-through รายสัปดาห์; รณรงค์ 5ส.
เตรียมพร้อมฉุกเฉิน	ตอบสนองล่าช้า	1	5	5	ต่ำ	แผนหนีไฟ; ถังดับเพลิง	ซ้อมอพยพปีละครั้ง
เครื่องนั่งฆ่าเชื้อ	บาดเจ็บไอน้ำ/ระเบิด	1	5	5	ต่ำ	อบรมผู้ใช้; คู่มือ	PM รายครึ่งปี; เช็กล็อก QC
เครื่องปั่นเหวี่ยง	เครื่องสั่น/แตกกระเด็น	1	3	3	ต่ำ	สมดุลน้ำหนัก; ฝาล็อก	บันทึก PM; SOP ไม่สมดุล
เครื่องอบลมร้อน	บาดเจ็บจากความร้อนสูง/ไฟไหม้จากวัสดุไวไฟ/อุปกรณ์ร้อนจัด	1	4	4	ต่ำ	ใช้งานตามคู่มือ; ตั้งอุณหภูมิให้เหมาะสม; ห้ามใส่วัสดุไวไฟ	ตรวจสอบระบบควบคุมอุณหภูมิและสายไฟ; PM รายปี

หมายเหตุ: L = โอกาส (Likelihood), I = ผลกระทบ (Impact); เกณฑ์: สูง (≥ 15) | ปานกลาง (8-14) | ต่ำ (1-7)



		Impact / Severity (I)				
Likelihood (L)	L \ I	1	2	3	4	5
	1	1	2	3	4	5
	2	2	4	6	8	10
	3	3	6	9	12	15
	4	4	8	12	16	20
	5	5	10	15	20	25

ภาพที่ 1 แผนที่ความร้อนของระดับความเสี่ยงของกิจกรรมในห้องปฏิบัติการ โดยพิจารณาจากค่าโอกาสเกิดเหตุ (Likelihood: L) และค่าความรุนแรงของผลกระทบ (Impact/Severity: I)



การพัฒนาแผงควบคุมสำหรับติดตามการใช้ยารักษาผู้ป่วยโรคลมชักและการใช้ยาเฉพาะราย Development of a Dashboard for Monitoring Antiepileptic Drug and Personal Specific Use

วชิทิพย์ แก้วบุตรา¹ และ พีรยศ ภมรศิลปธรรม²

Vajeethip Kaewbutra¹ and Perayot Pamonsinlapatham²

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ พัฒนาแผงควบคุมสำหรับติดตามการใช้ยารักษาผู้ป่วยโรคลมชักและการใช้ยาเฉพาะราย และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานแผงควบคุมที่พัฒนาขึ้น รูปแบบการวิจัยและพัฒนาโดยใช้ข้อมูลย้อนหลัง จากระบบสารสนเทศโรงพยาบาล (EPHIS) ของสถาบันประสาทวิทยา 3 ปี (ระหว่าง 1 มกราคม พ.ศ. 2563 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2565) ข้อมูลจัดเก็บและประมวลผลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel และพัฒนาเป็นแผงควบคุมด้วย Looker Studio กลุ่มตัวอย่างที่ประเมินความพึงพอใจคือ เภสัชกรที่สถาบันประสาทวิทยา จำนวน 10 คน วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ความถี่ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการศึกษาพบว่า แผงควบคุมสามารถแสดงข้อมูลสำคัญได้เป็นระบบ ได้แก่ ข้อมูลทั่วไปของผู้ป่วย ภาพรวมและแนวโน้มการใช้ยารายเดือน รวมถึงข้อมูลมูลค่าการใช้ยาในผู้ป่วยเฉพาะราย สามารถสืบค้น-ติดตาม และวิเคราะห์ข้อมูลได้ ลดภาระการรวบรวมและสรุปรายงานแบบเดิม ผลการประเมินความพึงพอใจพบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.41$, $SD = 0.67$) โดยด้านที่ได้รับความสนใจสูง ได้แก่ ความเป็นมิตรต่อผู้ใช้งาน ($\bar{x} = 4.70$, $SD = 0.48$) และผลต่อคุณภาพการบริการด้านเภสัชกรรม ($\bar{x} = 4.60$, $SD = 0.52$)สรุปได้ว่า แผงควบคุมที่พัฒนาขึ้นเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับสนับสนุนการติดตามการใช้ยาและการบริหารจัดการข้อมูลด้านเภสัชกรรม

คำสำคัญ : แผงควบคุม, โรคลมชัก, ยากันชัก

Abstract

This research and development study aimed to develop and evaluate a dashboard for monitoring antiepileptic drug use in patients with epilepsy and patient-specific medication costs. The study was conducted using retrospective data obtained from the EPHIS hospital information system, the Neurological Institute between January 1, 2020, and December 31, 2022. The data were processed using Microsoft

¹ กลุ่มงานเภสัชกรรม สถาบันประสาทวิทยา 312 ถนนราชวิถี แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 Department of Pharmacy Neurological Institute of Thailand 312 Ratchawithi Road, Thung Phaya Thai, Ratchathewi, Bangkok 10400, Thailand

² สาขาวิชาสุขภาพดิจิทัล คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย Department of Digital Health, Faculty of Pharmacy, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand



Excel and presented through a dashboard developed with Google Looker Studio. User satisfaction with the developed dashboard was assessed by 10 pharmacists at the Neurological Institute. Descriptive statistics, including frequency, mean, and standard deviation, were used for data analysis. The results showed that the dashboard systematically presented essential information, including patient demographic characteristics, overall patterns of medication use, monthly drug utilization trends, and patient-specific medication cost data. The dashboard enabled pharmacists to retrieve, monitor, and analyze information while reducing the burden of manual data compilation and reporting. Overall, user satisfaction with the dashboard was at the highest level ($\bar{x} = 4.41$, $SD = 0.67$). The highest-rated aspects were user-friendliness ($\bar{x} = 4.70$, $SD = 0.48$) and its contribution to the quality of pharmaceutical services ($\bar{x} = 4.60$, $SD = 0.52$). In conclusion, the developed dashboard was an appropriate tool for supporting medication monitoring and pharmaceutical data management in pharmaceutical practice.

Keywords: Dashboard, Epilepsy, Antiepileptic drug use, Looker Studio

บทนำ

โรคลมชักเป็นปัญหาสาธารณสุขสำคัญของประเทศไทย มีความชุกประมาณ 5.9–7.2 ต่อประชากร 1,000 คน คิดเป็นผู้ป่วยราว 500,000 คนทั่วประเทศ (สถาบันประสาทวิทยา, 2564) ส่งผลกระทบทั้งด้านร่างกาย จิตใจ สังคม และคุณภาพชีวิต รวมถึงเป็นภาระต่อครอบครัว ชุมชน และระบบบริการสุขภาพโดยรวม ขณะที่สถาบันประสาทวิทยา กรมการแพทย์ ในฐานะศูนย์เชี่ยวชาญด้านโรคลมชัก ได้นำระบบ EPHIS มาใช้สนับสนุนการให้บริการ แต่ยังมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ข้อมูลเฉพาะด้านเภสัชกรรม เช่น การติดตามการใช้ยาและแนวโน้มรายเดือน ทำให้ต้องใช้เวลาในการรวบรวมข้อมูลและยังขาดภาพรวมสำหรับการตัดสินใจเชิงบริหารจัดการ

โดยเฉพาะข้อมูลด้าน clinical outcomes, drug utilization และค่าใช้จ่าย ซึ่งไม่สามารถติดตามและวิเคราะห์ได้อย่างเป็นระบบ นอกจากนี้ การเข้าถึงข้อมูลยังต้องอาศัยการรวบรวมและประมวลผลโดยบุคลากร ส่งผลให้เกิดความล่าช้าและไม่สามารถใช้ข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจได้ทันเวลา

แผงควบคุม (Dashboard) สามารถแสดงข้อมูลได้หลายรูปแบบ เช่น แผนที่ ตาราง กราฟ รองรับการคัดกรอง เลือกรูข้อมูล และปรับมุมมองตามความต้องการของผู้ใช้ (Schulze et al., 2023) การศึกษาที่เกี่ยวข้องพบว่า แผงควบคุมสามารถช่วยลดเวลาในการรวบรวมข้อมูล ลดภาระทางการรับรู้ และสนับสนุนการติดตามข้อมูลสำคัญในระบบสุขภาพได้ดีขึ้น (Khairat et al., 2018) (Rabiei & Almasi, 2022) ในงานเภสัชกรรม การพัฒนาแผงควบคุมช่วยให้สามารถติดตามทั้งด้านการบริหารและการเงิน ในด้านการดูแลทางคลินิก แผงควบคุมมีความจำเป็นต่อการประเมินผลการดำเนินงานและการวางแผนพัฒนางานได้อย่างต่อเนื่อง (Arnaudin & Lima, 2025; Dehghani Mahmoodabadi et al., 2019)



การพัฒนาแผนควบคุมในการศึกษานี้อาศัยกรอบแนวคิดด้านการจัดการข้อมูล (data framework) โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 มิติหลัก ได้แก่ การติดตามผู้ป่วยรายบุคคล (patient follow-up) การวิเคราะห์รูปแบบการใช้ยา (drug utilization) และการวิเคราะห์มูลค่าการใช้ยา (expenditure analysis) ซึ่งแต่ละมิติถูกกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น ข้อมูลผู้ป่วย (อายุ เพศ สิทธิการรักษา) ข้อมูลการใช้ยา (จำนวนครั้ง ปริมาณยา แนวโน้มรายเดือน) และข้อมูลค่าใช้จ่าย (ราคาต่อหน่วยและมูลค่ารวม) โดยข้อมูลทั้งหมดได้จากฐานข้อมูล EPHIS และเก็บข้อมูลด้วย Microsoft Excel ก่อนนำเสนอผ่าน Looker Studio เพื่อให้สามารถติดตาม วิเคราะห์ และสนับสนุนการตัดสินใจได้อย่างเป็นระบบ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาการแสดงผลในรูปแบบแผนควบคุมสำหรับติดตามการใช้ยารักษาผู้ป่วยโรคลมชัก และการใช้ยาเฉพาะรายจากฐานข้อมูล EPHIS ของสถาบันประสาทวิทยา
2. เพื่อประเมินความพึงพอใจของเภสัชกร สถาบันประสาทวิทยาต่อการใช้งานแผนควบคุมที่พัฒนา

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาเป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development) โดยใช้ข้อมูลจากระบบสารสนเทศโรงพยาบาล (EPHIS) ของสถาบันประสาทวิทยา ในช่วงวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2563 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2565 ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยศิลปากร เลขที่โครงการ REC 68.0130-019-0885 การดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. การศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาของระบบเดิม ได้แก่ รวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องระบบเดิม เช่น แบบติดตามการใช้ยาในคลินิกลมชัก รูปแบบรายงานผล ขั้นตอนการทำงานโดยละเอียด สัมภาษณ์เภสัชกรที่รวบรวมข้อมูลโดยการสัมภาษณ์เชิงลึก (in-depth interview) กับเภสัชกร จำนวน 10 คน ที่ปฏิบัติงานในกลุ่มงานเภสัชกรรมของสถาบันประสาทวิทยา โดยมีเกณฑ์การคัดเลือก ได้แก่ (1) มีประสบการณ์ในการดูแลผู้ป่วยโรคลมชักไม่น้อยกว่า 1 ปี และ (2) มีส่วนเกี่ยวข้องกับการจัดทำรายงานการใช้ยา (drug utilization report) แล้วนำมาวิเคราะห์ผลและสรุปประเด็นปัญหา

2. ข้อมูลจากระบบ EPHIS ถูกนำออกในรูปแบบไฟล์ Microsoft Excel และผ่านกระบวนการทำความสะอาดข้อมูล (data cleaning) ได้แก่ การตรวจสอบข้อมูลซ้ำ การจัดการค่าว่าง และการปรับรูปแบบตัวแปรให้เป็นมาตรฐาน ก่อนนำเข้าสู่ Looker Studio เพื่อพัฒนาแผนควบคุม

แผนควบคุมที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยฟังก์ชันหลัก ได้แก่ การแสดงแนวโน้มการใช้ยา การค้นหาผู้ป่วยรายบุคคล และการกรองข้อมูลตามช่วงเวลา สิทธิการรักษา และรายการยา

ระบบกรองข้อมูล (filter system) สำหรับเลือกช่วงเวลา ประเภทผู้ป่วย และชนิดยา และการ drill-down เพื่อดูรายละเอียดข้อมูลเชิงลึกในแต่ละรายการ โดยคุณลักษณะของแผนควบคุม อธิบายฟังก์ชันการทำงานที่ช่วยให้

ผู้เข้าถึงข้อมูลได้ง่ายขึ้น: มีระบบกรองข้อมูล สามารถเลือกดูข้อมูลตามช่วงเวลา (เดือน/ปี), ประเภทสิทธิการรักษา, และรายชื่อยา, ระบบสืบค้นข้อมูลผู้ป่วยรายบุคคล เพื่อดูประวัติการรับยาแบบต่อเนื่อง และการแสดงผลด้วยกราฟ การใช้กราฟเส้นเพื่อดูแนวโน้มการเข้ายา และกราฟแท่งเพื่อการเปรียบเทียบมูลค่ายา

3. การทดลองใช้งาน ประเมินและปรับปรุงโดยผู้เชี่ยวชาญ โดยทดลองใช้งานด้วยตนเอง และการตรวจสอบจากผู้เชี่ยวชาญถึงความเหมาะสมในการรายงานผลของข้อมูลกับผู้ใช้งาน และนำผลมาดำเนินการปรับแก้ไขแผนภูมิที่ตอบโจทย์การติดตามการเข้ายาโรคลมชักและการเข้ายารายบุคคล

4. การประเมินความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ การประเมินความพึงพอใจมี 2 ส่วน คือ ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม 5 ข้อ และความพึงพอใจต่อการใช้งาน 10 ข้อ ได้แก่ ด้านประสิทธิภาพ (Efficiency): ความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลและความเร็วในการโหลด ด้านประสิทธิผล (Effectiveness): ประโยชน์ในการช่วยตัดสินใจเกี่ยวกับการเข้ายาและการส่งเสริมคุณภาพการบริการเภสัชกรรม ด้านการใช้งานและภาพลักษณ์ (Usability & Aesthetics): ความเป็นมิตรต่อผู้ใช้งาน ความชัดเจนของรูปแบบการนำเสนอ และความสวยงามของกราฟิก และภาพรวมความพึงพอใจ (Overall Satisfaction): ความพึงพอใจในภาพรวมต่อเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น (ตารางที่ 2) โดยแบบประเมินได้ผ่านการตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (IOC) โดยผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน

วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และช่วงคะแนนต่ำสุด-สูงสุด (min-max) แบบประเมินความพึงพอใจใช้มาตราส่วน Likert 5 ระดับ (Joshi et al., 2015) โดยกำหนดคะแนนเป็น 1 – 5 คะแนน ข้อมูลถูกนำเสนอด้วยค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เกณฑ์การแปลความหมายค่าเฉลี่ยน้ำหนักคำถาม 1.00 – 1.80 หมายถึง เห็นด้วย/เหมาะสมสำคัญน้อยที่สุด, 1.81 – 2.60 หมายถึง เห็นด้วย/เหมาะสมสำคัญน้อย, 2.61 – 3.40 หมายถึง เห็นด้วย/เหมาะสมสำคัญปานกลาง, 3.41 – 4.20 หมายถึง เห็นด้วย/เหมาะสมสำคัญมาก และ 4.21 – 5.00 หมายถึง เห็นด้วย/เหมาะสมสำคัญมากที่สุด ตามลำดับ

ผลการศึกษา

1. ปัญหาของระบบงานเดิม จากการสัมภาษณ์เภสัชกร พบว่าความต้องการสามารถแบ่งออกเป็นปัญหาสำคัญ 5 ประการ ได้แก่ (1) การติดตามปริมาณและมูลค่าการเข้ายาทำได้ยาก ระบบเดิมใช้เวลานานในการสรุปข้อมูลรายเดือนและรายปี (2) การเปรียบเทียบแนวโน้มการเข้ายาแต่ละช่วงเวลามีข้อจำกัด ต้องวิเคราะห์เพิ่มเติมจากผู้ปฏิบัติงาน (3) ระบบไม่สามารถจำแนกข้อมูลตามชนิดยา กลุ่มอายุ เพศ หรือสิทธิการรักษาได้อย่างยืดหยุ่น (4) การติดตามผู้ป่วยรายบุคคล เช่น การติดตามประวัติการเข้ายา ความต่อเนื่องของการรักษา และการเปลี่ยนแปลงรายการยาในแต่ละครั้งของการเข้ามารักษาที่โรงพยาบาล และ (5) ระบบไม่รองรับการใช้ข้อมูลเพื่อบริหารจัดการเชิงรุก เช่น การจัดอันดับยาที่มีมูลค่าสูงหรือปริมาณยาที่ใช้มาก นอกจากนี้ยังพบความต้องการเพิ่มเติม เช่น การระบุผู้ป่วยที่มีความเสี่ยง (high-cost / frequent visit)

2. ผลการออกแบบฐานข้อมูลจากระบบ EPHIS ของสถาบันประสาทวิทยาโดยดึงข้อมูลเฉพาะผู้ป่วยนอกได้รับวินิจฉัยโรคลมชัก (Epilepsy) โดยอาจจะไม่มีหรือไม่มีโรคร่วมได้ และผู้ป่วยต้องได้รับยากันชักอย่างน้อย



1 รายการจากหน่วยจ่ายผู้ป่วยนอก สถาบันประสาทวิทยา จากนั้นจัดทำแบบฟอร์มการเก็บข้อมูลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้สะดวกต่อการจัดการข้อมูลที่เป็นต่อการวิเคราะห์ทางสถิติและป้องกันความลับของข้อมูล (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 การออกแบบฐานข้อมูล

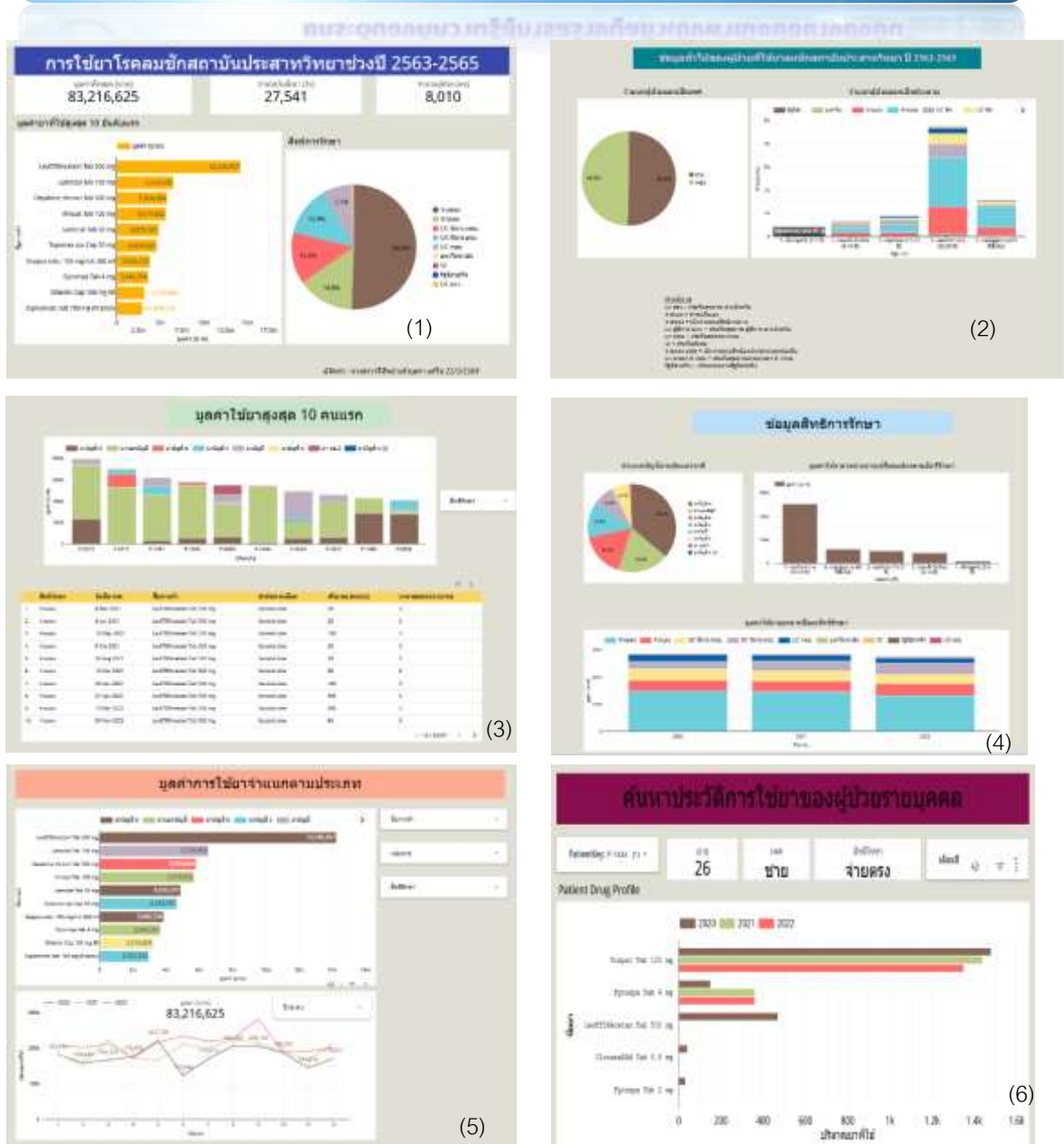
ลำดับ	รายการตาราง	รายละเอียดของข้อมูล
1	ข้อมูล (patient)	รหัสผู้ป่วย (Patient Key), อายุ (Age), เพศ (Gender), สิทธิรักษา (Type)
2	ข้อมูลใบสั่งยา (visit)	รหัสผู้ป่วย (Patient Key), รหัสใบสั่งยา (Visit Key), วันที่ใบสั่งยา (Visit Date), ปี (Year), เดือน (Month), ปี เดือน (Year Month), ครั้งที่ใบสั่งยา (Total Visits)
3	ข้อมูลยาในใบสั่งยา (Drug Usage)	รหัสใบสั่งยา (Visit Key), รหัสยา (Drug Code), ปริมาณ (Qty), ราคาขาย (Unit Price), มูลค่า (Total)
4	รายละเอียดยา (Drug master)	รหัสยา (Drug Code), ชื่อสามัญทางยา (Generic name), ชื่อการค้า (Drug name), ความแรง (Strength), หน่วย (unit), ราคาต่อหน่วย (Unit Price), ประเภทบัญชียา (Category), อันดับเลือกใช้ตามความสำคัญของยาตามบัญชียาโรงพยาบาล (Priority)

ผลการพัฒนาแผนควบคุม โดยใช้ข้อมูลผู้ป่วย 8,010 ราย จำนวนใบสั่งยา 27,541 ใบ มูลค่าการใช้ยาทั้งหมด 83,216,625 บาท ผลการทดสอบการใช้งาน พบว่า แผนควบคุมสามารถแสดงผลได้ทั้งในรูปแบบ กราฟ (เช่น กราฟเส้นแสดงแนวโน้ม, กราฟแท่งเปรียบเทียบมูลค่า) และ ตารางการใช้ยารายบุคคล รองรับการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ cross-tabulation ระหว่างตัวแปร เช่น ช่วงอายุ เพศ สิทธิการรักษา รายการยาและชนิดยาจากการใช้ตัวกรองข้อมูล รวมไปถึงระบบสามารถช่วยระบุผู้ป่วยที่มีค่าใช้จ่ายสูงหรือมีการใช้ยาซ้ำบ่อย ซึ่งอาจเป็นกลุ่มเสี่ยงที่ต้องติดตามเพิ่มเติม

อย่างไรก็ตาม ระบบในปัจจุบันยังเน้นข้อมูลด้าน utilization และ expenditure เป็นหลัก โดยยังไม่รองรับข้อมูลผลลัพธ์ทางคลินิก เช่น อาการไม่พึงประสงค์จากการใช้ยา หรือเหตุผลในการปรับยา ซึ่งเป็นแนวทางพัฒนาในอนาคต

นอกจากนี้ยังพบประเด็นที่ต้องปรับปรุงหลังการทดสอบ เช่น การปรับสูตรคำนวณมูลค่าให้ชัดเจน การเพิ่มคำอธิบายตัวชี้วัดบนหน้าแผนควบคุม และการปรับแสดงชื่อ (Label) ของกราฟให้แสดงผลถูกต้องในทุกอุปกรณ์ เพิ่มการกรองข้อมูลตามรายชื่อยาแต่ละรายการและแสดงสัดส่วนของการใช้ยาแต่ละชนิดให้ชัดเจนขึ้น ผู้วิจัยได้ดำเนินการแก้ไขก่อนให้ผู้ใช้งานประเมินผล

การประชุมวิชาการ บัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 16 วันที่ 28 - 29 พฤษภาคม 2569 “บัณฑิตวิจัย สร้างสรรค์ และนวัตกรรม : ยกระดับองค์ความรู้สู่การสร้างมูลค่าเชิงพาณิชย์อย่างยั่งยืน”



รูปภาพ 1 แผนควบคุมที่พัฒนาโดย Looker Studio แสดงแต่ละหน้าจอ โดยที่ (1) ภาพรวมการใช้จ่ายโรคลมชักสถาบันประสาทวิทยาช่วงปี 2563- 2565 (2) ข้อมูลทั่วไปของผู้ป่วยที่เข้ายาโรคลมชัก (3) ข้อมูลสิทธิรักษา (4) มูลค่าการใช้จ่ายจำแนกตามประเภท (5) มูลค่าใช้จ่ายสูงสุด 10 คนแรก (6) ค้นหาประวัติการใช้ยาของผู้ป่วยรายบุคคล



3. ผลการประเมินความพึงพอใจ

ผู้เข้าร่วมการวิจัยตอบแบบสอบถามหลังใช้งานแผงควบคุม 2 สัปดาห์ กลุ่มตัวอย่างที่ประเมินความพึงพอใจ จำนวน 10 คน ประกอบ เกสัชกรที่ทำงานในกลุ่มงานเภสัชกรรม ประกอบด้วยเพศหญิง 9 คน และเพศชาย 1 คน อยู่ในช่วงอายุ 20 – 49 ปี ได้ประเมินผลการใช้งาน และแสดงผลสรุปการประเมินข้อมูลดังรายละเอียดแสดง (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ผลการประเมินประสิทธิภาพ ประสิทธิผล และการใช้งานและภาพลักษณ์การแสดงผลแผงควบคุมที่พัฒนา

หัวข้อประเมิน	$\bar{x}$	Min-Max	ระดับความพึงพอใจ
แผงควบคุมมีความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูล	4.30 ±0.67	3-5	มากที่สุด
ความเร็วในการโหลดข้อมูลในแผงควบคุม	4.10 ±0.74	3-5	มาก
ท่านสามารถเข้าใจข้อมูลในแผงควบคุมได้ง่าย	4.30 ±0.67	3-5	มากที่สุด
แผงควบคุมช่วยตัดสินใจ เกี่ยวกับการใช้ยาโรคลมชักมีประสิทธิผลมากขึ้น	4.30 ±0.82	3-5	มากที่สุด
แผงควบคุมช่วยให้ท่านติดตามผลการใช้ยาโรค ลมชักหรือยาอื่นๆในผู้ป่วยได้ดีขึ้น	4.30 ±0.67	3-5	มากที่สุด
แผงควบคุมส่งผลต่อคุณภาพการบริการด้านเภสัชกรรม	4.60 ±0.52	4-5	มากที่สุด
การใช้งานแผงควบคุมมีความเป็นมิตรต่อผู้ใช้งาน	4.70 ±0.48	4-5	มากที่สุด
รูปแบบการนำเสนอข้อมูลในแผงควบคุมมีความชัดเจนและเข้าใจง่าย	4.50 ±0.71	3-5	มากที่สุด
สีและกราฟิกในแผงควบคุมช่วยให้การอ่านและการตีความข้อมูลมีความสะดวกขึ้น	4.60 ±0.70	3-5	มากที่สุด
ภาพรวมความพึงพอใจทั้งหมด	4.41±0.67	3-5	มากที่สุด

4. การอภิปรายผล

การศึกษานี้มีจุดแข็งสำคัญคือการพัฒนาแผงควบคุมที่สอดคล้องกับบริบทของหน่วยงานเภสัชกรรมในโรงพยาบาลเฉพาะทาง ซึ่งต้องจัดการข้อมูลผู้ป่วยและการใช้ยาจำนวนมาก โดยระบบสามารถบูรณาการข้อมูลและแสดงผลในรูปแบบที่เข้าใจง่าย ช่วยลดภาระงานในการรวบรวมข้อมูลและเพิ่มความรวดเร็วในการเข้าถึงข้อมูลสอดคล้องกับแนวคิดของการใช้ dashboard เพื่อสนับสนุนการบริหารงานเภสัชกรรม (Adelusi et al., 2025)

ในด้านประสิทธิผล แผงควบคุมสนับสนุนการตัดสินใจของเภสัชกรผ่านการแสดงแนวโน้มการใช้ยา มูลค่าการใช้ยา และการจัดอันดับยาที่มีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงรองรับการติดตามข้อมูลผู้ป่วยรายบุคคล เช่น ประวัติการใช้ยา



และความต่อเนื่องของการรักษา อย่างไรก็ตามระบบยังเน้นการติดตามในเชิงกระบวนการ และยังไม่ครอบคลุมผลลัพธ์ทางคลินิกโดยตรง

การออกแบบระบบที่มีการจัดโครงสร้างข้อมูลอย่างเป็นระบบตั้งแต่ต้น ทำให้สามารถเลือกใช้รูปแบบการแสดงผลที่เหมาะสม เช่น แผนภูมิเส้นสำหรับแนวโน้ม และแผนภูมิแท่งสำหรับการเปรียบเทียบ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของ Prasiwinigum (2023)

เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมืออื่น เช่น Tableau และ Power BI พบว่า Looker Studio มีข้อได้เปรียบในด้านความง่ายในการใช้งาน การเข้าถึงแบบ web-based และต้นทุนต่ำ แต่อาจมีข้อจำกัดด้านการประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่และความซับซ้อนของข้อมูล

แม้ว่าจะเน้นความพึงพอใจอยู่ในระดับสูง แต่ควรแปลความอย่างระมัดระวัง เนื่องจากเป็นกลุ่มตัวอย่างจำนวนน้อย และอาจจะเป็นบริบทเฉพาะในสถาบันที่ทำการศึกษา

การศึกษานี้มีข้อจำกัด ได้แก่ การใช้ข้อมูลย้อนหลังจากแหล่งเดียว การไม่ครอบคลุมข้อมูลผลลัพธ์ทางคลินิก และขนาดตัวอย่างในการประเมินความพึงพอใจที่จำกัด อย่างไรก็ตาม แผนควบคุม ที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการต่อยอดไปสู่การสนับสนุนการวิเคราะห์เชิงคาดการณ์และการวางแผนเชิงรุกในอนาคต เช่น การพยากรณ์แนวโน้มการใช้ยา หรือการบริหารจัดการคลังยา ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (Rushton et al., 2023) ที่ใช้แผนควบคุม ร่วมกับแบบจำลองข้อมูลเพื่อสนับสนุนการวางแผนด้านเวชภัณฑ์

ในอนาคตควรพัฒนาระบบให้สามารถเชื่อมโยงข้อมูลทางคลินิก เช่น การเกิดอาการไม่พึงประสงค์จากยา หรือผลการรักษา รวมถึงพัฒนาระบบแจ้งเตือนเพื่อสนับสนุนการดูแลผู้ป่วยเชิงรุก และขยายการใช้งานไปยังโรคหรือบริบทอื่นในงานเภสัชกรรม

ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อไปในอนาคต ได้แก่ (1) การปรับระบบให้รองรับการอัปเดตข้อมูลแบบ Real-time ผ่าน Google Sheets หรือ BigQuery (2) การพัฒนาระบบแจ้งเตือน (Alert System) เมื่อพบค่าวิกฤต เช่น ระดับยาในเลือดอยู่ในเกณฑ์เป็นพิษ (3) การขยายฐานข้อมูลให้ครอบคลุมมากกว่า 3 ปี เพื่อทดสอบความเสถียรของระบบ และ (4) การประยุกต์ใช้ Machine Learning เพื่อพัฒนาโมเดลพยากรณ์โอกาสที่ผู้ป่วยจะควบคุมอาการชักไม่ได้ (Seizure Control Prediction) เพื่อสนับสนุนการบริหารบาลเภสัชกรรมเชิงรุก

บทสรุป

การวิจัยนี้ได้พัฒนาแผนควบคุมสำหรับติดตามการใช้ยาของผู้ป่วยโรคลมชักและการใช้ยาเฉพาะรายจากข้อมูลผู้ป่วยจากระบบ EPHIS มาจัดโครงสร้างและแสดงผลผ่าน Looker Studio แผนควบคุมสามารถแสดงข้อมูลสำคัญได้สอดคล้องกับผลการประเมินความพึงพอใจแผนควบคุมที่พัฒนาขึ้นเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับสนับสนุนการติดตามการใช้ยาและการบริหารจัดการข้อมูลด้านเภสัชกรรม



คำขอบคุณ

ขอขอบคุณอาจารย์สาขาสุขภาพดิจิทัล คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ตลอดจนบุคลากรของสถาบันประสาทวิทยาที่ให้ความอนุเคราะห์การดำเนินการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี



เอกสารอ้างอิง

- สถาบันประสาทวิทยา. (2564). แนวทางการรักษาโรคลมชักสำหรับแพทย์. สถาบันประสาทวิทยาและสมาคมโรคลมชักแห่งประเทศไทย.
- Adelusi B, Osamika D, Mustapha A, Forkuo A, Ikhalea N, Kelvin-Agwu M. A Review of Data Visualization Tools and Techniques in Public Health: Enhancing Decision-Making through Analytics. 2025.
- Arnaudin, C., & Lima, T. (2025). Use of Dashboards in Pharmaceutical Services: an integrative review. *JORNAL DE ASSISTÊNCIA FARMACÊUTICA E FARMACOECONOMIA*, 10, 1-10.
<https://doi.org/10.22563/2525-7323.2025.v10.e00253e>
- Dehghani Mahmoodabadi, A., Langarizadeh, M., & Mehrjardi, M. (2019). Development of Managerial Key Performance Indicators for A Hospital Pharmacy Digital Dashboard. *Iranian journal of pharmaceutical research : IJPR*, 18, 2124-2130. <https://doi.org/10.22037/ijpr.2019.1100822>
- Joshi, A., Kale, S., Chandel, S., & Pal, D. (2015). Likert Scale: Explored and Explained. *British Journal of Applied Science & Technology*, 7, 396-403. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2015/14975>
- Khairat, S. S., Dukkupati, A., Lauria, H. A., Bice, T., Travers, D., & Carson, S. S. (2018). The Impact of Visualization Dashboards on Quality of Care and Clinician Satisfaction: Integrative Literature Review. *JMIR Hum Factors*, 5(2), e22. <https://doi.org/10.2196/humanfactors.9328>
- Rabiei, R., & Almasi, S. (2022). Requirements and challenges of hospital dashboards: a systematic literature review. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 22(1), 287.
<https://doi.org/10.1186/s12911-022-02037-8>
- Rushton, R., Lorraine, O., Tiong, J., Karim, M., Dixon, R., Greenshields, W., Marotti, R., & Bretaña, N. A. (2023). Forecasting inventory for the state-wide pharmaceutical service of South Australia. *Procedia Computer Science*, 219, 1257-1264.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.409>
- Schulze, A., Brand, F., Geppert, J., & Böhl, G.-F. (2023). Digital dashboards visualizing public health data: a systematic review [Systematic Review]. *Frontiers in Public Health*, Volume 11 - 2023.
<https://www.frontiersin.org/journals/publichealth/articles/10.3389/fpubh.2023.999958>

การวิเคราะห์ปัจจัยสาเหตุที่ทำให้เกิดการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาก่อสร้างกรณีศึกษา
โครงการก่อสร้างภาครัฐแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร

Analysis of Causal Factors Leading to Construction Contract Variations: A Case Study of
A Government Project in Bangkok

ศรายุทธ ฝนบุญ¹ และ ดร.บุญรักษ์ แวนบอเซอร์²

Sarayut Phonboon¹ Boonruk Vavborsel Ph.D.²

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาและรวบรวมปัจจัยสาเหตุที่นำไปสู่การแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญา (2) วิเคราะห์และจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยสาเหตุ โดยพิจารณาทั้งความถี่และระดับผลกระทบ และ (3) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสาเหตุและประเภทของงานก่อสร้าง เพื่อจำแนกความเสี่ยงในแต่ละลักษณะงาน โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากโครงการก่อสร้างอาคารพักอาศัยพร้อมสิ่งอำนวยความสะดวกของหน่วยงานภาครัฐในพื้นที่ปทุมธานี กรุงเทพมหานคร และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติ ได้แก่ การวิเคราะห์เชิงเนื้อหา ค่าความถี่ ค่าร้อยละ การทดสอบไคสแควร์ และการวิเคราะห์สหสัมพันธ์

ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญา ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงแบบและรายละเอียดงาน การเพิ่มหรือลดปริมาณงาน และการปรับเอกสารแนบท้ายสัญญา โดยแต่ละปัจจัยมีความถี่เท่ากัน คิดเป็นร้อยละ 22.22 ซึ่งสะท้อนว่าการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นจุดเริ่มต้นสำคัญของการเปลี่ยนแปลงสัญญา นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความสำคัญของปัจจัยพบว่า การเปลี่ยนแปลงแบบและรายละเอียดงานมีค่าดัชนีความสำคัญสูงสุด และอยู่ในระดับความเสี่ยงสูงมาก ในด้านความสัมพันธ์พบว่า ปัจจัยสาเหตุมีความสัมพันธ์กับประเภทของงานก่อสร้างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($\chi^2 = 18.76$, $p = 0.042$) โดยปัจจัยด้านการเปลี่ยนแปลงแบบและปริมาณงานมีความสัมพันธ์สูงกับงานสถาปัตยกรรมและงานระบบ ขณะที่ปัจจัยด้านสภาพหน้างานมีความสัมพันธ์กับงานโครงสร้างมากกว่า ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการบริหารความเสี่ยงและควบคุมการเปลี่ยนแปลงสัญญาในโครงการก่อสร้างภาครัฐได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การเปลี่ยนแปลงสัญญา ปัจจัยสาเหตุ งานก่อสร้างภาครัฐ

¹หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการบริหารงานก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

Corresponding author's e-mail: Sarayut.p0825@gmail.com

² มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย



Abstract

This research aimed to (1) identify and compile the causal factors leading to contract changes in public construction projects, (2) analyze and prioritize these factors based on their frequency and impact levels, and (3) examine the relationship between causal factors and construction work types to classify potential risks in each category. Data were collected from a government residential building project with facilities located in Prachachuen, Bangkok. The analysis employed content analysis, frequency, percentage, Chi-square test, and correlation analysis.

The study found that the main factors causing contract modifications were changes to the design and specifications, increases or decreases in scope of work, and adjustments to contract appendices. Each factor had equal frequency, at 22.22%, reflecting that design changes are a crucial starting point for contract modifications. Furthermore, an analysis of the importance of these factors revealed that changes to the design and specifications had the highest importance index and posed a very high-risk level. In terms of correlation, the causal factors were found to be statistically significantly related to the type of construction work at the 0.05 level ($\chi^2 = 18.76$, $p = 0.042$). Changes to the design and scope of work had a high correlation with architectural and systems work, while site conditions had a stronger correlation with structural work. These findings can be used as a guideline for effective risk management and control of contract modifications in government construction projects.

Keywords: Contract Change Order, Causal Factors, Public Construction

บทนำ

อุตสาหกรรมการก่อสร้างถือเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทย โดยเฉพาะโครงการก่อสร้างภาครัฐซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน การคมนาคมขนส่ง และระบบสาธารณูปโภคของประเทศ ทั้งนี้ อุตสาหกรรมการก่อสร้างมีความเชื่อมโยงกับการเติบโตทางเศรษฐกิจ การจ้างงาน และการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศในระยะยาว (สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2565) โครงการก่อสร้างภาครัฐส่วนใหญ่มักเป็นโครงการขนาดใหญ่ มีความซับซ้อนทั้งด้านวิศวกรรม การบริหารจัดการ และการควบคุมงบประมาณ อีกทั้งยังต้องดำเนินการภายใต้กรอบของพระราชบัญญัติการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ พ.ศ. 2560 ซึ่งกำหนดขั้นตอนและระเบียบปฏิบัติอย่างเคร่งครัด เพื่อให้เกิดความโปร่งใสและตรวจสอบได้ อย่างไรก็ตาม ความซับซ้อนของโครงการก่อสร้างภาครัฐมักนำไปสู่ปัญหาด้านการบริหารสัญญา โดยเฉพาะ “การแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญา” (Contract Change Order) ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความสำเร็จของโครงการทั้งด้านเวลา งบประมาณ และคุณภาพงานก่อสร้าง

ตามแนวความคิดการบริหารโครงการก่อสร้าง ของ Kerzner (2017) และ Project Management Institute (2021) ได้อธิบายว่า โครงการก่อสร้างเป็นระบบที่มีความไม่แน่นอนสูง จึงมีโอกาสเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่าง การดำเนินงานอยู่เสมอ ไม่ว่าจะเป็นด้านขอบเขตงาน ด้านเวลา หรืองบประมาณ โดยเฉพาะโครงการภาครัฐที่มี ผู้เกี่ยวข้องหลายฝ่าย ทั้งหน่วยงานเจ้าของโครงการ ผู้ออกแบบ ผู้ควบคุมงาน และผู้รับจ้าง ทำให้กระบวนการ ตัดสินใจและการบริหารความเปลี่ยนแปลงมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ แนวคิดด้านการบริหาร ความเสี่ยง ยังระบุว่า หากองค์กรไม่สามารถประเมินและควบคุมความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญา การล่าช้า และต้นทุนที่เพิ่มขึ้น (Hillson, 2016) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย ของ Hwang and Low (2012) ที่พบว่าปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงงานก่อสร้าง ได้แก่ ความคลาด เคลื่อนของแบบก่อสร้าง การเปลี่ยนแปลงความต้องการของเจ้าของโครงการ สภาพพื้นที่ก่อสร้างที่แตกต่างจาก ข้อมูลเดิม และข้อจำกัดด้านวัสดุหรือแรงงาน

นอกจากนี้ แนวคิดเกี่ยวกับการบริหารการเปลี่ยนแปลงในงานก่อสร้าง ของ Ibbs (2005) อธิบายว่า การเปลี่ยนแปลงสัญญาก่อสร้างมักเกิดจากการวางแผนโครงการที่ไม่ครอบคลุม การสำรวจข้อมูลเบื้องต้นที่ไม่ สมบูรณ์ หรือการสื่อสารระหว่างผู้เกี่ยวข้องที่ไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นจะส่งผลกระทบ โดยตรงต่อประสิทธิภาพของโครงการ ทั้งด้านต้นทุน เวลา และคุณภาพของงานก่อสร้าง สอดคล้องกับงานวิจัย ของ Love และคณะ (2010) ที่ระบุว่า การเปลี่ยนแปลงงานระหว่างก่อสร้างถือเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญของ ปัญหาโครงการล่าช้าและงบประมาณบานปลาย โดยเฉพาะในโครงการภาครัฐที่ต้องผ่านกระบวนการอนุมัติ หลายขั้นตอน อีกทั้งยังมีข้อจำกัดด้านกฎหมายและระเบียบราชการ ส่งผลให้การแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญา ใช้ระยะเวลานานและกระทบต่อแผนการดำเนินงานโดยรวม อีกทั้งงานวิจัยของ สุเมธ แสงนิมนวล และ คณะ (2562) พบว่า ปัจจัยที่ทำให้เกิดการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาในโครงการก่อสร้างภาครัฐส่วนใหญ่มาจาก ความไม่สมบูรณ์ของแบบก่อสร้าง การเปลี่ยนแปลงความต้องการของหน่วยงานเจ้าของโครงการ และสภาพ หน่วยงานที่แตกต่างจากข้อมูลเดิม ขณะที่งานวิจัยของ วีระชัย ศรีสุข (2564) ระบุว่า การเปลี่ยนแปลงสัญญา ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการส่งมอบงาน และเพิ่มต้นทุนโครงการอย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงอาจนำไปสู่ข้อพิพาท ระหว่างคู่สัญญา หากกระบวนการอนุมัติและการบริหารสัญญาไม่มีความชัดเจน ทั้งนี้ การแก้ไขเปลี่ยนแปลง สัญญาในภาครัฐยังส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการใช้จ่ายงบประมาณของภาครัฐ และอาจกระทบต่อความเชื่อมั่น ของประชาชนต่อการบริหารโครงการของภาครัฐในภาพรวม

จากสภาพปัญหาและแนวคิดดังกล่าว การศึกษาเรื่อง “การวิเคราะห์ปัจจัยสาเหตุที่ทำให้เกิด การแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาก่อสร้าง กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างภาครัฐแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร” จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากจะช่วยให้สามารถระบุปัจจัยเสี่ยงและสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงสัญญาได้อย่างเป็นระบบ โดยอาศัยแนวคิดด้านการบริหารโครงการ การบริหารความเสี่ยง และ การบริหารการเปลี่ยนแปลงในงานก่อสร้างเป็นกรอบในการวิเคราะห์ ทั้งนี้ผลการศึกษาจะเป็นประโยชน์ต่อ หน่วยงานภาครัฐ ผู้ออกแบบ และผู้รับจ้าง ในการกำหนดมาตรการป้องกัน วางแผนบริหารความเสี่ยง และ พัฒนาระบบบริหารสัญญาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อันจะนำไปสู่การลดปัญหาความล่าช้า การควบคุม งบประมาณ และการยกระดับคุณภาพของโครงการก่อสร้างภาครัฐในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.1 ผู้วิจัยทำการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิจัย
- 1.2 กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย
- 1.3 ทำการจำแนกประเภทของข้อมูลที่ต้องการเก็บรวบรวมข้อมูล
- 1.4 ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลจากกรณีศึกษา เพื่อทำการศึกษา
- 1.5 นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ข้อมูล และนำมาสรุปผล และจัดทำข้อเสนอแนะของงานวิจัย

2. รูปแบบการวิจัย

การวิจัยนี้เป็น การวิจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Data) โดยใช้วิธีการศึกษาเฉพาะกรณี มุ่งเน้นการวิเคราะห์เชิงลึกเกี่ยวกับปัจจัยสาเหตุที่ทำให้เกิดการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาณก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษา ผ่านการวิเคราะห์เอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการบริหารสัญญาณก่อสร้าง

3. ข้อมูลโครงการก่อสร้าง

โครงการก่อสร้างอาคารพักอาศัยพร้อมสิ่งอำนวยความสะดวกของสำนักงานภาครัฐแห่งหนึ่ง (พื้นที่ประชาชน) ตั้งที่ถนนประชาชื่น แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร ตั้งอยู่ในเนื้อที่ดินขนาด 16-3-80.9 ไร่ หรือ 27,123.6 ตารางเมตร

ส่วนพื้นที่พักอาศัย

พื้นที่ส่วนที่พักอาศัยของกำลังพลของสำนักงานภาครัฐมีเนื้อที่ 10-3-78.9 ไร่ หรือเท่ากับ 17,515.6 ตารางเมตรประกอบด้วยอาคารพักอาศัยเดิมสูง 4 ชั้น จำนวน 14 อาคาร สูง 3 ชั้นจำนวน 2 อาคาร และสูง 2 ชั้นจำนวน 2 อาคาร มีจำนวนห้องพักอาศัยรวม 350 ห้องโดยจะรื้อถอนอาคารพักอาศัยเดิมและก่อสร้างอาคารใหม่จำนวน 2 อาคารเพื่อรองรับกำลังพลและครอบครัวของกำลังพลของหน่วยงานดังนี้

อาคารพักอาศัยสูง 28 ชั้นจำนวน 2 อาคารมีความสูงจากระดับพื้นดินที่ก่อสร้างจนถึงระดับพื้นชั้นดาดฟ้าเท่ากับ 92.30 เมตรและที่ระดับสูงสุดของอาคาร (หลังคาคลุมถึงเก็บน้ำ) เท่ากับ 99.60 เมตร มีจำนวนห้องพักอาศัยรวม 644 ห้อง ที่จอดรถยนต์จำนวน 678 คัน ที่จอดรถจักรยานยนต์ 70 คัน และที่จอดรถจักรยาน 50 คัน มีพื้นที่อาคารรวมเท่ากับ 93,639.04 ตารางเมตร

4. การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ดำเนินการโดยใช้ข้อมูลจากโครงการกรณีศึกษาเป็นหลัก ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลจากเอกสารและข้อมูลเชิงคุณภาพ โดยมีขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลดังต่อไปนี้

4.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานของโครงการและเอกสารสัญญาจ้างก่อสร้าง ผู้วิจัยทำการศึกษาข้อมูลทั่วไปของโครงการกรณีศึกษา รวมถึงรายละเอียดของสัญญาจ้างก่อสร้าง ขอบเขตงาน เงื่อนไขในสัญญา และระยะเวลาดำเนินโครงการ เพื่อทำความเข้าใจบริบทและกรอบการบริหารสัญญาของโครงการ

4.2 รวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาณก่อสร้างทั้งหมดในโครงการกรณีศึกษาโดยรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้อง เช่น คำสั่งเปลี่ยนแปลงงาน หนังสือสั่งการ รายงานการประชุม และเอกสารประกอบการพิจารณาแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาณก่อสร้าง เพื่อใช้เป็นข้อมูลหลักในการวิเคราะห์

4.3 ตรวจสอบและจัดหมวดหมู่เอกสารตามประเภทของการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาก่อสร้างผู้วิจัยทำการตรวจสอบความครบถ้วนและความถูกต้องของเอกสาร จากนั้นจัดหมวดหมู่เอกสารตามลักษณะและประเภทของการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาก่อสร้าง เพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการวิเคราะห์ได้อย่างเป็นระบบ

4.4 เก็บข้อมูลเพิ่มเติมจากการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้อง (ถ้ามี) ในกรณีที่ข้อมูลเอกสารยังไม่เพียงพอผู้วิจัยอาจเก็บข้อมูลเพิ่มเติมจากการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารสัญญาโครงการ เช่น ผู้แทนเจ้าของโครงการ หรือผู้ควบคุมงาน ทั้งนี้เพื่อยืนยันและอธิบายข้อมูลที่ได้จากเอกสาร โดยใช้การสัมภาษณ์แบบไม่เป็นทางการและไม่ใช้แบบสอบถาม

5. วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้ใช้ การวิเคราะห์เชิงเนื้อหา โดยอาศัยข้อมูลจากเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการบริหารสัญญาก่อสร้าง ได้แก่ สัญญาก่อสร้าง คำสั่งเปลี่ยนแปลงงาน รายงานการประชุม และเอกสารประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และใช้เครื่องมือในการวิจัยแบบร้อยละและแผนภูมิ ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลดังต่อไปนี้

1. วิเคราะห์ลักษณะและประเภทของการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาก่อสร้าง โดยพิจารณาจากเนื้อหาในเอกสารคำสั่งเปลี่ยนแปลงงาน เพื่อกำหนดประเภทของการแก้ไขเปลี่ยนแปลง เช่น การเปลี่ยนแปลงรายละเอียดแบบก่อสร้าง การเพิ่มหรือลดขอบเขตงาน และการปรับวิธีการดำเนินงานก่อสร้าง

2. จำแนกและจัดกลุ่มปัจจัยสาเหตุของการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาก่อสร้างตามกรอบงานวิจัย ผู้วิจัยได้จัดกลุ่มปัจจัยสาเหตุออกเป็น 5 กลุ่มหลัก ได้แก่

(1) ปัจจัยด้านการออกแบบ เช่น งานสถาปัตยกรรม ที่เน้นความสวยงาม ทำให้ไม่สอดคล้องกับการก่อสร้างในพื้นที่จริง จึงต้องมีการปรับแก้แบบ หรือวัสดุ เป็นต้น

(2) ปัจจัยด้านเจ้าของโครงการ เช่น เจ้าของโครงการส่งมอบพื้นที่ล่าช้า เป็นต้น

(3) ปัจจัยด้านผู้รับเหมา เช่น ผู้รับเหมาไม่ทำงานตามแบบหรือทำงานล่าช้ากว่ากำหนด ทำให้ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการส่งมอบงาน เป็นต้น

(4) ปัจจัยด้านสัญญาและการบริหารสัญญา เช่น เกิดจากร้องเรียนข้อผิดพลาดในเรื่องข้อบังคับเกี่ยวกับอาคาร ผังเมืองและความปลอดภัย เป็นต้น

(5) ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมและปัจจัยภายนอกโดยพิจารณาความสอดคล้องของเหตุผลการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญากับแต่ละกลุ่มปัจจัย

3. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาก่อสร้าง เพื่อพิจารณาว่าการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาก่อสร้างในแต่ละรายการมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยใดบ้าง และมีลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลายด้านร่วมกันหรือไม่ โดยเน้นการวิเคราะห์เชิงปริมาณจากข้อมูลจริงที่ไดรวรรวบรวมจากเอกสารจริง และ BOQ ที่มีข้อมูลราคาวัสดุ ความล่าช้าและจำนวนครั้ง นำเสนอในรูปแบบตาราง โดยนำข้อมูลมาวิเคราะห์แบบแผนภูมิเพื่อให้เห็นการเปรียบเทียบ

4.สรุปผลการวิเคราะห์และสังเคราะห์เป็นข้อเสนอแนะเชิงการบริหารโดยนำผลการวิเคราะห์ทั้งหมดมาสังเคราะห์เพื่อสรุปประเด็นสำคัญ และเสนอแนะแนวทางในการบริหารสัญญาก่อสร้าง เพื่อลดโอกาสการเกิดการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาก่อสร้างในโครงการลักษณะเดียวกันในอนาคต

ผลการวิจัย

1. ปัจจัยสาเหตุที่นำไปสู่การแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาในโครงการก่อสร้างภาครัฐ

ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาในโครงการนี้ มี 3 ประการสำคัญ ที่พบมากที่สุดเท่ากัน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงแบบและรายละเอียดงาน การเพิ่มหรือลดปริมาณงาน รวมถึงการเพิ่มหรือยกเลิกงาน และการปรับเอกสารแนบท้ายสัญญา จวงงาน และเงื่อนไขการจ่ายเงิน โดยแต่ละปัจจัยเกิดขึ้น 2 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 22.22 ของความถี่รวมทั้งหมด สะท้อนให้เห็นว่า จุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงสัญญาเกิดจากการปรับแบบและรายละเอียดงาน ซึ่งส่งผลต่อเนื่องไปยังขอบเขตงาน เอกสารสัญญา และเงื่อนไขทางการเงินของโครงการ

การแก้ไขครั้งที่ 1 มีลักษณะเป็นการปรับแก้เชิงเทคนิคของงานก่อสร้าง โดยมีการเปลี่ยนแปลงงาน 10 รายการ เช่น การปรับระบบบำบัดน้ำเสีย งานระบายน้ำ งานถนน งานไฟฟ้า งานโทรศัพท์ และงานภูมิทัศน์ รวมถึงการแก้ไขจวงงานและระยะเวลาดำเนินงาน จึงชี้ให้เห็นว่า ปัจจัยด้านการเปลี่ยนแปลงแบบและขอบเขตงานเป็นสาเหตุสำคัญในระยะแรกของโครงการ

การแก้ไขครั้งที่ 2 มีลักษณะแตกต่างจากครั้งอื่น เนื่องจากไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงงานก่อสร้างโดยตรง แต่เป็นการปรับเงื่อนไขของสัญญาให้สอดคล้องกับมาตรการช่วยเหลือของภาครัฐในช่วงการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 โดยเฉพาะเรื่องการนับระยะเวลาและค่าปรับ แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยด้านนโยบายหรือมาตรการภาครัฐก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ต้องมีการแก้ไขสัญญา

การแก้ไขครั้งที่ 3 เป็นครั้งที่มีรายละเอียดมากที่สุด โดยมีการเปลี่ยนแปลงงานถึง 19 รายการ ครอบคลุมทั้งงานสถาปัตยกรรม งานระบบ และรายละเอียดการใช้งานอาคารหลายส่วน อีกทั้งยังเกี่ยวข้องกับเหมาะสมของการใช้งานจริง ความปลอดภัยของอาคาร และสภาพหน้างาน รวมถึงมีการปรับแก้เอกสารแนบท้ายสัญญาและรายการแบ่งจวงงานเพิ่มเติม จึงสะท้อนว่า การแก้ไขสัญญาในระยะหลังมีความซับซ้อนมากขึ้นและเชื่อมโยงทั้งด้านเทคนิค การใช้งานจริง และการบริหารสัญญา

2. ผลการวิเคราะห์และจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญา ทั้งในด้านของเวลาที่เกิดขึ้นและระดับของผลกระทบ

ปัจจัยที่มีค่าดัชนีความสำคัญสูงสุด คือ การเปลี่ยนแปลงแบบและรายละเอียดงาน อยู่ในระดับความเสี่ยงสูงมาก โดยปัจจัยด้านการออกแบบและรายละเอียดทางวิศวกรรมมีผลกระทบโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญา ทั้งในด้านปริมาณงาน งบประมาณ และระยะเวลาดำเนินโครงการ รองลงมาคือ การเพิ่มหรือลดปริมาณงาน และการปรับเอกสารแนบท้ายสัญญาและจวงงาน สำหรับปัจจัยที่มีค่าดัชนีความสำคัญต่ำที่สุด คือ มาตรการภาครัฐ (โควิด-19)

3. ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสาเหตุและประเภทของโครงการก่อสร้างในกรณี ศึกษา เพื่อจำแนกความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละลักษณะงาน



ปัจจัยสาเหตุและประเภทงานก่อสร้าง สามารถแสดงผลการศึกษาตามหมวดงานหลัก 3 หมวด

ได้แก่

- 3.1 งานสถาปัตยกรรม พบว่า เป็นประเภทงานที่ได้รับผลกระทบจากการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญา มากที่สุด โดยเฉพาะปัจจัยการเปลี่ยนแปลงแบบและรายละเอียดงาน และการเพิ่ม/ลดปริมาณงาน
- 3.2 งานระบบ (Mechanical & Electrical Work) พบว่า มีความถี่รองลงมา โดยปัจจัยหลักคือ การเปลี่ยนแปลงแบบและรายละเอียดงาน
- 3.3 งานโครงสร้าง (Structural Work) พบว่า มีความถี่น้อยที่สุด โดยปัจจัยหลักคือ การเพิ่ม/ลด ปริมาณงาน

ทั้งนี้ปัจจัยสาเหตุและประเภทงานก่อสร้างตามหมวดงานหลัก มีความสัมพันธ์กับประเภทงานก่อสร้างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยมีค่า $\chi^2 = 18.76$ และค่า p-value = 0.042 แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความถี่ของปัจจัยสาเหตุและประเภทงานก่อสร้าง

ปัจจัยสาเหตุ \ ประเภทงาน	โครงสร้าง	สถาปัตยกรรม	งานระบบ	รวม
.1 การเปลี่ยนแปลงแบบและรายละเอียดงาน	3	8	5	16
.2 การเพิ่ม / ลดปริมาณงาน	4	6	4	14
.3 การปรับเอกสารแนบท้ายสัญญาและงวดงาน	2	5	3	10
.4 ข้อจำกัดด้านเวลาและเงื่อนไขการทำงาน	2	3	2	7
.5 ความเหมาะสมในการใช้งานและสภาพหน้างาน	3	4	3	10
.6 มาตรการภาครัฐ (โควิด -19)	1	1	1	3
รวม	15	27	18	60
$\chi^2 = 18.76$ df = 10 Sig = 0.042*				

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ในส่วนของปัจจัยสาเหตุของการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญามีความสัมพันธ์กับประเภทของงานก่อสร้างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะปัจจัยด้านการเปลี่ยนแปลงแบบและปริมาณงาน ($r = 0.82, 0.70$) ซึ่งมีความสัมพันธ์สูงกับงานสถาปัตยกรรมและงานระบบ ในขณะที่ปัจจัยด้านความเหมาะสมในการใช้งานและสภาพหน้างาน ($r = 0.68$) มีความสัมพันธ์กับงานโครงสร้างมากกว่า

อภิปรายผลและสรุปผล

จากผลการวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์ปัจจัยสาเหตุที่ทำให้เกิดการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาก่อสร้างกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างภาครัฐแห่งหนึ่งในเขตปริมณฑล กรุงเทพมหานคร ครั้งนี้ สามารถอภิปรายผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1. ปัจจัยสาเหตุที่นำไปสู่การแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาในโครงการก่อสร้างภาครัฐ

จากผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดการแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาได้แก่ การเปลี่ยนแปลงแบบและรายละเอียดงาน การเพิ่มหรือลดปริมาณงาน และการปรับเอกสารแนบท้ายสัญญา ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงแบบ เป็นจุดเริ่มต้นสำคัญที่ส่งผลต่อเนื่องไปยังขอบเขตงาน เอกสารสัญญา และเงื่อนไขทางการเงินของโครงการ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชนิภา วงศ์ไพฑูรย์ (2560) ที่พบว่า ความไม่สมบูรณ์ของแบบก่อสร้างและการปรับเปลี่ยนความต้องการของเจ้าของโครงการเป็นสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนแปลงงาน โดยเฉพาะในโครงการที่มีความซับซ้อน และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ คุณากร แป้นเหลือ และ จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง (2558) ที่ระบุว่า การเปลี่ยนแปลงงานเกิดจากความไม่สอดคล้องระหว่างแบบกับสภาพหน้างาน รวมถึงการปรับขอบเขตงานและความคลาดเคลื่อนของเอกสาร ซึ่งตรงกับผลการศึกษาที่พบการแก้ไขเชิงเทคนิคจำนวนมากในช่วงต้นของโครงการ ในส่วนของการแก้ไขครั้งที่ 2 ซึ่งเกิดจากมาตรการภาครัฐในช่วงโควิด-19 สะท้อนให้เห็นว่า ปัจจัยภายนอกสามารถมีอิทธิพลต่อการแก้ไขสัญญาได้ แม้จะไม่ได้เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างโดยตรง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ อารญา โบขุนทด และ วรณวิทย์ เต็มทอง (2568) ที่กล่าวว่า ความเสี่ยงที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงการ และในขณะที่ยังการแก้ไขครั้งที่ 3 ซึ่งมีความซับซ้อนและครอบคลุมหลายระบบ สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุภัสสณห์ พินิจปริษา และมงคล อัสวดีลักฤทธิ์ (2563) ที่พบว่า การออกแบบที่ไม่ครบถ้วนตั้งแต่ต้นเป็นจุดเริ่มต้นของปัญหา และนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงงานในระยะหลังที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

2. ผลการวิเคราะห์และจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อ การแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญา ทั้งในด้านของ ความถี่ที่เกิดขึ้น และระดับของผลกระทบ

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยที่มีความสำคัญสูงสุด คือ การเปลี่ยนแปลงแบบและรายละเอียดงาน ซึ่งอยู่ในระดับความเสี่ยงสูงมาก รองลงมาคือ การเพิ่มหรือลดปริมาณงาน และการปรับเอกสารแนบท้ายสัญญา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramadhan & Waty (2025) ที่พบว่า การเปลี่ยนแปลงแบบเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนและระยะเวลาโครงการมากที่สุด และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ ฉัตรชัย มงคลหนู (2554) ที่พบว่า ความไม่ชัดเจนของ BOQ และการขาดมาตรฐานกลาง เป็นสาเหตุสำคัญที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงปริมาณงานและเอกสารสัญญา ซึ่งในขณะเดียวกัน ปัจจัยด้านมาตรการภาครัฐมีความสำคัญต่ำสุด ซึ่งสะท้อนว่า ปัจจัยภายนอกมีผลเฉพาะช่วงเวลา และไม่ใช่สาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงสัญญาในภาพรวม

3. ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสาเหตุและประเภทของโครงการก่อสร้างในกรณีศึกษา เพื่อจำแนกความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละลักษณะงาน

จากผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยสาเหตุมีความสัมพันธ์กับประเภทงานก่อสร้างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะปัจจัยด้านการเปลี่ยนแปลงแบบและปริมาณงาน ซึ่งมีความสัมพันธ์สูงกับงานสถาปัตยกรรมและงานระบบ ขณะที่ปัจจัยด้านสภาพหน้างานมีความสัมพันธ์กับงานโครงสร้างมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ

งานวิจัยของ Sukardi และ Biantoro (2025) ที่พบว่า ปัจจัยด้านการออกแบบ เอกสาร และสภาพแวดล้อม มีอิทธิพลต่อการเกิด Contract Change Order แตกต่างกันตามประเภทงาน และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rudi Waluyo และ Novelia Putri Angelica (2025) ที่ระบุว่า ปัจจัยด้านการบริหารสัญญาและการวางแผนมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาอย่างมีนัยสำคัญ และจากผลการศึกษายังพบอีกว่า การแก้ไขเปลี่ยนแปลงสัญญาส่งผลกระทบต่อระยะเวลา งบประมาณ และความซับซ้อนของโครงการ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Astana และคณะ (2025) ที่พบว่า การเปลี่ยนแปลงสัญญามีผลเชิงลบต่อประสิทธิภาพโครงการ

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย

1. การพัฒนามาตรฐานการออกแบบและตรวจสอบแบบก่อสร้าง (Design Standardization) หน่วยงานภาครัฐควรกำหนดมาตรฐานกลางในการออกแบบและตรวจสอบแบบก่อสร้างให้มีความครบถ้วนถูกต้อง และสอดคล้องกับสภาพพื้นที่จริง ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการจัดซื้อจัดจ้าง เพื่อลดความจำเป็นในการแก้ไขแบบระหว่างดำเนินโครงการ
2. การกำหนดแนวทางบริหารการเปลี่ยนแปลงสัญญา (Change Management Framework) ควรมีการจัดทำแนวทางหรือคู่มือกลางสำหรับการบริหารจัดการการเปลี่ยนแปลงสัญญา (Contract Change Order: CCO) อย่างเป็นระบบ เช่น ขั้นตอนการอนุมัติ การประเมินผลกระทบ และการติดตามผล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมต้นทุนและระยะเวลา
3. การปรับปรุงมาตรฐานเอกสาร BOQ และสัญญาก่อสร้าง ควรกำหนดรูปแบบและมาตรฐานของบัญชีปริมาณงาน (BOQ) และเอกสารสัญญาให้มีความชัดเจน ครอบคลุม และเป็นมาตรฐานเดียวกัน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการตีความและการคำนวณงานเปลี่ยนแปลง
4. การส่งเสริมการบริหารความเสี่ยงในโครงการก่อสร้างภาครัฐ หน่วยงานภาครัฐควรส่งเสริมให้มีการนำแนวคิดการบริหารความเสี่ยง (Risk Management) มาใช้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้นของโครงการ โดยเฉพาะการประเมินความเสี่ยงด้านแบบ ขอบเขตงาน และปัจจัยภายนอก
5. การบูรณาการเทคโนโลยีในการบริหารโครงการ (Digital Construction Management) ควรสนับสนุนการใช้เทคโนโลยี เช่น BIM (Building Information Modeling) และระบบติดตามโครงการแบบดิจิทัล เพื่อช่วยลดความคลาดเคลื่อนของแบบ และเพิ่มความแม่นยำในการวางแผนและควบคุมงาน

ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติ

1. การตรวจสอบแบบก่อสร้างอย่างละเอียดก่อนเริ่มโครงการ ผู้เกี่ยวข้องควรมีการตรวจสอบแบบ (Design Review) และการประสานงานระหว่างฝ่ายออกแบบ วิศวกร และผู้ควบคุมงานอย่างรอบคอบ เพื่อลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงแบบในระหว่างก่อสร้าง
2. การสำรวจสภาพหน้างานอย่างครบถ้วน (Site Investigation) ควรดำเนินการสำรวจพื้นที่จริงอย่างละเอียดก่อนการออกแบบ เพื่อให้แบบก่อสร้างสอดคล้องกับสภาพพื้นที่ ลดปัญหาการแก้ไขงานโครงสร้างและระบบในภายหลัง

เอกสารอ้างอิง

คุณากร แป้นเหลือ และจักรพงษ์ พงษ์เพ็ง. (2558). สาเหตุ ผลกระทบและแนวทางการลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงงาน กรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีเหลือง ช่วงบางบริ้ว-สมุทรปราการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฉัตรชัย มงคลหนู. (2554). การศึกษาแนวทางการดำเนินงานเปลี่ยนแปลง งานก่อสร้างอาคารสูงของสัญญาจ้างเหมาก่อสร้างในหน่วยงานเอกชน. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ชนิกา วงศ์ไพฑูรย์. (2560). การศึกษาการเปลี่ยนแปลงงานในงานก่อสร้างอาคารภาครัฐ กรณีศึกษา อาคารโรงพยาบาลของรัฐ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

วีระชัย ศรีสุข. (2564). ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าและการแก้ไขสัญญาในโครงการก่อสร้างภาครัฐ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์และการบริหารงานก่อสร้าง, 9(2), 45–58.

สุกสณฑ์ พินิจปรีชา และมงคล อัสวดีลฤทธิ. (2563). การศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดงานเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อต้นทุนการพัฒนาอสังหาริมทรัพย์. วิทยานิพนธ์ ปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุเมธ แสงนิมิต, และคณะ. (2562). การวิเคราะห์สาเหตุการเปลี่ยนแปลงงานในโครงการก่อสร้างภาครัฐ

ของประเทศไทย. วารสารวิจัยและพัฒนาด้านวิศวกรรมศาสตร์, 14(1), 77–89.

สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2565). รายงานภาวะเศรษฐกิจไทย ปี 2565. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ.

อารญา โบขุนทด และวรรณวิทย์ แต้มทอง. (2568). การศึกษาต้นทุนทางตรง ทางอ้อม และงานเปลี่ยนแปลง

ของงานก่อสร้างคลังสินค้า. การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 30 วันที่ 28-30 พฤษภาคม 2568 จ.ประจวบคีรีขันธ์. หน้า CEM-07-1- CEM-07-8.

Astana, A. & et al. (2025). The impact of contract change orders on project performance and customer satisfaction. *Journal of Social Research*, 2(5), 1691–1707; DOI: <https://doi.org/10.55324/josr.v2i5.875>

Hillson, D. (2016). *The risk management handbook: A practical guide to managing the multiple dimensions of risk*. London, England: Kogan Page.

Hwang, B. G., & Low, L. K. (2012). Construction project change management in Singapore: Status, importance and impact. *International Journal of Project Management*, 30(7), 817–826.

Ibbs, C. W. (2005). Impact of change's timing on labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(11), 1219–1223.

Kerzner, H. (2017). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling*. Hoboken, NJ: Wiley.



- Love, P. E. D., Edwards, D. J., & Irani, Z. (2010). Moving beyond optimism bias and strategic misrepresentation: An explanation for social infrastructure project cost overruns. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 59(4), 560–571.
- Ramadhan, J.S & Waty, M. (2025). Impact of Change Orders on Cost Overruns and Delays in Large-Scale Construction Projects. *Eng. Technol. Appl. Sci*, 15(1), 20291–20299.
- Rudi, W, & Novelia, P.A. (2025). Model of Influence of Contract Change Order Dimensions To Construction Project Performance. *Jurnal Civil Engineering Study*, 5(2), 446-460.
- Sukardi, A. & Biantoro, M. (2025). Factors affecting contract change orders and their impact on cost and time in construction projects. *Buildings*, 15(1), 87; <https://doi.org/10.3390/buildings15010087>



การพัฒนารวมวิธีการสกัดและทำให้บริสุทธิ์ของเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือกสับปะรดเหลือทิ้ง

Development of Extraction and Purification methods of Bromelain from Pineapple Peel Waste.

จันทร์จิรา ใจดำ¹ และ มุฮัมมัด นียมเดชา¹

Janjira Jaidam¹ and Muhammad Niyomdech¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารวมวิธีการสกัดและเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือกสับปะรดบ้านคา สายพันธุ์ปัตตาเวีย จังหวัดราชบุรี โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการสกัดด้วยการกวนสารละลายแบบดั้งเดิมโดยใช้เครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer Extraction: MSE) และการสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave-Assisted Extraction: MAE) ผลการศึกษาพบว่า วิธี MAE ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าในทุกตัวชี้วัด โดยสารสกัดหยาบ (Crude MAE) มีปริมาณโปรตีนรวมที่ 3.12 mg/ml และกิจกรรมของเอนไซม์ที่ 185.30 Unit/ml เมื่อผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ด้วยการตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 40% ร่วมกับการไดอะไลซิส พบว่ากิจกรรมจำเพาะ (Specific Activity) ของเอนไซม์เพิ่มขึ้นทั้ง 2 วิธี โดยสารสกัดบริสุทธิ์จากวิธีการสกัดด้วยไมโครเวฟ (Purified MAE) ให้ค่ากิจกรรมจำเพาะสูงสุดที่ 138.67 Unit/mg จากนั้นนำ Purified MAE มายืนยันเอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SDS-PAGE ปรากฏแถบโปรตีนหลักในช่วงน้ำหนักโมเลกุล 23-28 kDa ซึ่งสอดคล้องกับคุณลักษณะของเอนไซม์โบรมิเลน และผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค LC-MS/MS ยืนยันว่าองค์ประกอบหลัก คือ Stem Bromelain โดยมีค่า exponentially modified protein abundance index (emPAI) สูงสุดที่ 2.86 นอกจากนี้ยังตรวจพบ Fruit Bromelain และ Ananain ร่วมด้วย สรุปได้ว่ารวมวิธีการสกัดด้วย คลื่นไมโครเวฟร่วมกับการทำให้บริสุทธิ์ที่พัฒนาขึ้น สามารถรักษาความคงสภาพทางชีวภาพและโครงสร้างของเอนไซม์ไว้ได้อย่างสมบูรณ์ แสดงถึงศักยภาพในการนำเปลือกสับปะรดเหลือทิ้งมาเพิ่มมูลค่าเป็นสารออกฤทธิ์ทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมเวชสำอางตามแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียน

¹ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

Department of Chemistry, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand



คำสำคัญ : โบรมิเลน, เปลือกสับปะรด, การสกัดด้วยการกวนสารละลายแบบดั้งเดิมด้วยเครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก (MSE), การสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (MAE), การทำให้บริสุทธิ์, การยืนยันเอกลักษณ์ของเอนไซม์ โบรมิเลน

Abstract

This research aims to develop extraction and purification processes for bromelain enzymes from Ban Kha pineapple peels (Pattavia cultivar) in Ratchaburi Province. The study compared the efficiency of conventional Magnetic Stirrer Extraction (MSE) with Microwave-Assisted Extraction (MAE). The results demonstrated that MAE outperformed MSE across all indicators. The crude extract from MAE (Crude MAE) yielded a total protein content of 3.12 mg/ml and an enzyme activity of 185.30 Unit/ml. Following the purification process using 40% ammonium sulfate precipitation combined with dialysis, the specific activity of the enzymes increased in both methods. The purified extract from the microwave-assisted method (Purified MAE) achieved the highest specific activity at 138.67 Unit/mg. Identity verification via SDS-PAGE revealed a primary protein band within the molecular weight range of 23–28 kDa, consistent with the characteristics of bromelain. Furthermore, LC-MS/MS analysis confirmed that the major component was Stem Bromelain, with a peak exponentially modified protein abundance index (emPAI) of 2.86, while also detecting Fruit Bromelain and Ananain. In conclusion, the developed microwave-assisted extraction combined with the purification process effectively preserves the biological stability and structural integrity of the enzyme. This highlights the potential of utilizing waste pineapple peels to create value-added alternative active ingredients for the cosmeceutical industry, aligning with circular economy principles.

Keywords: Bromelain, Pineapple Peel, Magnetic Stirrer Extraction (MSE), Microwave-Assisted Extraction (MAE), Purification, Bromelain characterization

บทนำ

สับปะรด (*Ananas comosus*) จัดเป็นผลไม้เขตร้อนที่ได้รับความนิยมและบริโภคอย่างแพร่หลายทั่วโลก จัดอยู่ในวงศ์ Bromeliaceae (Popluechai et al., 2007) สามารถปลูกได้ดีในประเทศเขตร้อนและกึ่งร้อน เช่น ไทย อินโดนีเซีย มาเลเซีย อินเดีย เกาหลี จีน และฟิลิปปินส์ เนื่องจากสับปะรดมีรสชาติหวานอมเปรี้ยวที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว จึงเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมในการบริโภคในหลายประเทศ และมีความสำคัญทางเศรษฐกิจในระดับโลก (Kansakar et al., 2024)

จังหวัดราชบุรีเป็นแหล่งเพาะปลูกสับปะรดสายพันธุ์ปัตตาเวียที่สำคัญของประเทศไทย โดยมีพื้นที่ปลูกคิดเป็น 9% ของพื้นที่ทั้งประเทศ ครอบคลุมอำเภอบ้านคา สวนผึ้ง ปากท่อ และจอมบึง โดยเฉพาะ “สับปะรดบ้านคา” ซึ่งมีเอกลักษณ์ด้านรสชาติหวานฉ่ำ เนื้อละเอียด และกลิ่นหอมเฉพาะตัว จนได้รับการขึ้นทะเบียนเป็นสินค้าสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (Geographical Indication, GI) (Department of Intellectual Property, 2021) ส่งผลให้เป็นผลไม้เศรษฐกิจหลักที่สร้างรายได้ทั้งในรูปแบบผลสดและผลิตภัณฑ์แปรรูปสู่ตลาดทั้งในและต่างประเทศ อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตและแปรรูปดังกล่าวได้ก่อให้เกิดปริมาณกากเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมาก โดยเฉพาะเปลือกสับปะรด ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนถึง 30–40% ของน้ำหนักผลผลิตโดยรวม และ มักถูกกำจัดทิ้งโดยไม่มีการนำกลับ ไปใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่า (Pavan et al., 2012) ส่งผลให้เกิดปัญหา ด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การเน่าเสีย การปลดปล่อยกลิ่นไม่พึงประสงค์ และการสะสมของของเสียทางชีวภาพ ในพื้นที่เกษตรและโรงงานแปรรูป

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นของเปลือกสับปะรด พบว่า มีสารอาหารที่เป็นประโยชน์หลายชนิด ได้แก่ ไขมันร้อยละ 5.57 โปรตีนร้อยละ 5.78 เส้นใยหยาบร้อยละ 4.10 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 75.68 นอกจากนี้ ยังมีรายงานเปลือกสับปะรดยังอุดมไปด้วยสารพฤกษเคมีที่มีคุณสมบัติทางชีวภาพสูง เช่น อัลคาลอยด์ (Alkaloids) สารฟีนอลิก (Phenolic compounds) แทนนิน (Tannins) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) และซาโปนิน (Saponins) อีกทั้ง สับปะรดยังถือเป็นแหล่งสำคัญของเอนไซม์โบรมีเลน คือ โบรมีเลน (Bromelain) (Gharage et al., 2024) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่มีคุณสมบัติทางชีวภาพที่โดดเด่น โดยเฉพาะความสามารถในการย่อยโปรตีน ซึ่งเกิดจากการมีเอนไซม์ในกลุ่มซัลไฟดริลโบรมีเลส (Sulfhydryl proteolytic enzymes) ที่มีหมู่ซัลไฟดริล (-SH) เป็นส่วนสำคัญของโครงสร้าง ทำให้โบรมีเลนสามารถทำลายพันธะเปปไทด์ในโปรตีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Abbas et al., 2021)

โบรมีเลน จัดเป็นสารธรรมชาติที่พบได้ในสับปะรดและถูกนำมาใช้ในรูปแบบยาสมุนไพรมาอย่างยาวนาน มีศักยภาพทางเภสัชวิทยาและเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีฤทธิ์สูง ซึ่งส่งผลให้โบรมีเลนมีคุณสมบัติทางชีวภาพ ที่หลากหลาย ทั้งในด้านการย่อยโปรตีน (Proteolytic activity) การสลายลิ่มเลือด (Fibrinolytic activity) การป้องกันการเกิดลิ่มเลือด (Antithrombotic effect) รวมถึงฤทธิ์ด้านการอักเสบ (Anti-inflammatory) ด้านเชื้อรา (Antifungal) ด้านเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial) และต้านมะเร็ง (Anticancer activity) (Agrawal et al., 2022)

จากรายงานการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้โบรมีเลนร่วมกับการรักษาแบบดั้งเดิมสามารถให้ผลเสริมฤทธิ์ที่ดีในทางคลินิก โดยเฉพาะในโรคติดเชื้อและภาวะอักเสบต่างๆ โดยงานวิจัยของ Ali และคณะ (2015) พบว่า โบรมีเลนในรูปแบบสารสกัดหยาบ (Crude Bromelain) มีศักยภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรค เช่น *Escherichia coli* (*E. coli*) และ *Proteus species* (*Proteus spp.*) โดยเฉพาะในสภาวะที่มีความเป็นด่าง (pH 10.0) จะแสดงฤทธิ์ในการยับยั้งได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่า โบรมีเลน มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่าเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (Ali et al., 2015) ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโบรมีเลน



เป็นสารสกัดธรรมชาติที่มีศักยภาพสูงในการพัฒนาเป็นสารต้านจุลชีพ (Antimicrobial agent) ซึ่งสามารถต่อยอดการประยุกต์ใช้ในด้านเวชภัณฑ์และผลิตภัณฑ์ชีวภาพเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนากรรมวิธีการสกัด รวมถึงการทำให้เอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือกส้มแปะรดเหลือทิ้งในจังหวัดราชบุรีให้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น เพื่อประเมินคุณลักษณะทางเคมีซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญในการต่อยอดสู่การเป็นสารออกฤทธิ์เชิงพาณิชย์ในอุตสาหกรรมเวชสำอางต่อไปในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการสกัดเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือกส้มแปะรด ระหว่างวิธีการสกัดด้วยการกวนสารละลายแบบดั้งเดิมด้วยเครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer Extraction: MSE) และวิธีการสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave-Assisted Extraction: MAE)
2. เพื่อศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือกส้มแปะรด ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมซัลเฟต (Ammonium Sulfate Precipitation) และการไดอะไลซิส (Dialysis)
3. เพื่อวิเคราะห์เอกลักษณ์และยืนยันชนิดของเอนไซม์โบรมิเลนด้วยเทคนิค SDS-PAGE และ LC-MS/MS เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้เป็นสารออกฤทธิ์ในอุตสาหกรรมเวชสำอาง

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุพืช

เปลือกส้มแปะรดบ้านคา สายพันธุ์ปัตตาเวีย จากอำเภอสวนผึ้ง จังหวัดราชบุรี ประเทศไทย

สารเคมี

Phosphate Buffer (pH 7.0), Ammonium Sulfate ((NH₄)₂SO₄), Casein, Bradford Reagent, Bovine Serum Albumin (BSA), น้ำกลั่น

อุปกรณ์และเครื่องมือ

เครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer), เครื่องไมโครเวฟ (Microwave Oven), เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge), เครื่องปั่นละเอียด (Blender), เยื่อเลือกผ่าน (Dialysis) ขนาดรูพรุน 6-8 kDa (6-8 kDa MWCO), เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer), ชุดอุปกรณ์แยกโปรตีนด้วยกระแสไฟฟ้า (SDS-PAGE System), เครื่อง Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry (LC-MS/MS)

วิธีการ

วิธีการดำเนินงานวิจัย เริ่มต้นจากการเตรียมวัตถุดิบโดยการคัดเลือกเปลือกส้มแปะรดบ้านคา สายพันธุ์ปัตตาเวีย จากอำเภอสวนผึ้ง จังหวัดราชบุรี นำมาล้างทำความสะอาด หั่นเป็นชิ้นเล็ก และปั่นละเอียด ร่วมกับสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate Buffer) pH 7.0 ในอัตราส่วน 1:5 (w/v) จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้เข้าสู่กระบวนการเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการสกัดเอนไซม์โบรมิเลนด้วย 2 วิธี ได้แก่ วิธีการสกัดด้วยการ



กวนสารละลายแบบดั้งเดิมด้วยเครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก (MSE) ในสภาวะเย็นเป็นเวลา 60 นาที และวิธีการสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (MAE) โดยใช้กำลังไฟ 200 วัตต์ ให้ความร้อนแบบเป็นช่วงๆ รวมระยะเวลา 10 นาที ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 50°C เมื่อครบกำหนดเวลาตามสภาวะที่ตั้งไว้ จึงนำสารสกัดที่ได้จากทั้ง 2 วิธีไปปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 10,000 rpm เป็นเวลา 15 นาที เพื่อเก็บส่วนสารละลายใส (Supernatant) โดยสารละลายใสที่ได้จากแต่ละวิธีการสกัดจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 นำไปผ่านกระบวนการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Dry) เพื่อเตรียมเป็นสารสกัดหยาบในรูปแบบผง ได้แก่ Crude MSE และ Crude MAE และส่วนที่ 2 นำไปดำเนินการต่อในกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) เพื่อให้ได้ Purified MSE และ Purified MAE สำหรับการศึกษาในลำดับถัดไป

สำหรับกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Purification) สารสกัดส่วนที่ 2 จากทั้ง 2 วิธีจะถูกนำมาตกตะกอนโปรตีนด้วยแอมโมเนียมซัลเฟต (Ammonium Sulfate) ที่ความเข้มข้น 40% โดยทำการเติมสารละลายอย่างช้าๆ ในสภาวะเย็นและทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในตู้เย็น เพื่อให้เอนไซม์ตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ เมื่อครบกำหนดเวลา นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกเก็บส่วนตะกอน จากนั้นละลายตะกอนที่ได้ด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate Buffer) pH 7.0 ปริมาณเล็กน้อย เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการกำจัดเกลือส่วนเกินด้วยการทำไดอะไลซิส (Dialysis) โดยใช้เยื่อเลือกผ่านที่มีขนาดรูพรุน 6-8 kDa (6-8 kDa MWCO) ในสารละลายบัฟเฟอร์ควบคุมเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิในอ่างน้ำแข็งซึ่งมีการเปลี่ยนน้ำแข็งใหม่ๆ 8 ชั่วโมง เพื่อรักษาความ คงสภาพของเอนไซม์ให้ได้มากที่สุด สารสกัดที่ผ่านการกำจัดเกลือแล้วจะถูกนำไปผ่านกระบวนการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Dry) เพื่อเตรียมเป็นสารสกัดบริสุทธิ์ในรูปแบบผง ได้แก่ Purified MSE และ Purified MAE จากนั้นนำตัวอย่างสารสกัดหยาบ (Crude) และสารสกัดบริสุทธิ์ (Purified) ของทั้ง 2 วิธี ไปวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนรวมด้วยวิธี Bradford Assay และทดสอบกิจกรรมการย่อยโปรตีน (Proteolytic Activity) โดยใช้เคซีน (Casein) เป็นสารตั้งต้น ข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาคำนวณหาค่ากิจกรรมจำเพาะ (Specific Activity) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและ ความบริสุทธิ์ของเอนไซม์ที่ได้จากการสกัดทั้ง 2 วิธี และคัดเลือกตัวอย่างที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อนำไปยืนยันเอกลักษณ์ของเอนไซม์ต่อไป

ในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อยืนยันเอกลักษณ์ของเอนไซม์ สารสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SDS-PAGE เพื่อระบุขนาดโมเลกุล และยืนยันลำดับกรดอะมิโนด้วยเทคนิค LC-MS/MS เพื่อพิสูจน์ชนิดของเอนไซม์โบรมิเลนอย่างแม่นยำ ผลการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการศึกษาวิจัยในระดับที่สูงขึ้น เพื่อสนับสนุนการนำเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือกสับปะรดไปประยุกต์ใช้เป็นสารออกฤทธิ์ในผลิตภัณฑ์เวชสำอาง ซึ่งเป็นการจัดการทรัพยากรเหลือทิ้งให้เกิดประโยชน์สูงสุดตามแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียน

ผลและวิจารณ์

1. ผลการสกัดและลักษณะทางกายภาพของสารสกัดเอนไซม์โบรมิเลน

จากการสกัดเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือกสับปะรดบ้านคา สายพันธุ์ปัตตาเวีย ด้วยวิธีการกวนสารละลายแบบดั้งเดิมด้วยเครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก (MSE) และการใช้คลื่นไมโครเวฟช่วย (MAE)

พบว่า สารสกัดหยาบ (Crude) ที่ผ่านการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งจากทั้ง 2 วิธีมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีเหลืองอ่อน เมื่อนำไปผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ด้วยการตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 40% ร่วมกับการไดอะไลซิส (Dialysis) พบว่าสารสกัดบริสุทธิ์ (Purified) จากทั้ง 2 วิธี มีสีที่จางลงและมีความละเอียดมากขึ้น

2. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการสกัดเอนไซม์

จากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการสกัดเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือกส้มปรดบ้านคา จังหวัดราชบุรี ระหว่างวิธีการสกัดด้วยการกวนสารละลายแบบดั้งเดิมด้วยเครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก (MSE) และวิธีการสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (MAE) พบว่า วิธีการสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (MAE) ให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าในด้านปริมาณโปรตีนรวมและกิจกรรมของเอนไซม์ โดยสารสกัดหยาบจากวิธี MAE (Crude MAE) มีปริมาณโปรตีนรวม อยู่ที่ 3.12 mg/ml และกิจกรรมของเอนไซม์ อยู่ที่ 185.30 Unit/ml ซึ่งสูงกว่าวิธี MSE (Crude MSE) ที่มีค่าเท่ากับ 2.45 mg/ml และ 120.50 Unit/ml ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาหลังผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ พบว่า กิจกรรมจำเพาะ (Specific Activity) ของเอนไซม์เพิ่มขึ้นในทุกสภาวะ โดยสารสกัด Purified MAE ให้ค่าสูงสุดที่ 138.67 Unit/mg ซึ่งสูงกว่าสารสกัด Purified MSE ที่มีค่า 112.00 Unit/mg แม้ขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์จะส่งผลให้ปริมาณโปรตีนรวมลดลงเหลือ 1.05 mg/ml และ 0.85 mg/ml ตามลำดับ เนื่องมาจากการกำจัดโปรตีนอื่นๆ และสิ่งเจือปนออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณโปรตีนรวม กิจกรรมของเอนไซม์ และกิจกรรมจำเพาะของสารสกัดจากเปลือกส้มปรด

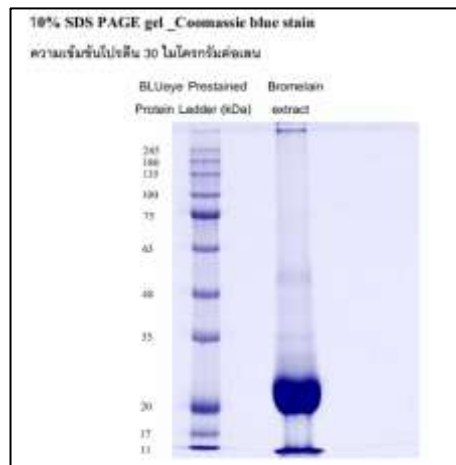
ตัวอย่างสารสกัด	ปริมาณโปรตีนรวม (mg/ml)	กิจกรรมของเอนไซม์ (Unit/ml)	กิจกรรมจำเพาะ (Specific Activity, Unit/mg)
Crude MSE	2.45	120.50	49.18
Purified MSE	0.85	95.20	112.00
Crude MAE	3.12	185.30	59.39
Purified MAE	1.05	145.60	138.67

จากผลการทดลองพบว่า วิธีการสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (MAE) ให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์และปริมาณโปรตีนรวมสูงกว่าวิธีการสกัดด้วยการกวนสารละลายแบบดั้งเดิมด้วยเครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก (MSE) แม้จะใช้เวลาการดำเนินการที่สั้นกว่ามาก ทั้งนี้เนื่องจากกลไกของคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปทำลายโครงสร้างผนังเซลล์ของเปลือกส้มปรดได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยเอนไซม์โบรมิเลนออกจากโมเลกุลพืชได้ง่ายและมีประสิทธิภาพมากกว่าการสกัดด้วยแรงกวนเชิงกลเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ การที่ตัวอย่าง Purified MAE ให้ค่ากิจกรรมจำเพาะสูงสุด บ่งชี้ว่าสภาวะการสกัดร่วมกับขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ที่เลือกใช้นั้น สามารถรักษาความคงสภาพทางชีวภาพของเอนไซม์ได้ดี ผู้วิจัยจึงเลือกสารสกัด Purified MAE เป็นตัวแทนในการยืนยันเอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SDS-PAGE และ LC-MS/MS ต่อไป

3. การยืนยันเอกลักษณ์ของเอนไซม์โบรมิเลน

3.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย SDS-PAGE

จากผลการวิเคราะห์ขนาดโมเลกุลของสารสกัดโบรมิเลนด้วยเทคนิค SDS-PAGE (10% Polyacrylamide gel) และย้อมด้วยสี Coomassie Brilliant Blue ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่า ในเลนของสารสกัด (Bromelain extract) ปรากฏแถบโปรตีนหลักที่มีความเข้มและความชัดเจนสูงเพียงแถบเดียว เมื่อเปรียบเทียบกับโปรตีนมาตรฐาน (Protein marker) พบว่า แถบดังกล่าวมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงประมาณ 23-28 kDa ซึ่งสอดคล้องกับน้ำหนักโมเลกุลของเอนไซม์โบรมิเลนจากงานวิจัยของ Chiarelli et al. (2024) นอกจากนี้ยังพบคราบจางๆ ในช่วงโมเลกุลสูง แต่ไม่มีแถบโปรตีนสิ่งเจือปนอื่นที่ชัดเจนปรากฏอยู่



รูปที่ 1 การวิเคราะห์ขนาดโมเลกุลของสารสกัดโบรมิเลนด้วยเทคนิค SDS-PAGE

การปรากฏแถบโปรตีนหลักที่ชัดเจนและมีขนาดโมเลกุลตามคุณลักษณะของโบรมิเลน บ่งชี้ว่า กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ด้วยการตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 40% และการแยกสารผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Dialysis) ที่มีขนาดรูพรุน 6-8 kDa มีประสิทธิภาพสูงในการแยกโปรตีนเป้าหมายและกำจัดโปรตีนส่วนเกินออกไป อย่างไรก็ตาม ความเข้มของแถบโปรตีนที่ปรากฏมีความหนาแน่น อาจเนื่องมาจากใช้ความเข้มข้นโปรตีนสูงถึง 30 µg/lane ซึ่งแม้จะทำให้เห็นความบริสุทธิ์ได้ชัดเจน แต่ก็ส่งผลให้เกิดรอยลากเล็กน้อยตามความเข้มข้นที่สูงเกินไป

3.2 ผลการวิเคราะห์ด้วย LC-MS/MS

ผลการวิเคราะห์ขนาดโมเลกุลด้วยเทคนิค SDS-PAGE (รูปที่ 1) ปรากฏแถบโปรตีนหลักในช่วง 23-28 kDa ซึ่งสอดคล้องกับน้ำหนักโมเลกุลของเอนไซม์โบรมิเลน แถบโปรตีนช่วงดังกล่าวจึงถูกนำไปวิเคราะห์เอกลักษณ์ต่อยุทธวิธีด้วยเทคนิค Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry (LC-MS/MS) โดยสืบค้นลำดับกรดอะมิโนผ่านโปรแกรม Mascot Search เทียบกับฐานข้อมูล Uniprot ผลการวิเคราะห์พบว่า สารสกัดมีองค์ประกอบหลักเป็นเอนไซม์ในกลุ่มโบรมิเลนอย่างชัดเจน โดยตรวจพบ Stem Bromelain (P14518) ซึ่งมีคะแนนความเชื่อมั่น (Protein Score) เท่ากับ 977 และมีค่า exponentially modified protein abundance index (emPAI) เท่ากับ 2.86 ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับโปรตีนชนิดอื่น บ่งชี้ว่า Stem Bromelain เป็นเอนไซม์ที่มีปริมาณความเข้มข้นสูงสุดใน สารสกัด และค่ามวลโมเลกุลที่ได้ คือ 23,215 Da ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งแถบโปรตีนบนเจล SDS-PAGE ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อมูลเอกลักษณ์ของเอนไซม์โบรมิเลนและเอนไซม์ร่วมในสารสกัดด้วยเทคนิค LC-MS/MS

ชื่อเอนไซม์	Accession No.	Protein Score	Mass (Da)	emPAI
Stem bromelain	P14518	977	23,215	2.86
Fruit bromelain	A0A199W3D2	373	172,204	0.16
Ananain	A0A199VSS3	1,288	40,005	1.55

นอกจากนี้ยังตรวจพบ Fruit Bromelain (A0A199W3D2) และเอนไซม์ร่วมในกลุ่ม Cysteine Proteinase เช่น Ananain (A0A199VSS3) ซึ่งมักพบร่วมกันในพืชตระกูลสับปะรด การเชื่อมโยงผลระหว่างน้ำหนักโมเลกุลที่ได้จาก SDS-PAGE และลำดับกรดอะมิโนจาก LC-MS/MS สามารถช่วยยืนยันว่ากระบวนการสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ (MAE) และการทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมซัลเฟตร่วมกับการไดอะไลซิส มีประสิทธิภาพในการรักษาโครงสร้างและคัดแยกเอนไซม์เป้าหมายได้เป็นอย่างดี

สรุป

จากการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดเอนไซม์โบรมิเลนจากเปลือกสับปะรดบ้านคา สายพันธุ์ปัตตาเวีย จังหวัดราชบุรี พบว่าวิธีการสกัดส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพและประสิทธิภาพของเอนไซม์ โดยสารสกัดบริสุทธิ์ (Purified) ที่ผ่านการตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 40% ร่วมกับการไดอะไลซิส ทั้ง 2 วิธี มีความละเอียดและมีสีจางลงกว่าสารสกัดหยาบ (Crude) เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวสามารถกำจัดโปรตีนอื่นๆ และสิ่งเจือปนออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในด้านประสิทธิภาพการสกัด พบว่า วิธีการใช้คลื่นไมโครเวฟ (MAE) ให้ผลลัพธ์สูงกว่าวิธีการสกัดด้วย การกวนสารละลายแบบดั้งเดิมด้วยเครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก (MSE) ในทุกตัวชี้วัด โดยสารสกัด Crude MAE มีปริมาณโปรตีนรวมอยู่ที่ 3.12 mg/ml และกิจกรรมของเอนไซม์อยู่ที่ 185.30 Unit/ml ซึ่งสูงกว่าวิธี MSE (Crude MSE) ที่มีค่าอยู่ที่ 2.45 mg/ml และ 120.50 Unit/ml ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ พบว่า กิจกรรมจำเพาะ (Specific Activity) ของเอนไซม์เพิ่มสูงขึ้นทั้ง 2 วิธี โดยสารสกัด Purified MAE ให้ค่าสูงสุดอยู่ที่ 138.67 Unit/mg ซึ่งสูงกว่าสารสกัด Purified MSE ที่มีค่าอยู่ที่ 112.00 Unit/mg ตามลำดับ วิธีการใช้คลื่นไมโครเวฟ (MAE) แม้จะใช้เวลาการดำเนินการที่สั้นกว่ามาก แต่เนื่องจากกลไกของคลื่นไมโครเวฟที่สามารถทะลุทะลวงเข้าไปทำลายโครงสร้างผนังเซลล์ของเปลือกสับปะรดได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยเอนไซม์ โบรมิเลนออกมาได้ดีกว่าแรงกวนเชิงกลเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การที่ตัวอย่าง Purified MAE ให้ค่ากิจกรรมจำเพาะสูงสุด ยังสามารถบ่งชี้ได้ว่าวิธีการสกัดและขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ที่เลือกใช้นั้น สามารถรักษาความ คงสภาพทางชีวภาพของเอนไซม์ได้ดี

จากการวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SDS-PAGE พบแถบโปรตีนหลักในช่วงน้ำหนักโมเลกุล 23-28 kDa ซึ่งสอดคล้องกับคุณลักษณะของเอนไซม์โบรมิเลน และผลการยืนยันด้วยเทคนิค LC-MS/MS ระบุว่า Stem Bromelain เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากมีค่า emPAI สูงสุดที่ 2.86 นอกจากนี้ยังตรวจพบ Fruit Bromelain และเอนไซม์ร่วมในกลุ่ม Cysteine Proteinase เช่น Ananain ซึ่งเป็นองค์ประกอบตามธรรมชาติที่พบร่วมกันในพืชตระกูลสับปะรด การตรวจพบเอนไซม์ที่หลากหลายในรูปแบบ Enzyme Cocktail



เช่นนี้ ถือเป็นข้อดีอย่างยิ่งในเชิงพาณิชย์และเวชสำอาง เนื่องจากช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพการทำงานให้ครอบคลุมกว่าการใช้เอนไซม์ชนิดเดียว อาทิ การเร่งกระบวนการผลิตเซลล์ผิวอย่างอ่อนโยน การลดการอักเสบของผิว และการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย อีกทั้งยังสามารถยืนยันได้ว่ากรรมวิธีการสกัดและทำให้บริสุทธิ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาองค์ประกอบและโครงสร้างทางชีวภาพตามธรรมชาติไว้ได้อย่างสมบูรณ์ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำสารสกัดไปประยุกต์ใช้เป็นสารออกฤทธิ์สำหรับผลิตภัณฑ์เวชสำอาง ซึ่งนอกจากจะช่วยยกระดับมาตรฐานสินค้าเกษตรแปรรูปจากเปลือกส้มปصرةในท้องถิ่นแล้ว ยังถือเป็นแนวทางต้นแบบในการเปลี่ยนขยะชีวภาพ ให้เป็นวัตถุดิบมูลค่าสูงตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน (BCG Model) ที่สามารถตอบโจทย์ความต้องการของตลาดที่มุ่งเน้นสารสกัดจากธรรมชาติและความยั่งยืนได้อย่างแท้จริง

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่สนับสนุนทรัพยากรและสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



เอกสารอ้างอิง

- Abbas, S., Shanbhag, T., & Kothare, A. (2021). Applications of bromelain from pineapple waste towards acne. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(2), 1001–1009.
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.11.033>
- Agrawal, P., Nikhade, P., Patel, A., Mankar, N., & Sedani, S. (2022). Bromelain: A potent phytomedicine. *Cureus*, 14(8), e27876. <https://doi.org/10.7759/cureus.27876>
- Ali, A. A., Milala, M. A., & Gulani, I. A. (2015). Antimicrobial effects of crude bromelain extracted from pineapple fruit (*Ananas comosus* (Linn.) Merr.). *Advances in Biochemistry*, 3(1), 1–4.
<https://doi.org/10.11648/j.ab.20150301.11>
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein–dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1–2), 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Coêlho, D. F., Saturnino, T. P., Fernandes, F. F., Mazzola, P. G., Silveira, E., & Tambourgi, E. B. (2016). Azocasein substrate for determination of proteolytic activity: Reexamining a traditional method using bromelain samples. *BioMed Research International*, 2016, 8407315. <https://doi.org/10.1155/2016/8407315>
- Department of Intellectual Property. (2021). *GI Thailand Magazine* (Issue 1). Nonthaburi, Thailand: Author.
- Dubey, R., Reddy, S., & Murthy, N. Y. S. (2012). Extraction and purification of bromelain. *Asian Journal of Chemistry*, 24(4), 1435–1438.
- Gautam, S. S., Mishra, S. K., Dash, V., Goyal, A. K., & Rath, G. (2010). Comparative study of extraction, purification and estimation of bromelain from stem and fruit of pineapple plant. *Thai Journal of Pharmaceutical Sciences*, 34, 67–76.
- Gharage, V., Ghutake, S., & Pawar, H. (2024). Valorization of pineapple waste for extraction and purification of bromelain enzyme. *ACS Sustainable Resource Management*, 1, 2439–2451. <https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.4c00223>
- Gul, A., Siddiqui, M., Arain, H., Khan, S., Khan, H., & Ishrat, U. (2021). Extraction, partial purification and characterization of bromelain from pineapple (*Ananas Comosus*) crown, core and peel waste. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 64, e21200639.
<https://doi.org/10.1590/1678-4324-202121200639>



- Kansakar, U., Trimarco, V., Manzi, M. V., Cervi, E., Mone, P., & Santulli, G. (2024). Exploring the therapeutic potential of bromelain: Applications, benefits, and mechanisms. *Nutrients*, 16(13), 2060. <https://doi.org/10.3390/nu16132060>
- Kaushal, R., Kaur, B., Panesar, P. S., Anal, A. K., & Chu-Ky, S. (2023). Valorization of pineapple rind for bromelain extraction using microwave assisted technique: Optimization, purification, and structural characterization. *Journal of Food Science and Technology*, 60(11), 7182–7193. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05822-w>
- Mala, T., Sadiq, M. B., & Anal, A. K. (2021). Comparative extraction of bromelain and bioactive peptides from pineapple byproducts by ultrasonic- and microwave-assisted extractions. *Journal of Food Process Engineering*, 44(6), e13688. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13688>
- Pavan, R., Jain, S., Shraddha, & Kumar, A. (2012). Properties and therapeutic application of bromelain: A review. *Biotechnology Research International*, 2012, 976203. <https://doi.org/10.1155/2012/976203>
- Popluechai, S., Onto, S., & Eungwanichayapant, P. D. (2007). Relationships between some Thai cultivars of pineapple (*Ananas comosus*) revealed by RAPD analysis. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 29(6), 1491–1497.
- Schägger, H., & von Jagow, G. (1987). Tricine–sodium dodecyl sulfate–polyacrylamide gel electrophoresis for the separation of proteins in the range from 1 to 100 kDa. *Analytical Biochemistry*, 166(2), 368–379. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(87\)90587-2](https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90587-2)
- Soares, P., Coelho, D., Mazzola, P., Silveira, E., Carneiro-da-Cunha, M. G., Pessoa, A., Jr., & Tambourgi, E. (2011). Studies on bromelain precipitation by ethanol, poly (ethylene glycol) and ammonium sulphate. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 54(1), 125–132. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132011000100017>

การวิเคราะห์การกลายพันธุ์ที่สัมพันธ์กับการดื้อยา Bedaquiline และ Linezolid และ Lineage ของเชื้อ *Mycobacterium tuberculosis* ในกลุ่ม pre-XDR-TB ด้วยเทคนิค Whole Genome Sequencing

Genomic Analysis of Bedaquiline - and Linezolid-Associated Resistance Mutations and Lineage of *Mycobacterium tuberculosis* in Pre-Extensively Drug-Resistant Tuberculosis Using Whole Genome Sequencing

ลักษณนารา ตั้งสุนันท์ธรรม¹ และ ปาหนัน รัฐวงศ์จิรกุล²
Lucksanara Tangsunantham¹ and Panan Ratthawongjirakul²

บทคัดย่อ

ปัญหาวัณโรคดื้อยาหลายขนานชนิดรุนแรง (pre-XDR-TB) เป็นอุปสรรคสำคัญต่อการควบคุมโรคทั่วโลก แม้มีการนำยา Bedaquiline (Bdq) และ Linezolid (Lzd) มาใช้เป็นยาหลักในสูตรยาต้านวัณโรคขนานที่สองตั้งแต่ปี ค.ศ. 2012 แต่ความสัมพันธ์ระหว่างกลไกการดื้อยาในระดับโมเลกุลกับลักษณะฟีโนไทป์ที่แสดงออกยังไม่มีความชัดเจนในทุกตำแหน่งการกลายพันธุ์ การศึกษานี้ใช้เทคนิค Whole Genome Sequencing (WGS) ร่วมกับการแปลผลด้วยโปรแกรม TB Profiler เพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งการกลายพันธุ์ที่มีความสัมพันธ์กับการดื้อยา Bdq และ Lzd ของเชื้อ *Mycobacterium tuberculosis* (MTB) จากผู้ป่วยวัณโรคดื้อยาหลายขนานชนิดรุนแรง และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยวิธีทาง ฟีโนไทป์ ผลการศึกษาของเชื้อจำนวน 291 ตัวอย่าง ส่วนใหญ่เป็นเชื้อ MTB สายพันธุ์ Lineage 2 (88%) โดย 17 ตัวอย่างมีการกลายพันธุ์ของยีนที่มีความสัมพันธ์กับการดื้อยา Bdq ประกอบไปด้วย การกลายพันธุ์ของยีน *mmpR5* พบใน 16 ตัวอย่าง และยีน *pepQ* พบใน 1 ตัวอย่าง อย่างไรก็ตามพบความไม่สอดคล้องกันระหว่างตำแหน่งการกลายพันธุ์ของยีนกับการแสดงออกทางฟีโนไทป์ต่อยา Bdq ในขณะที่ไม่พบการดื้อยา Lzd และการกลายพันธุ์ของยีนที่เกี่ยวข้องภายหลังการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของเชื้อด้วยแผนภูมิต้นไม้สายวิวัฒนาการพบว่า เชื้อแต่ละสายพันธุ์

¹ หลักสูตรวิทยาศาสตรระดับโมเลกุลทางจุลชีววิทยาทางการแพทย์และวิทยาภูมิคุ้มกัน, คณะสหเวชศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330 ประเทศไทย

Program of Molecular Sciences in Medical Microbiology and Immunology, Faculty of Allied Health Sciences, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

² ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางนวัตกรรมตรวจวินิจฉัยเชื้อดื้อยา, คณะสหเวชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330 ประเทศไทย

Center of Excellence for Innovative Diagnosis of Antimicrobial Resistance, Faculty of Allied Health Sciences, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.



มีความใกล้ชิดกันในลำดับทางพันธุกรรม บ่งชี้ความใกล้ชิดทางพันธุกรรมของเชื้อ และมีความเป็นไปได้ของการรวมกลุ่มทางพันธุกรรม

คำสำคัญ : pre-XDR-TB, Bedaquiline, Linezolid, Whole Genome Sequencing, Lineage

Abstract

The emergence of pre-extensively drug-resistant tuberculosis (pre-XDR-TB) poses a significant challenge to global TB control. While Bedaquiline (Bdq) and Linezolid (Lzd) have been integrated as core components of second-line treatment regimens since 2022, the correlation between specific molecular resistance mechanisms and their corresponding phenotypes remains partially understood across various mutation sites. This study utilized Whole Genome Sequencing (WGS) analysed via the TB Profiler pipeline to characterize mutations associated with Bdq and Lzd resistance in *Mycobacterium tuberculosis* (MTB) isolated from pre-XDR-TB patients. The genotypic data were subsequently compared with phenotypic drug susceptibility testing (DST) results. Among the 291 MTB isolates analysed, the majority belonged to lineage 2 (88%). Genetic mutations associated with Bdq resistance were identified in 17 isolates, predominantly within the *mmpR5* gene (n=16) and the *pepQ* gene (n=1). However, discordance was observed between the identified genotypic mutations and phenotypic expressions of Bdq resistance. Conversely, no resistance to Lzd or associated genetic mutations were detected. Phylogenetic analysis revealed high genetic clusters among the isolates, indicating genetic relatedness and the possibility of genetic clustering among the isolates. The findings highlight a complex relationship between genotypic markers and phenotypic resistance for Bedaquiline. The evidence of clustered transmission underscores the urgent need for enhanced molecular surveillance to curb the spread of pre-XDR-TB strains.

Keyword : pre-XDR-TB, Bedaquiline, Linezolid, whole genome sequencing, lineage

บทนำ

องค์การอนามัยโลกได้เสนอว่าด้านวัณโรคขนานที่สองใหม่สำหรับใช้รักษาผู้ป่วยวัณโรค ดื้อยาหลายขนาน (Multidrug-resistant tuberculosis, MDR-TB) ประกอบไปด้วย ยา Fluoroquinolones (FQ ได้แก่ Levofloxacin หรือ Moxifloxacin) ร่วมกับยา Bedaquiline (Bdq) และ Linezolid (Lzd) (World Health Organization, 2022) หากผู้ป่วย MDR-TB มีเชื้อที่ดื้อยา Fluoroquinolones จะถูกจัดเป็นวัณโรคดื้อยาหลายขนานชนิดรุนแรง (pre-extensively drug-resistant tuberculosis, pre-XDR-TB) ในขณะที่ผู้ป่วยที่มีเชื้อดื้อยา Fluoroquinolones ร่วมกับ Bdq หรือ Lzd จะจัดเป็นวัณโรคดื้อยาหลายขนานชนิดรุนแรงมาก (Extensively drug-resistant tuberculosis, XDR-TB) (World Health Organization, 2024) ภายหลังมี

การใช้ยาต้านวัณโรคขนานที่สองกลุ่มใหม่แพร่หลายในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ทำให้เริ่มพบเชื้อวัณโรคที่ดื้อต่อยา Bdq และ/หรือ Lzd เกิดขึ้นตามมาภายหลังจากการได้รับยา (Zimenkov, et al., 2017) ปัจจุบันการแพร่ระบาดของเชื้อวัณโรคดื้อยาในระดับโลกและในประเทศไทยมักมีความเกี่ยวข้องกับสายพันธุ์ Lineage 2 ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่มีการกลายพันธุ์และพัฒนาการดื้อยาได้รวดเร็ว รวมถึงมีความสามารถในการแพร่กระจายสูงเมื่อเทียบกับสายพันธุ์อื่น ข้อมูลด้านสายวิวัฒนาการจึงมีความสำคัญต่อการรักษา การควบคุมและการเฝ้าระวังทางระบาดวิทยา

ยา Bdq เป็นยาใหม่ ออกฤทธิ์ต่อเชื้อ MTB โดยจับกับเอนไซม์ adenosine 5'- triphosphate (ATP) synthase ส่งผลให้เชื้อหยุดการสร้างพลังงานภายในเซลล์ หยุดการเจริญเติบโต และมีอัตราการรอดชีวิตลดลง (Fox & Menzies, 2013) ในขณะที่ยา Lzd ยับยั้งการสร้างโปรตีนของเชื้อ MTB ซึ่งเป็นสาเหตุของวัณโรค (Gan, et al., 2023) กลไกหลักที่ทำให้เชื้อดื้อยา Bdq เกี่ยวข้องกับการกลายพันธุ์ของยีน *Rv0678* หรือ *mmpR5* ที่ควบคุมระบบ MmpS5-MmpL5 efflux pump ทำให้ทำงานมากขึ้น ส่งผลให้เชื้อสามารถขับยา Bdq ออกจากเซลล์ และเกิดการดื้อยาในระดับต่ำ และยังพบว่า การกลายพันธุ์ของยีน *mmpR5* ทำให้เกิดการดื้อข้ามไปยังยา Clofazimine (Cfz) ได้ ในขณะที่การดื้อยา Bdq ระดับสูง มีความเกี่ยวข้องกับการกลายพันธุ์ในยีน *atpE* ทำให้เอนไซม์ ATP synthase การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจนยา Bdq ไม่สามารถจับกับเอนไซม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Cholo, et al., 2017) ในขณะที่การดื้อยา Lzd ส่วนใหญ่เกิดจากการกลายพันธุ์ในยีน *rrl* ซึ่งเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง 23S rRNA ใน 50S ribosomal subunit ทำให้โครงสร้างเป้าหมายของยา Lzd เปลี่ยนแปลง

ข้อมูลของตำแหน่งการกลายพันธุ์ (variants) ของยีนที่มีความสัมพันธ์กับการดื้อยา Bdq และ Lzd ยังไม่ชัดเจน เนื่องจากยา Bdq และยา Lzd เพิ่งถูกบรรจุโดยองค์การอนามัยโลกให้ใช้เป็นส่วนหนึ่งของการรักษาวัณโรคดื้อยา หลายขนาน ดังนั้นจึงยังจำเป็นต้องรวบรวมข้อมูลจากการศึกษาต่างๆ ที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาช่วยพิจารณาเพิ่มเติม โดยเฉพาะการประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง variant ที่ส่งผลต่อการดื้อยากับการทดสอบด้วยวิธี pDST (World Health Organization, 2023) การศึกษาครั้งนี้ใช้เทคนิค WGS วิเคราะห์ตำแหน่งการกลายพันธุ์ของยีนที่มีความสัมพันธ์กับการ ดื้อยา Bdq และยา Lzd ของเชื้อ MTB ที่แยกได้จากผู้ป่วยวัณโรคดื้อยาหลายขนานชนิดรุนแรง เพื่อศึกษารูปแบบการกลายพันธุ์ที่จำเพาะต่อการดื้อยา Bdq และ Lzd เปรียบเทียบกับวิธีทางพีโนไทป์ ผลจากการศึกษาครั้งนี้ ช่วยเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการดื้อยา Bdq และ Lzd และสามารถนำไปสู่การพัฒนาแนวทางการรักษาที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น รวมถึงการควบคุมการแพร่กระจายของเชื้อวัณโรคดื้อยาในระดับประเทศได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการกลายพันธุ์ของยีนที่เกี่ยวข้องกับการดื้อยา Bdq และ Lzd ใน pre-XDR-TB โดยใช้เทคนิค WGS
2. เพื่อเปรียบเทียบความสอดคล้องผลการกลายพันธุ์ของยีนที่เกี่ยวข้องกับการดื้อยา Bdq และ Lzd ที่ได้จาก WGS กับผลของ pDST

3. เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของลำดับเบสของ pre-XDR-TB ด้วยการจัดทำแผนภูมิต้นไม้สายวิวัฒนาการ

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การพิจารณาทางจริยธรรมการวิจัย

การศึกษานี้ใช้ตัวอย่างโคโลนีเชื้อ *Mycobacterium tuberculosis* (MTB) จำนวน 291 ตัวอย่าง ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากกลุ่มปฏิบัติการอ้างอิงชันสูตรโรคแห่งชาติ กองโรค กรมควบคุมโรค ระหว่างเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2562 ถึงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2567 โดยคัดเลือกเฉพาะตัวอย่างที่ผ่านการยืนยันว่าเป็นวัณโรคคือยาชนิด pre-XDR-TB ด้วยวิธีมาตรฐาน Critical Concentration ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว BACTEC MGIT 960 ตามเกณฑ์ขององค์การอนามัยโลก โดยค่า Critical concentration ของยา Bdq และยา Lzd เท่ากับ 1.0 µg/mL ตัวอย่างทั้งหมดได้ผ่านกระบวนการถูกนำมากำหนดรหัสใหม่ เพื่อไม่ให้สืบค้นข้อมูลกลับถึงผู้ป่วยได้ ก่อนนำมาเพาะเลี้ยงเชื้อบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Löwenstein-Jensen (LJ) ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 3-4 สัปดาห์ การศึกษาครั้งนี้ได้รับการอนุมัติการพิจารณาจริยธรรมการวิจัย จากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคน กลุ่มสหสถาบัน ชุดที่ 1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เลขที่รับรองโครงการ COA No. 352/68

1. การสกัด DNA

สกัด DNA ของเชื้อด้วยวิธี CTAB-Chloroform เติม phosphate buffer saline (PBS) pH 6.8 ปริมาตร 200 µL ลงในหลอดทดลองที่บรรจุ glass beads เชื้อโคโลนีของเชื้อจำนวน 2-3 loopfuls ลงในหลอด และทำให้โคโลนีของเชื้อกระจายตัวด้วยการ vortex จากนั้นเติม PBS เพิ่มเป็น 1 mL และผสมให้เข้ากัน ดูดสารละลายเชื้อปริมาตร 400 µL ลงในหลอด microcentrifuge ขนาด 1.5 mL บ่มที่ 80 °C เป็นเวลา 20 นาที เติม lysozyme ความเข้มข้น 10 mg/mL ปริมาตร 50 µL และบ่มที่ 37 °C ซ้ำมคั้น จากนั้นเติม 10% SDS/Proteinase K ปริมาตร 75 µL และบ่มที่ 65 °C เพื่อย่อยโปรตีน เติม 5M NaCl และสารละลาย CTAB/NaCl (อุ่นที่ 65 °C ก่อนใช้งาน) ปริมาตร 100 µL ผสมให้เข้ากันและบ่มที่ 65 °C เป็นเวลา 10 นาที เติม chloroform/isoamyl alcohol ปริมาตร 750 µL และปั่นเหวี่ยงที่ 10,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที เก็บส่วนใสด้านบนปริมาตร 500 µL ถ่ายลงในหลอดใหม่ เติม RNase A ความเข้มข้น 10 mg/mL ปริมาตร 10 µL และบ่มที่ 37 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตกตะกอน DNA ด้วย absolute ethanol ปริมาตร 1,000 µL และปั่นเหวี่ยงที่ 10,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที ดูดส่วนใสทิ้ง ล้างด้วย 80% ethanol ปริมาตร 1,000 µL และปั่นเหวี่ยงที่ 10,000 rpm เป็นเวลา 1 นาที ดูดส่วนน้ำใสทิ้ง และล้างซ้ำอีก 1 รอบ ทำให้ตกตะกอน DNAแห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชั่วโมง และละลาย DNA ด้วย elution buffer ปริมาตร 50 µL นำ DNA ที่สกัดได้ไปวัดความบริสุทธิ์ (Nanodrop spectrophotometer) ตรวจสอบความสมบูรณ์ (TapeStation Genomic DNA) และวัดความเข้มข้น (Qubit fluorometer) เก็บรักษา DNA ที่ -20 °C เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป

2. การเตรียม DNA library

ทำการติด oligonucleotide adapters เข้ากับชิ้นส่วน DNA และเพิ่มปริมาณชิ้นส่วนเป้าหมาย โดยเริ่มจากขั้นตอน Tagmentation เติม Tagment DNA Buffer ปริมาตร 10 µL กับ DNA (ความเข้มข้น 0.2 ng/µL)

ปริมาตร 5 μL ลงใน 96-well PCR plate ทำปฏิกิริยาที่ 55 °C นาน 5 นาที และหยุดปฏิกิริยากับ Neutralize Tagment Buffer ปริมาตร 5 μL ขั้นตอนการเพิ่มปริมาณและติด sequencing adapters เริ่มจากเติม Nextera PCR Master Mix ปริมาตร 15 μL ร่วมกับ i7 Index1 และ i5 Index2 adapters อย่างละ 5 μL และทำ PCR เพื่อให้ได้ DNA libraries ที่มี adapters ครบถ้วน ทำ amplified libraries ให้บริสุทธิ์ โดยนำ reaction plate ไปปั่นเหวี่ยงที่ 280 x g ที่ 20 °C เป็นเวลา 1 นาที ถ่าย amplified libraries ของแต่ละตัวอย่าง ลงไปใน 96-well midi plate เติม AMPure XP beads ปริมาตร 30 μL ในแต่ละหลุม เขย่าที่ 1,800 rpm เป็นเวลา 2 นาที และบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที นำ plate ไปวางบน magnetic stand จนสารละลายกลายเป็นของเหลวใส ดูดส่วนใสทิ้ง และล้างด้วย 80% ethanol 2 รอบ ละลายตะกอน DNA ด้วย resuspension buffer ปริมาตร 52.5 μL เขย่าที่ 1,800 rpm เป็นเวลา 2 นาที บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 นาที นำ plate วางบน magnetic stand จนสารละลายกลายเป็นของเหลวใส ดูดส่วนใสปริมาตร 50 μL ลงใน 96-well PCR plate ใหม่ ตรวจสอบคุณภาพ DNA libraries ด้วยชุดทดสอบ TapeStation High Sensitivity D5000 จากนั้นในขั้นตอน normalization ปรับความเข้มข้นของ libraries ให้เท่ากันด้วยวิธี bead-based โดยใช้ cleaned DNA libraries ปริมาตร 20 μL ผสมกับ Library Normalization Additives1 และ Beads1 ปริมาตร 45 μL ล้างด้วย Library Normalization Wash1 และทำการ elute ด้วย 0.1N NaOH ปริมาตร 30 μL ก่อนนำส่วนใสปริมาตร 30 μL ผสมกับ Library Normalization Storage Buffer 1 ปริมาตร 30 μL นำ normalized libraries แต่ละตัวอย่าง ปริมาตร 10 μL มารวมกัน และเจือจางด้วย Hybridization Buffer ปริมาตร 576 μL และ pooled library ปริมาตร 24 μL ทำการ denature ที่ 98 °C นาน 2 นาที และวางบนน้ำแข็งทันที เป็นเวลา 5 นาที และนำตัวอย่างปริมาตร 600 μL ใส่ลงไปใน MiSeq reagent cartridge เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการหาลำดับเบสต่อไป

1.การหาลำดับเบส (sequencing)

งานวิจัยนี้ทำการถอดรหัสพันธุกรรมทั้งจีโนม (Whole Genome Sequencing: WGS) ด้วยเทคโนโลยี Next-generation sequencing (NGS) บนแพลตฟอร์ม Illumina รุ่น MiSeq ข้อมูลลำดับเบสที่ได้รับจะถูกนำมาวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีการกำหนดเกณฑ์คุณภาพของข้อมูล WGS คือ ต้องมี Average depth of coverage ไม่น้อยกว่า 30x และ genome coverage อย่างน้อยร้อยละ 95 จากนั้นประมวลผลด้วยโปรแกรม TB Profiler version 6.2.2 (<https://tbdr.lshtm.ac.uk/>) โดยอ้างอิงฐานข้อมูลจาก WHO mutation catalogue ปี ค.ศ. 2023 เพื่อระบุ Lineage และตำแหน่งการกลายพันธุ์ที่มีความสัมพันธ์กับการดื้อยา โดยกำหนดเกณฑ์การกลายพันธุ์ (mutation) ที่สัดส่วน Allele frequency มากกว่า 10% ขึ้นไป

2.การจัดทำแผนภูมิต้นไม้สายวิวัฒนาการ

นำผลการวิเคราะห์ลำดับเบสของเชื้อ MTB ที่ได้ข้างต้น มาจัดทำแผนภูมิต้นไม้สายวิวัฒนาการ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของเชื้อแต่ละสายพันธุ์กับการดื้อยาด้วยโปรแกรม Microreact (<https://microreact.org>)

ผลและวิจารณ์

การวิเคราะห์ลักษณะทางพันธุกรรมของเชื้อ pre-XDR-TB จำนวน 291 ตัวอย่าง พบว่าสายพันธุ์หลักที่แพร่ระบาดในประเทศไทยคือ Lineage 2 (258 ตัวอย่าง, 88%) ขณะที่ Lineage 1 และ Lineage 4 พบจำนวน 20 ตัวอย่าง (6.9%) และ 13 ตัวอย่าง (4.4%) ตามลำดับ MTB Lineage 2 เป็นสายพันธุ์ที่มีความสำคัญ

ทางระบาดวิทยา เนื่องจากมีความสามารถในการแพร่กระจายสูง และมีความสัมพันธ์กับการดื้อยาหลายขนาน ในหลายพื้นที่ทั่วโลก โดยเฉพาะในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียง (Coscolla & Gagneux, 2014) รวมถึงประเทศไทย การพบสัดส่วนของ Lineage 2 ในระดับสูงจึงสะท้อนถึงแนวโน้มการแพร่กระจายของเชื้อดื้อยาที่อาจมีความรุนแรงและควบคุมได้ยาก อีกทั้งยังมีรายงานว่าสายพันธุ์นี้มีความสามารถในการพัฒนาการดื้อยาเพิ่มเติมได้รวดเร็ว ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการรักษาในระยะยาว (Nonghanphithak, et al., 2021)

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค WGS พบเชื้อจำนวน 17 จาก 291 ตัวอย่างที่มีการกลายพันธุ์ซึ่งถูกระบุว่ามีความสัมพันธ์กับการดื้อยา Bdq ด้วยโปรแกรม TB Profiler โดยเชื้อทั้ง 17 ตัวอย่าง มีการแสดงออกทางฟีโนไทป์ดื้อยา Bdq เพียง 2 ตัวอย่าง (No.1, 2) และดื้อยา Cfz จำนวน 13 ตัวอย่าง (ตารางที่ 1) โดยเชื้อจำนวน 16 ตัวอย่าง มีการกลายพันธุ์ยีน *mmpR5* ตำแหน่งที่พบการกลายพันธุ์มากที่สุดคือ *mmpR5* p.Gln51 (6 จาก 16 ตัวอย่าง) การกลายพันธุ์รูปแบบดังกล่าวส่งผลให้เกิดการสูญเสียหน้าที่ของโปรตีนตัวควบคุม (transcriptional repressor) ทำให้มีการแสดงออกของระบบ MmpL5-MmpS5 efflux pump เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เชื้อสามารถขับยาออกจากเซลล์ได้มากขึ้น จึงเป็นการลดความเข้มข้นของยา Bdq ภายในเซลล์ และก่อให้เกิดการดื้อยาในระดับต่ำถึงปานกลาง เป็นที่น่าสนใจว่าเชื้อที่มีการกลายพันธุ์ *mmpR5* p.Gln51 ไม่พบการดื้อยา Bdq แต่พบว่าทั้ง 6 ตัวอย่างแสดงออกดื้อต่อยา Cfz นอกจากนี้ยังพบเชื้อจำนวน 1 ตัวอย่าง มีการกลายพันธุ์ของยีน *pepQ* ที่ตำแหน่ง *pepQ* c.1104_1105insT (ตารางที่ 1) ซึ่งเป็นการกลายพันธุ์แบบ insertion ที่อาจส่งผลต่อโครงสร้างและหน้าที่ของโปรตีน และทำให้เกิดการดื้อยาในระดับต่ำ (Almeida, et al., 2016) ตำแหน่งดังกล่าวมีรายงานว่ามีความสัมพันธ์กับการดื้อยา Bdq และอาจเกี่ยวข้องกับกลไกทางอ้อมของระบบเมแทบอลิซึมภายในเซลล์ การศึกษาระดับโมเลกุลของ MTB พบว่าการดื้อยา Bdq มีสาเหตุจากหลายกลไก และมีระดับความรุนแรงแตกต่างกันตามยีนที่กลายพันธุ์ การกลายพันธุ์ของยีน *mmpR5* ทำให้เกิดการดื้อยาในระดับต่ำ และอาจเกิดการ ดื้อยาข้ามระหว่างยา Bdq และ Cfz ได้ ในขณะที่การกลายพันธุ์ของยีน *pepQ* เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของเชื้อ ส่งผลต่อการดื้อยาในระดับต่ำ และการกลายพันธุ์ของยีน *atpE* ซึ่งควบคุมเอนไซม์ที่เป็นเป้าหมายของยา ทำให้ดื้อยาในระดับสูง แต่ไม่พบการดื้อยาข้ามระหว่าง Bdq และ Cfz เช่นเดียวกับการกลายพันธุ์ของยีน *mmpR5* (Nguyen, et al., 2018)

กรณีความไม่สอดคล้องระหว่างผลการกลายพันธุ์ของยีน *mmpR5* กับผลความไวต่อยา Bdq ที่ทดสอบทาง ฟีโนไทป์ ที่พบในเชื้อจำนวน 15 ตัวอย่าง (หมายเลข 3-17) อาจเกิดจากการที่ยีน *mmpR5* กลายพันธุ์มักส่งผลให้เกิดการทำงานที่ผิดปกติของตัวควบคุม (Repressor) นำไปสู่การแสดงออกที่มากเกินไป (Overexpression) ของระบบขับถ่ายยา MmpL5-MmpS5 efflux pump การเปลี่ยนแปลงนี้อาจส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ยับยั้งเชื้อได้ (Minimum inhibitory concentration, MIC) เพียงเล็กน้อย แต่ไม่สูงถึงระดับเกณฑ์ Cut off ของเทคนิค Critical Concentration อย่างไรก็ตามในทางคลินิกการดื้อยาระดับต่ำนี้อาจเชื้อให้เชื้อสามารถทนทานต่อระดับยาในร่างกายผู้ป่วย ส่งผลให้การรักษาล้มเหลวหรือเกิดการสะสมการกลายพันธุ์เพิ่มเติมจนกลายเป็นการดื้อยาในระดับสูง (High-level resistance) ตามมาในภายหลัง (Perumal, et al., 2023) นอกจากนี้ การกลายพันธุ์บางรูปแบบอาจเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ส่งผลต่อหน้าที่ของโปรตีนอย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่มีความสัมพันธ์กับการดื้อยาโดยตรง การเปลี่ยนแปลงในระดับ โคดอนเหล่านี้ อาจเป็นลักษณะของ “pre-resistance mutations” ที่มีศักยภาพพัฒนาไปสู่การดื้อยาในระดับสูงเมื่อมีการสะสม

ของการกลายพันธุ์เพิ่มเติมภายใต้แรงกดดันจากยา ความแตกต่างของโคดอนยังอาจสะท้อนถึงการเกิดการกลายพันธุ์อย่างอิสระในแต่ละตัวอย่าง มากกว่าการถ่ายทอดจากสายพันธุ์เดียวกัน และอาจช่วยแยกความแตกต่างระหว่างการกลายพันธุ์ที่เกี่ยวข้องกับการดื้อยากับตำแหน่ง marker ทางสายวิวัฒนาการได้ในอนาคตได้ (Villellas, et al., 2017)

เป็นที่น่าสนใจว่าเชื้อจำนวน 13 ตัวอย่าง ให้ผลดื้อต่อยา Cfx โดยพบการกลายพันธุ์ของยีน *mmpR5* ในเชื้อทุกตัวอย่างที่ดื้อยา ในขณะที่มีเชื้อจำนวน 4 ตัวอย่างที่พบการกลายพันธุ์ของยีน *mmpR5* แต่มีผลไวต่อยา ซึ่งอาจเกิดจากกรณีเดียวกันกับผลที่ไม่สอดคล้องกันระหว่างการกลายพันธุ์ของยีนและการดื้อยา Bdq ที่ได้อธิบายข้างต้น การดื้อยาข้ามระหว่างยา Bdq และ Cfx พบว่ามักเกิดในกรณีที่มีเชื้อที่มีการดื้อยา Bdq มาก่อน โดยการกลายพันธุ์ของยีน *mmpR5* จะนำไปสู่การแสดงออกที่เพิ่มขึ้นของระบบ MmpL5–MmpS5 efflux pump ซึ่งสามารถขับยาได้ทั้งสองชนิด จึงส่งผลให้เกิดการดื้อยาข้ามไปยัง Cfx ได้ อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่เชื้อมีการดื้อต่อยา Cfx มาก่อน อาจยังไม่ส่งผลให้เกิดการดื้อยา Bdq อย่างชัดเจนในระยะแรก แต่มีแนวโน้มที่จะพัฒนาไปสู่การดื้อยา Bdq ได้ในภายหลังภายใต้แรงกดดันจากการใช้ยา ดังนั้น ความสัมพันธ์ของการดื้อยาระหว่าง Bdq และ Cfx จึงสะท้อนถึงบทบาทของยีน *mmpR5* ในการควบคุม efflux pump ซึ่งมีผลต่อการเกิดการดื้อยาข้ามและการแปลผลทางคลินิกของการรักษาอย่างมีนัยสำคัญ

การศึกษานี้ไม่พบเชื้อที่ดื้อต่อยา Lzd รวมไปถึงการกลายพันธุ์ของยีนที่มีความสัมพันธ์กับการดื้อยา (ตารางที่ 1) การศึกษาก่อนหน้าที่ผ่านมา พบว่าอัตราการดื้อยา Lzd โดยรวมยังอยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับยาต้านวัณโรคชนิดอื่น โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ป่วย MDR-TB และ pre-XDR-TB รายงานส่วนใหญ่พบอัตราการดื้อยาในสัดส่วนเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ อาจเกิดจากการที่ยา Lzd เป็นยาที่ถูกนำมาใช้ในแนวทางการรักษาวัณโรคดื้อยาในระยะหลัง ทำให้ระยะเวลาการใช้ยาอาจไม่นานพอที่จะก่อให้เกิดแรงกดดันในการคัดเลือกการกลายพันธุ์อย่างแพร่หลาย ส่งผลให้โอกาสในการเกิดและแพร่กระจายของเชื้อดื้อยายังต่ำ ดังนั้น ผลการศึกษานี้ที่พบการดื้อยา Lzd จึงสอดคล้องกับแนวโน้มของข้อมูลในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ยังคงมีความจำเป็นในการเฝ้าระวังอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการเพิ่มการใช้ยาในอนาคตอาจนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของอัตราการดื้อยาได้

เมื่อนำผลลำดับเบสของเชื้อทั้งหมดมาจัดทำแผนภูมิต้นไม้ (รูปที่ 1) แสดงให้เห็นว่าเชื้อ MTB ในการศึกษาที่มีการจัดกลุ่มตามสายพันธุ์อย่างชัดเจน โดย Lineage 2 เป็นสายพันธุ์หลักที่พบและมีการรวมกลุ่ม (cluster) ปังชี้ความใกล้ชิดทางพันธุกรรมของเชื้อ และมีความเป็นไปได้ของการรวมกลุ่มทางพันธุกรรมอย่างไรก็ตาม การสรุปว่าเกิดการแพร่กระจายของเชื้อในพื้นที่ (Localized transmission) ยังต้องการข้อมูลสนับสนุนเพิ่มเติม เช่น ระยะห่างทางพันธุกรรม (SNP distance) หรือข้อมูลระบาดวิทยาาร่วมด้วย เมื่อพิจารณา ร่วมกับการกลายพันธุ์ที่เกี่ยวข้องกับการดื้อยา Bdq พบว่าการกลายพันธุ์ในยีน *mmpR5* พบมากใน Lineage 2 ในขณะที่ Lineage 1 และ 4 พบในสัดส่วนที่น้อยกว่าและมีการกระจายตัวมากกว่า สะท้อนถึงความหลากหลายทางพันธุกรรมและการเกิดการกลายพันธุ์แบบอิสระ โดยสรุปแผนภูมิต้นไม้ สนับสนุนบทบาทของ Lineage 2 ในการแพร่ระบาดและการดื้อยาในกลุ่มตัวอย่างนี้อย่างเด่นชัด

ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ การค้นพบรูปแบบการกลายพันธุ์ที่เชื่อมโยงกับการดื้อยาข้าม (Cross-resistance) ระหว่างยา Bdq และ Cfx ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับแพทย์ในการพิจารณาหลีกเลี่ยงหรือปรับสูตรยาให้เหมาะสมสำหรับผู้ป่วย pre-XDR-TB ที่เชื่อมีลักษณะทางจีโนไทป์ดังกล่าว

ข้อมูลการกลายพันธุ์ของยา Bdq ที่ได้ ยังเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จะนำไปสู่การศึกษาเชิงลึก เพื่อพิสูจน์หาความสัมพันธ์ของการกลายพันธุ์กับกลไกการดื้อยา Bdq และอาจนำไปสู่การต่อยอดพัฒนาชุดตรวจวินิจฉัยทางโมเลกุลแบบรวดเร็วได้ในอนาคต นอกจากนี้ข้อมูลด้าน สายวิวัฒนาการที่ได้มา ยังมีประโยชน์ในแง่ของการสอบสวนการระบาดของโรค และนำมาวิเคราะห์ความรุนแรงหรือแนวโน้มการดื้อยาของเชื้อได้ ซึ่งมีความสำคัญต่อการรักษา การควบคุมและการเฝ้าระวังทางระบาดวิทยา

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังคงมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ การขาดข้อมูลค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ยับยั้งเชื้อได้ ในการทดสอบฟิโนไทป์ ทำให้ไม่สามารถระบุความเข้มข้นของยาที่แท้จริงที่ออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ รวมถึงไม่สามารถประเมินกรณีเกิดการดื้อยาในระดับต่ำ (Low-level resistance) ที่อาจเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้การไม่มีข้อมูลประวัติการได้รับยา และผลลัพธ์การรักษาทางคลินิก (Clinical outcomes) ทำให้การอภิปรายผลกระทบทางคลินิกยังไม่สมบูรณ์ อีกทั้งเทคโนโลยีที่ใช้อย่าง WGS แม้จะมีความละเอียดสูงแต่ยังมีข้อจำกัดด้านต้นทุนและการประมวลผลข้อมูลชีวสารสนเทศระดับสูง ในขณะที่การแปลผลด้วยโปรแกรม TB Profiler มีข้อจำกัดที่อาศัยเพียงฐานข้อมูลรหัสพันธุกรรมที่มีการรายงานไว้แล้ว ทำให้มีโอกาสพลาดการค้นพบกลไกการดื้อยารูปแบบใหม่ (Novel mutations) ได้

สรุป

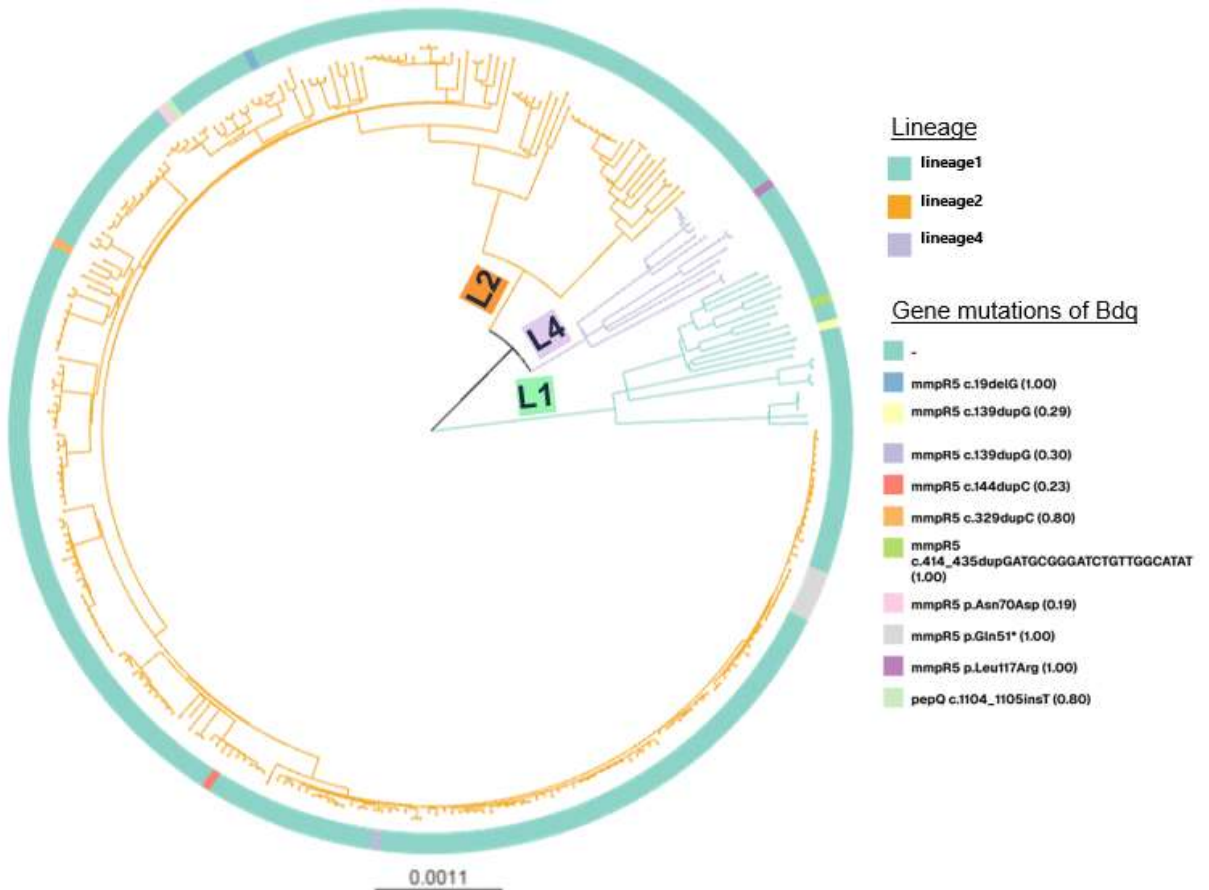
การศึกษาวิจัยครั้งนี้พบว่า MTB สายพันธุ์ Lineage 2 เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการแพร่ระบาดของวัณโรคดื้อยาชนิดรุนแรงในประเทศไทย โดยเชื้อแต่ละสายพันธุ์มีความใกล้ชิดกันในลำดับทางพันธุกรรม แสดงให้เห็นถึงต้นตอการระบาดที่อาจมาจากการแพร่กระจายภายในกลุ่มประชากรหรือพื้นที่เดียวกันมากกว่าการเกิดการกลายพันธุ์แบบอิสระ ทั้งนี้พบเชื้อจำนวน 2 และ 13 ตัวอย่างที่ดื้อยา Bdq และ Cfz ตามลำดับ และไม่พบเชื้อดื้อยา Lzd ข้อมูลจาก WGS แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งการกลายพันธุ์ของยีน *mmpR5* ที่อาจส่งผลให้เกิดการดื้อข้ามไปยัง Cfz อย่างไรก็ตามเชื้อบางตัวอย่างพบความไม่สอดคล้องกันระหว่างผลของ WGS และผลจากการทดสอบทางฟิโนไทป์ของยา Bdq ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป ทั้งนี้ WGS เป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในการเฝ้าระวังการแพร่ระบาดวัณโรค และตรวจการกลายพันธุ์ของยีนที่มีความสัมพันธ์กับการดื้อยา ข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการศึกษานี้ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการรักษา แต่ยังเป็นหลักฐานสำคัญที่ช่วยสนับสนุนความเข้าใจเชิงระบาดวิทยาเชิงโมเลกุลของวัณโรคดื้อยาในประเทศไทย เพื่อการวางรากฐานนโยบายสาธารณสุขและการใช้ยาสูตรใหม่อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน



เอกสารอ้างอิง

- Almeida, D., Iorger, T., Tyagi, S., Li, S. Y., Mdluli, K., Andries, K., et al. (2016). Mutations in pepQ confer low-level resistance to bedaquiline and clofazimine in *Mycobacterium tuberculosis*. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 60(8), 4590–4599.
- Cholo, M. C., Mothiba, M. T., Fourie, B., & Anderson, R. (2017). Mechanisms of action and therapeutic efficacies of the lipophilic antimycobacterial agents clofazimine and bedaquiline. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 72(2), 338–353.
- Coscollá, M., & Gagneux, S. (2014). Consequences of genomic diversity in *Mycobacterium tuberculosis*. *Seminars in Immunology*, 26(5), 431–444.
- Fox, G. J., & Menzies, D. (2013). A review of the evidence for using bedaquiline (TMC207) to treat multi-drug resistant tuberculosis. *Infectious Diseases and Therapy*, 2(2), 123–144.
- Gan, W. C., Ng, H. F., & Ngeow, Y. F. (2023). Mechanisms of linezolid resistance in mycobacteria. *Pharmaceuticals*, 16(6), Article 784.
- Nguyen, T. V. A., Anthony, R. M., Bañuls, A. L., Vu, D. H., & Alffenaar, J. W. C. (2018). Bedaquiline resistance: Its emergence, mechanism, and prevention. *Clinical Infectious Diseases*, 66(10), 1625–1630.
- Nonghanphithak, D., Chaiprasert, A., Smithtikarn, S., Kamolwat, P., Pungrassami, P., Chongsuvivatwong, V., et al. (2021). Clusters of drug-resistant *Mycobacterium tuberculosis* detected by whole-genome sequence analysis of nationwide sample, Thailand, 2014–2017. *Emerging Infectious Diseases*, 27(3), 813–822.
- Perumal, R., Naidoo, K., Naidoo, A., Padayatchi, N., & O'Donnell, M. R. (2023). Baseline and treatment-emergent bedaquiline resistance in drug-resistant tuberculosis: A systematic review and meta-analysis. *European Respiratory Journal*, 62(6), Article 2300639.
- Villellas, C., Coeck, N., Meehan, C. J., Lounis, N., de Jong, B., Rigouts, L., et al. (2017). Unexpected high prevalence of resistance-associated Rv0678 variants in MDR-TB patients without documented prior use of clofazimine or bedaquiline. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 72(3), 684–690.
- World Health Organization. (2022). WHO consolidated guidelines on tuberculosis: Module 4: Treatment – Drug-resistant tuberculosis treatment (2022 update). Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- World Health Organization. (2023). Catalogue of mutations in *Mycobacterium tuberculosis* complex and their association with drug resistance (2nd ed.). World Health Organization.
- World Health Organization. (2024). Global tuberculosis report 2024. Geneva, Switzerland: World Health Organization.

Zimenkov, D. V., Nosova, E. Y., Kulagina, E. V., Antonova, O. V., Arslanbaeva, L. R., Isakova, A. I., et al. (2017). Examination of bedaquiline- and linezolid-resistant *Mycobacterium tuberculosis* isolates from the Moscow region. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 72(7), 1901–1906.



รูปที่ 1 แผนภูมิต้นไม้สายวิวัฒนาการแสดงความสัมพันธ์ของลำดับเบสของยีนที่สัมพันธ์กับการดื้อยา Bdq ของเชื้อ MTB ด้วยโปรแกรม Microreact (<https://microreact.org>)



ตารางที่ 1 การกลายพันธุ์ที่พบในยีนที่สัมพันธ์กับการดื้อยา Bdq และ Lzd ในการศึกษาครั้งนี้

No.	Lineage	Genotypic DST (WGS)			Phenotypic DST			Genotype-Phenotype Concordance (Bdq)
		Bdq	Cfz	Lzd	Bdq	Cfz	Lzd	
1	lineage 1	mmpR5 c.414_435dup GATGCGGGATCTGTTGGCATAT (1.00)	mmpR5 c.414_435dup GATGCGGGATCTGTTGGCATAT (1.00)	No mutation	R	R	S	Concordant
2	lineage 2	mmpR5 c.144dupC (0.23)	mmpR5 c.144dupC (0.23)	No mutation	R	R	S	Concordant
3	lineage 1	mmpR5 c.139dupG (0.29)	mmpR5 c.139dupG (0.29)	No mutation	S	S	S	Discordant
4	lineage 2	mmpR5 p.Gln51* (1.00)	mmpR5 p.Gln51* (1.00)	No mutation	S	R	S	Discordant
5	lineage 2	mmpR5 p.Gln51* (1.00)	mmpR5 p.Gln51* (1.00)	No mutation	S	R	S	Discordant
6	lineage 2	mmpR5 p.Gln51* (1.00)	mmpR5 p.Gln51* (1.00)	No mutation	S	R	S	Discordant
7	lineage 2	mmpR5 p.Gln51* (1.00)	mmpR5 p.Gln51* (1.00)	No mutation	S	R	S	Discordant
8	lineage 2	mmpR5 p.Gln51* (1.00)	mmpR5 p.Gln51* (1.00)	No mutation	S	R	S	Discordant
9	lineage 2	mmpR5 p.Gln51* (1.00)	mmpR5 p.Gln51* (1.00)	No mutation	S	R	S	Discordant
10	lineage 2	mmpR5 c.19delG (1.00)	mmpR5 c.19delG (1.00)	No mutation	S	R	S	Discordant
11	lineage 2	mmpR5 p.Asn70Asp (0.19)	mmpR5 p.Asn70Asp (0.19)	No mutation	S	R	S	Discordant
12	lineage 2	mmpR5 c.19delG (1.00)	mmpR5 c.19delG (1.00)	No mutation	S	R	S	Discordant
13	lineage 2	mmpR5 c.329dupC (0.80)	mmpR5 c.329dupC (0.80)	No mutation	S	R	S	Discordant
14	lineage 1	mmpR5 c.139dupG (0.29)	mmpR5 c.139dupG (0.29)	No mutation	S	R	S	Discordant
15	lineage 4	mmpR5 p.Leu117Arg (1.00)	mmpR5 p.Leu117Arg (1.00)	No mutation	S	S	S	Discordant
16	lineage 2	mmpR5 c.139dupG (0.30)	mmpR5 c.139dupG (0.30)	No mutation	S	S	S	Discordant
17	lineage 2	pepQ c.1104_1105insT (0.80)	pepQ c.1104_1105insT (0.80)	No mutation	S	S	S	Discordant

R = Resistant (ดื้อยา), S = Susceptible (ไวต่อยา)

Concordant หมายถึง ผลการทดสอบทางจีโนไทป์ (WGS) สอดคล้องกับผลทางฟีโนไทป์ (Phenotypic DST)

Discordant หมายถึง ผลการทดสอบทางจีโนไทป์ไม่สอดคล้องกับผลทางฟีโนไทป์



การศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนค่าก่อสร้างคอนโดมิเนียมประเภทอาคารสูง ในเขตพื้นที่ กรุงเทพฯชั้นในกับพื้นที่อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

A Comparative Study of High-Rise Condominium Construction Costs Inner Bangkok
versus Hua Hin District, Prachuap Khiri Khan

สัญญาลักษณ์ ปรีชา¹ และ บุญรุักษ์ แวนเบอเซอร์¹

Sanyalak Preecha¹ and Boonruk Vanborsel¹

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของต้นทุนการก่อสร้างที่เกิดขึ้นจริง โดยวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของต้นทุนการก่อสร้าง และศึกษาหาสาเหตุและสรุปปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างที่ทำการศึกษเปรียบเทียบจากคอนโดมิเนียมประเภทอาคารสูง ทั้งหมดจำนวน 3 โครงการ โดยศึกษาจาก 2 โครงการ ในเขตคลองเตยและเขตวัฒนา ของพื้นที่กรุงเทพฯชั้นใน เปรียบเทียบกับโครงการพื้นที่อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จำนวน 1 โครงการ โดยใช้ฐานข้อมูล Mango Anywhere (หรือ Mango ERP) จากการกำหนดขอบเขตด้านเวลาออกเป็น 2 ส่วนหลัก โดยส่วนแรกเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลโครงการก่อสร้างย้อนหลังในช่วงปี พ.ศ. 2562 ถึง พ.ศ. 2568 ซึ่งครอบคลุมระยะเวลาดังแต่วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2562 ถึง วันที่ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2568 ที่เป็นโครงการแล้วเสร็จทั้ง 3 โครงการและในส่วนที่สองเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการศึกษาวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมด ซึ่งกำหนดระยะเวลาดำเนินการระหว่างเดือนมีนาคม พ.ศ. 2569 ถึงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2569 นำมาเทียบกับสถิติต้นทุนการก่อสร้าง ผู้วิจัยมุ่งศึกษาการเปรียบเทียบจากข้อมูลการก่อสร้างที่เป็นต้นทุนของโครงการที่มีสถิติและค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจริงจากการศึกษารูปแบบพารามิเตอร์ที่นำไปประมาณราคาค่าก่อสร้างได้ใกล้เคียงกับค่าใช้จ่ายจริง สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ได้จำนวน 7 ค่าพารามิเตอร์ จากจำนวน 12 ค่าพารามิเตอร์

คำสำคัญ: อาคารสูง ต้นทุนค่าก่อสร้าง ปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการก่อสร้าง การประมาณค่าพารามิเตอร์ ระบบ Mango Anywhere

¹ สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย กรุงเทพฯ 10330 ประเทศไทย

Department of Construction Management, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok Uthenthawai Campus, Bangkok 10330, Thailand.



Abstract

This study aims to analyze the differences in actual construction costs by identifying and examining cost parameters, as well as investigating the underlying causes and summarizing the key factors influencing construction costs. The study conducts a comparative analysis of three high-rise condominium projects. Two projects are located in the Khlong Toei and Watthana districts within the inner Bangkok area, while the third project is situated in Hua Hin District, Prachuap Khiri Khan Province.

The analysis is based on data obtained from the Mango Anywhere (or Mango ERP) database system. The study period is divided into two main phases. The first phase involves the collection of retrospective construction project data from 2019 to 2025, covering the period from March 1, 2019, to May 15, 2025, including all three completed projects. The second phase encompasses the duration of the research and data analysis, conducted from March 2026 to May 2026.

The findings are compared with construction cost statistics, with a focus on evaluating actual project cost data and recorded expenditures. Through the analysis of parameter models used for construction cost estimation, the study identifies parameters that closely approximate actual costs. Ultimately, a total of 7 optimal cost parameters are determined from a total of 12 parameters.

Keywords: High rise building. Construction cost. Factors affecting construction cost. Parameter estimation. Mango anywhere system.

บทนำ (Introduction)

ด้วยการเจริญเติบโตของประเทศทำให้การพัฒนาเศรษฐกิจโดยเฉพาะธุรกิจการก่อสร้างได้ขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องดังจะปรากฏให้เห็นได้ว่าการพัฒนาโครงการก่อสร้างในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ ชั้นใน ยังเป็นเป้าหมายการพัฒนาของภาคธุรกิจที่ประกอบด้วยการก่อสร้างคอนโดมิเนียม แต่ด้วยการพัฒนาที่หนาแน่นและข้อจำกัดของพื้นที่ก่อสร้างที่มีเนื้อที่น้อยลงส่งผลให้ราคาที่ดินมีราคาสูงมากขึ้น ทำให้การพัฒนาการก่อสร้างต้องใช้การออกแบบเพื่อให้ได้ค่าก่อสร้างคุ้มค่าต่อการลงทุนมากที่สุด ดังนั้นในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ ชั้นในจะมุ่งเน้นการออกแบบโครงการก่อสร้างเป็นประเภทอาคารสูง ซึ่งจะทำให้มีจุดคุ้มทุนมากกว่า ทั้งนี้ในการพัฒนาการก่อสร้างยังได้กระจายการก่อสร้างไปสู่อำเภอต่างของกรุงเทพฯ เช่น เชียงใหม่ สมุย ภูเก็ต เมืองพัทยา และเมืองหัวหิน ที่เรียกได้ว่าเป็นแหล่งท่องเที่ยวหลักของประเทศ แต่ข้อจำกัดในการขยายตัวของหัวเมืองท่องเที่ยวก็จะมีลักษณะคล้ายกันกับข้อจำกัดในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ ชั้นใน

ดังนั้นการพัฒนาการออกแบบโครงการก่อสร้างในเขตหัวเมืองท่องเที่ยวก็จะเริ่มออกแบบให้โครงการพัฒนาเป็นคอนโดมิเนียมประเภทอาคารสูงเพื่อให้เป็นจุดคุ้มทุนต่อการลงทุน ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ทางผู้ศึกษา



ได้มุ่งเน้น เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนค่าก่อสร้างของโครงการอาคารสูงในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครชั้นใน 2 โครงการและโครงการก่อสร้างอาคารสูงในเขตอำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ อีก 1 โครงการโดยการศึกษาวิจัยหาข้อเปรียบเทียบต้นทุนค่าก่อสร้างโดยการศึกษาและวิเคราะห์ทั้งต้นทุนการก่อสร้างทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งมีข้อแตกต่างที่ชัดเจน อาทิเช่น สถานที่ตั้งโครงการก่อสร้าง ระยะเวลาการก่อสร้าง ระยะทางการขนส่ง ต้นทุนแรงงาน ต้นทุนค่าวัสดุ ต้นทุนค่าโชห่วย หรือข้อกำหนดทาง EIA เป็นต้น

ทางผู้ศึกษาวิจัยจึงได้นำหลักการวิเคราะห์โดยการใช้พารามิเตอร์วิเคราะห์หาค่ามาตรฐานของโครงการ โดยใช้พื้นที่ก่อสร้างต่อหน่วย ระยะเวลาต่อโครงการ เพื่อนำมาหาค่ามาตรฐานมาวิเคราะห์เปรียบเทียบให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด แล้วนำมาวิเคราะห์ข้อมูลจริงแต่ละหมวดงานนำมาสรุปเพื่อเป็นแนวทางการวิเคราะห์เพิ่มเติมในอนาคต

วัตถุประสงค์ (Objective)

1. เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของต้นทุนการก่อสร้างคอนโดมิเนียมประเภทอาคารสูงจากค่าพารามิเตอร์ เปรียบเทียบระหว่างโครงการในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครชั้นใน 2 โครงการ กับพื้นที่อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 1 โครงการ
2. เพื่อศึกษาหาสาเหตุและสรุปปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างที่ทำการศึกษารเปรียบเทียบจากเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครชั้นใน 2 โครงการ กับพื้นที่อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 1 โครงการ และคำนึงถึงเขตพื้นที่ของระยะทางของโครงการที่แตกต่างกัน

อุปกรณ์และวิธีการ (Materials and Method)

จัดทำกรเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ โดยการดึงข้อมูลจากโปรแกรม บริหารงานก่อสร้างระบบ Mango Anywhere ซึ่งเป็นเครื่องมือบันทึกค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจริงทั้ง ค่าใช้จ่ายทางอ้อม และค่าใช้จ่ายทางตรง โดยค่าใช้จ่ายทางอ้อมประกอบไปด้วย งานเตรียมการ และค่าใช้จ่ายทางตรง ประกอบไปด้วย งานโครงสร้าง งานสถาปัตยกรรม งานระบบประกอบ อาคาร โดยข้อมูลค่าใช้จ่ายจะถูกบันทึกระหว่างการดำเนินงานก่อสร้าง ตั้งแต่เริ่มโครงการจนถึงสิ้นสุดโครงการ มาประกอบการวิเคราะห์ข้อมูล โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อจะคำนวณหาราคา ต่อหน่วย (Unit Cost) โดยใช้ฐานข้อมูลต้นทุนที่เกิดขึ้นจริงจากทั้ง 3 โครงการในพื้นที่กรุงเทพมหานครชั้นใน กับโครงการพื้นที่อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ที่ก่อสร้างสิ้นสุดลงแล้ว โดยค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ ประกอบไปด้วย ขนาดพื้นที่ดิน พื้นที่ใช้สอย พื้นที่ก่อสร้าง พื้นที่ Post-Tension จำนวนห้องพัก จำนวนชั้นและระยะเวลาการก่อสร้าง ซึ่งค่าพารามิเตอร์แต่ละค่าที่กำหนดเป็นรูปแบบที่จะใช้เป็นตัวที่สร้างความสัมพันธ์กับลักษณะพื้นที่ และขอบเขตของลักษณะโครงการ โดยจะนำไปกำหนดในแต่ละรายการงาน

ผู้วิจัยศึกษาวิเคราะห์จากข้อมูลโครงการก่อสร้างคอนโดมิเนียมประเภทอาคารสูง ทั้งหมด 3 โครงการ จาก 2 โครงการ ในเขตคลองเตยและเขตวัฒนา ของพื้นที่กรุงเทพมหานครชั้นใน เปรียบเทียบกับโครงการพื้นที่อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 1 โครงการ โดยได้กำหนดขอบเขตด้านเวลาออกเป็น 2 ส่วนหลัก



โดยส่วนแรกเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลโครงการก่อสร้างย้อนหลังในช่วงปี พ.ศ. 2562 ถึง พ.ศ. 2568 ซึ่งครอบคลุมระยะเวลาตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2562 ถึงวันที่ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2568 ที่เป็นโครงการแล้วเสร็จทั้ง 3 โครงการและในส่วนที่สองเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการศึกษาวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมด ซึ่งกำหนดระยะเวลาดำเนินการระหว่างเดือนมีนาคม พ.ศ. 2569 ถึงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2569 การศึกษาครั้งนี้สามารถเปรียบเทียบราคาค่าก่อสร้างตามมูลค่างานในปีที่เสนอราคากับมูลค่างานที่ปรับแก้ตามค่าเงินเฟ้อซึ่งอัตราเงินเฟ้อเท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์ และค่าก่อสร้างจริงตามบันทึกต้นทุนในระบบ Mango

ผลและวิจารณ์ (Result and Discussion)

ผลการวิเคราะห์รูปแบบพารามิเตอร์

การประมาณค่าพารามิเตอร์ก่อสร้าง (Parametric Estimating) คือเทคนิคการคำนวณต้นทุนและระยะเวลาโครงการอย่างรวดเร็ว โดยใช้ข้อมูลสถิติในอดีตมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น การนำพื้นที่ใช้สอย (ตร.ม.) คูณกับค่าเฉลี่ยต่อหน่วย เพื่อประเมินงบประมาณเบื้องต้นที่มีความแม่นยำสูงเมื่อขอบเขตงานชัดเจน แนวทางและหลักการประมาณค่าพารามิเตอร์ก่อสร้าง

ตารางที่ 1 สรุปค่าพารามิเตอร์แบบ 7 พารามิเตอร์

Parameter No.	Design Parameters Available	Unit
1.	พื้นที่ใช้สอย Gross Floor Area (GFA)	ตร.ม.
2.	พื้นที่ก่อสร้าง Construction Floor Area (CFA)	ตร.ม.
3.	พื้นที่ดินโครงการ	ตร.ม.
4.	พื้นที่ขอบอาคาร	ตร.ม.
5.	พื้นที่ Post-Tension	ตร.ม.
6.	จำนวนชั้น	ชั้น
7.	จำนวนห้องพัก	ห้อง

ตารางที่ 1 จากการศึกษพบว่าค่าพารามิเตอร์แบบ 7 ค่าพารามิเตอร์ ที่ออกแบบไว้เบื้องต้นจากจำนวน 12 ค่าพารามิเตอร์ สามารถนำมาจัดกลุ่มตามรายละเอียดงานที่นำไปประมาณราคาค่าก่อสร้างได้ใกล้เคียงกับค่าใช้จ่ายจริงมากที่สุด



ผลการวิเคราะห์ การเก็บข้อมูลและการใช้พารามิเตอร์

จัดทำกรเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ โดยการดึงข้อมูลจากโปรแกรม บริหารงานก่อสร้างระบบ Mango Anywhere ซึ่งเป็นเครื่องมือบันทึกค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจริงทั้ง ค่าใช้จ่ายทางอ้อม และค่าใช้จ่ายทางตรง โดยค่าใช้จ่ายทางอ้อมประกอบไปด้วย งานเตรียมการ และค่าใช้จ่ายทางตรง ประกอบไปด้วย งานโครงสร้างงานสถาปัตยกรรม งานระบบประกอบ อาคาร โดยข้อมูลค่าใช้จ่ายจะถูกบันทึกที่ระหว่างการดำเนินงานก่อสร้าง ตั้งแต่เริ่มโครงการจนถึงสิ้นสุดโครงการ มาประกอบการวิเคราะห์ข้อมูล

การใช้พารามิเตอร์หาค่าก่อสร้างจากราคาต่อหน่วย (Unit Cost)

การคิดหาราคาค่าก่อสร้างจากราคาต่อหน่วย (Unit Cost) ดังนี้

Total Cost (WBS) = ค่าพารามิเตอร์(โครงการทดสอบ) x Unit Cost (WBS ต้นแบบ) ตัวอย่าง เช่น รายการงานคอนกรีตของโครงการทดสอบกำหนด พารามิเตอร์เป็นพื้นที่ก่อสร้างตามรูปแบบพารามิเตอร์ของโครงการต้นแบบ โดยโครงการทดสอบค่าพารามิเตอร์พื้นที่ก่อสร้าง คือ 20,000 ตร.ม.และ ราคาต่อหน่วย (Unit Cost) งานคอนกรีตของโครงการต้นแบบ คือ 1,500 บาทต่อตารางเมตร ซึ่งสามารถคำนวณราคาค่าก่อสร้าง (Unit Cost) งาน คอนกรีตได้ ดังนี้

Total Cost (คอนกรีต) = ค่าพารามิเตอร์(พื้นที่ก่อสร้าง) x งาน คอนกรีตโครงการต้นแบบ

Total Cost (คอนกรีต) = 20,000 x 1,500

Total Cost (คอนกรีต) = 30,000,000.00 บาท

จากนั้น ทำขั้นตอนเดียวกันกับรายการงานหมวดอื่น ๆ จนครบก็จะได้ ราคาค่าก่อสร้างทั้งโครงการจากการประมาณราคาค่าก่อสร้างโดยวิธีพารามิเตอร์ได้ (เทพฤทธิ์ ศรีธนาวิวัฒน์, 2565)

มูลค่างานที่ปรับแก้ตามค่าเงินเฟ้อ

เนื่องจากราคาวัสดุก่อสร้าง และบริการที่มีการปรับตัวราคาอยู่เสมอ ตามสภาวะเศรษฐกิจ ซึ่งมีผลกระทบต่อต้นทุนราคาค่าก่อสร้างไม่ว่าจะเป็น ค่าวัสดุ ค่าขนส่ง และค่าบริการต่าง ๆ จึงต้องมีการคิดมูลค่างานก่อสร้างที่ ปรับแก้ตามค่าเงินเฟ้อ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับราคาค่าก่อสร้างจริงและราคาค่าก่อสร้างจากการประมาณราคาโดยวิธีพารามิเตอร์



ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบมูลค่างานหลังปรับแก้ค่าเงินเพื่อกับต้นทุนจริง

ลำดับ	โครงการ	มูลค่างาน (บาท)	คำนวณมูลค่า เงินเพื่อ(บาท)	Actual Cost (บาท)	วิเคราะห์
1.	โครงการ A เขตคลองเตย ปี 2562	692,888,746.13	852,165,760.51	601,072,164.07	คิดค่าเงินเพื่อถึงปี 2569 ที่ 3% ต่อปี
2.	โครงการ B เขตวัฒนา ปี 2564	759,069,851.61	879,969,999.55	676,531,340.39	คิดค่าเงินเพื่อถึงปี 2569 ที่ 3% ต่อปี
3.	โครงการ C อำเภอหัวหิน ปี 2566	874,714,713.42	955,824,384.65	786,783,119.02	คิดค่าเงินเพื่อถึงปี 2569 ที่ 3% ต่อปี

ตารางที่ 2. จากการศึกษาครั้งนี้สามารถเปรียบเทียบราคาค่าก่อสร้างตามมูลค่างานในปีที่ เสนอราคา กับมูลค่างานที่ปรับแก้ตามค่าเงินเพื่อซึ่งอัตราเงินเพื่อเท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์ ในปี พ.ศ. 2569 และค่าก่อสร้างจริง

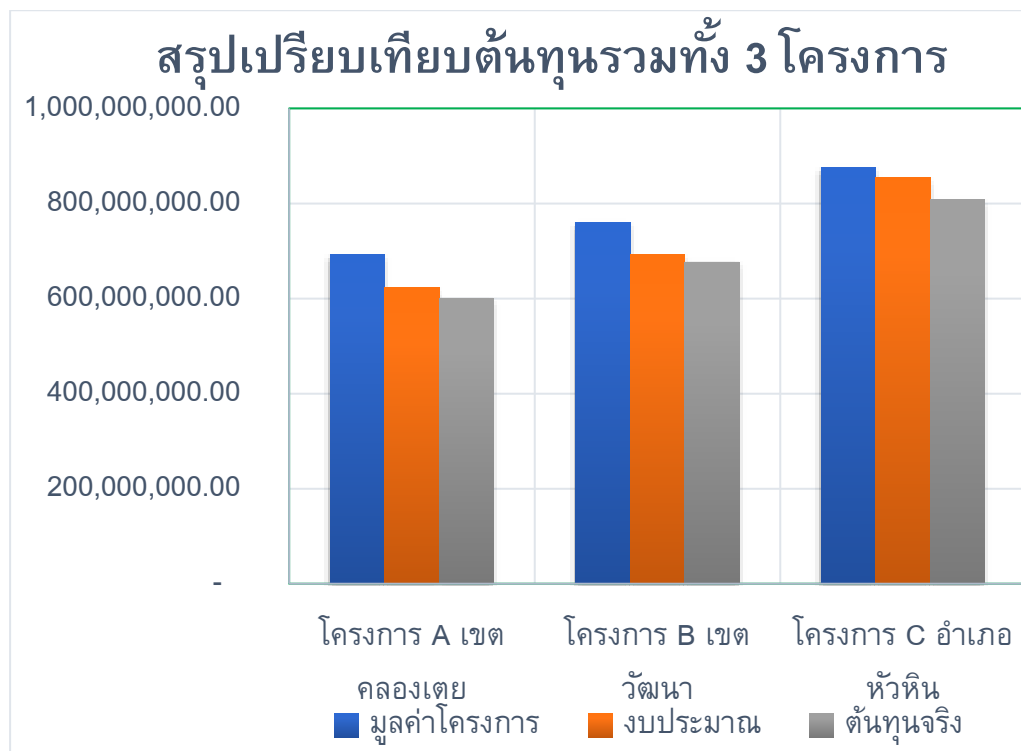
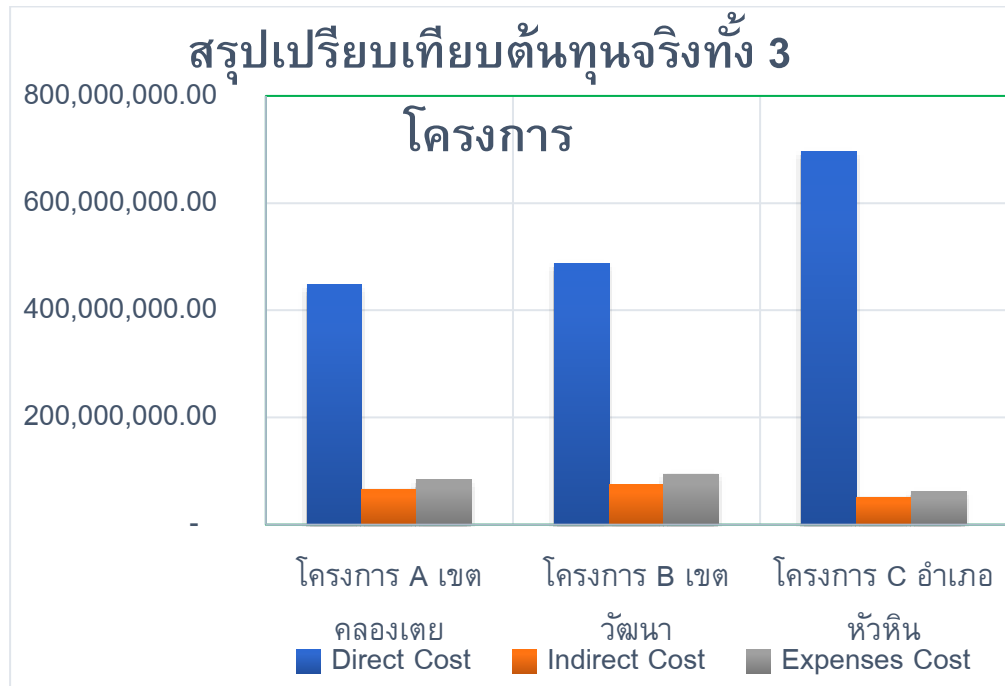
บทสรุป (Conclusion)

การศึกษานี้เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนค่าก่อสร้างจากเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครชั้นใน 2 โครงการ กับพื้นที่ อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 1 โครงการ โดยสรุปผลตามวัตถุประสงค์ 2 ข้อ ได้แก่

วัตถุประสงค์ที่ 1 ต้นทุนค่าก่อสร้างโครงการ C อำเภอหัวหิน มีต้นทุนค่าก่อสร้างทางตรง (Direct Cost) ที่สูงกว่าโครงการ A เขตคลองเตยและโครงการ B เขตวัฒนา โดยเฉลี่ยหากคิดจากพื้นที่ก่อสร้าง CFA.ประมาณร้อยละ 21.03 โดยสาเหตุของค่าขนส่ง ค่าแรงงานจากต้นทุนทางตรง แต่ทั้ง 3 โครงการมีต้นทุน การก่อสร้างจริงน้อยกว่างบประมาณและราคามูลค่าโครงการ BOQ. ถ้าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 5-12 ส่วนต้นทุน ทางอ้อม (Indirect Cost) โครงการ C อำเภอหัวหิน มีต้นทุนต่ำกว่าโครงการ A เขตคลองเตย และโครงการ B เขตวัฒนา โดยเฉลี่ยคิดจากพื้นที่ก่อสร้าง CFA.ประมาณร้อยละ 42.61 ซึ่งโครงการ C อำเภอหัวหินมีต้นทุน ค่าก่อสร้างน้อยกว่า (ถ้าไม่) งบประมาณและมูลค่าโครงการส่วนโครงการ A เขตคลองเตยและโครงการ B เขตวัฒนามีต้นทุนการก่อสร้างจริงมากกว่า (ขาดทุน) กว่างบประมาณและมูลค่าโครงการ BOQ.

วัตถุประสงค์ที่ 2 การวิเคราะห์สาเหตุและสรุปปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างที่ทำการเปรียบเทียบ จากการศึกษาพบว่าระยะทางขนส่งมีผลกระทบกับราคาวัสดุโดยตรงรวมถึงค่าแรงฝีมือที่มี ส่วนต่างค่าตอบแทนที่ต่างกันทำให้ปัจจัยต้นทุนของการก่อสร้างจริงโครงการ C อำเภอหัวหิน มีต้นทุนค่า ก่อสร้างทางตรง (Direct Cost) ที่มากกว่าในเขตกรุงเทพฯชั้นในทั้ง 2 โครงการ ส่วนต้นทุนทางอ้อม (Indirect Cost) โครงการ C อำเภอหัวหิน มีต้นทุนค่าก่อสร้างน้อยกว่าในเขตกรุงเทพฯชั้นในเนื่องจากบริหาร โครงการที่มีความเสี่ยงได้ง่ายกว่าและปัจจัยที่มีผลต่อการประมาณค่าพารามิเตอร์ คือการเก็บข้อมูลบันทึก ต้นทุนที่ไม่ตรงกับหมวดงาน WBS ให้ถูกต้องตามประเภทหมวดงานที่ได้กำหนดตอนทำงบประมาณไว้ ซึ่งรวมถึง

ความแตกต่างของการออกแบบชนิดวัสดุที่ใช้ในการติดตั้งในแต่ละโครงการด้วย จากการวิจัยฐานข้อมูลจริง แสดงสรุปเปรียบเทียบต้นทุนของทั้ง 3 โครงการ ได้ดังนี้





ตารางที่ 3 และ 4 แสดงกราฟการสรุปเปรียบเทียบต้นทุนรวมทั้ง 3 โครงการ

ข้อเสนอแนะ ได้แก่ (1) การเก็บข้อมูลต้นทุนจากระบบ ERP ควรจะต้องตรวจสอบค่าใช้จ่ายที่บันทึกจัดสรรในแต่ละหมวดงาน WBS ให้ถูกต้องตามหมวดงานที่ได้กำหนด ตอนทำงบประมาณไว้ให้ถูกต้องและในขั้นตอนการประมาณราคาโดยวิธีพารามิเตอร์กับโครงการต้นแบบ จำนวน 3 โครงการนั้น พบว่าการออกแบบกำหนดค่าพารามิเตอร์ในหนึ่งรูปแบบนั้นในแต่ละโครงการมีรูปแบบรายการงานตอนจัดทำงบประมาณมีรูปแบบรายการงาน WBS ที่ไม่เหมือนกัน หมวดงานที่มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดคือรายการงานสถาปัตยกรรม ซึ่งตอนการนำค่าพารามิเตอร์มาใช้กับโครงการใหม่ที่รายการไม่ตรงกันอาจจะไม่สามารถประมาณการราคางานในส่วนนั้นได้ อาจจะต้องนำค่าพารามิเตอร์ของโครงการอื่นที่มีลักษณะรูปแบบอาคารใกล้เคียงกันมาใช้แทน

ข้อควรระวังความละเอียดของการกำหนดหมวดงานตอนจัดทำงบประมาณแต่ละโครงการมีความแตกต่างกัน การบันทึกค่าใช้จ่ายอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ในอนาคตควรจัดทำ WBS ที่มีรายการงานเหมือนกันให้มากที่สุดเพื่อการออกแบบพารามิเตอร์และนำไปประมาณราคาได้อย่างใกล้เคียงมากที่สุด และในข้อจำกัดของจำนวนโครงการที่น้อยเพียง 3 โครงการ เสนอแนวทางเพิ่มเติมจำนวนโครงการเปรียบเทียบทางการวิจัยในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.บุญรักษ์ แวนบอเซอร์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่เสนอแนะแนวทางการศึกษาวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบหัวข้อและเค้าโครงการค้นคว้าอิสระทุกท่านสำหรับคำแนะนำอันมีคุณค่าและมีประโยชน์



เอกสารอ้างอิง (Reference)

- ชนาธิป แซ่อู่ย และสันติ เจริญพัฒนา. (2559). ระบบการจัดการงบประมาณและการควบคุมต้นทุนโครงการก่อสร้าง, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21, สงขลา 28-30 มิถุนายน 2559 หน้า 881-891.
- ณัฐพล จัปใจน่าย และจักรพงษ์ พงษ์เพ็ง. (2559). ระบบการจัดการงบประมาณและการควบคุมต้นทุนโครงการก่อสร้าง, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21, สงขลา 28-30 มิถุนายน 2559 หน้า 900-906
- เทชฤทธิ์ ศรีธนาหะนนท์. (2565). การศึกษาต้นทุนโครงการอาคารพักอาศัยคอนโดมิเนียมประเภทอาคารสูงในพื้นที่กรุงเทพมหานคร. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27, เชียงราย 24-26 สิงหาคม 2565 หน้า CEM171-176
- วรรณวิทย์ แต้มทอง. (2547). การประมาณค่าพารามิเตอร์เอกสารประกอบการสอนวิชา 185431 การประมาณราคาและการควบคุมค่าใช้จ่ายในโครงการ. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, หน้า 10-13.
- Monteiro, F.P., Sousa, V., Meireles, I. and Oliveira Cruz, C. (2021). Cost modelling from the contractor perspective: application to residential and office building. Building, 11, pp.529.
- Sundae Solution Co., Ltd. (2021). ระบบ ERP (Enterprise Resource Planning)



การวิเคราะห์ต้นทุนและการควบคุมเวลาโดยใช้วิธีการวิเคราะห์มูลค่างานที่ได้รับ
กรณีศึกษา: โครงการก่อสร้างคอนโดมิเนียม 38 ชั้น อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

Analysis of Cost and Schedule Control Using Earned Value Management: Case Study of
38-Story Condominium Construction Project, Hat Yai District, Songkhla Province

เสาวณีย์ พุ่มมาลี¹ และ บุญรักษ์ แวนบอเซอร์¹

Saowanee Phummalee¹ and Boonruk Vanborsel¹

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์มูลค่างานที่ได้รับ (Earned Value Management:EVM) ร่วมกับโปรแกรม Microsoft Project 2016 ในการติดตามและควบคุมโครงการก่อสร้างอาคารชุดพักอาศัยสูง และ (2) วิเคราะห์ประสิทธิภาพการดำเนินงานด้านระยะเวลาและต้นทุนเชิงปริมาณโดยใช้ตัวชี้วัด CPI, SPI และ EAC กรณีศึกษาคือโครงการก่อสร้างอาคารชุดพักอาศัย ESCENT HATYAI II สูง 38 ชั้น ตั้งอยู่ที่ ถนนกาญจนวนิชย์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา มูลค่าสัญญางาน 587,500,000 บาท ระยะเวลา 668 วัน การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงปริมาณแบบกรณีศึกษาใช้ข้อมูลจริงจากแผนงาน (Master Schedule) บัญชีปริมาณงานและราคา (BOQ) รายงานความก้าวหน้า และต้นทุนจริง (Actual Cost) โดยวิเคราะห์ใน 2 ช่วงเวลา ช่วงที่ 1 ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2568 และช่วงที่ 2 ณ วันที่ 31 มีนาคม 2569 งบประมาณที่ใช้อ้างอิง(BAC)เท่ากับ 476,134,887.19 บาท (ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม) ผลการศึกษพบว่า ช่วงที่ 1 ค่า SPI เท่ากับ 0.653 และ CPI เท่ากับ 0.858 สะท้อนว่างานช้ากว่าแผนและต้นทุนเกินงาน ในช่วงที่ 2 ค่า SPI ปรับตัวดีขึ้นเป็น 0.786 และ CPI ปรับตัวดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็น 1.215 แสดงถึงการควบคุมต้นทุนที่ดีขึ้น การคาดการณ์ต้นทุนสิ้นสุดโครงการ (EAC) ด้วยวิธี BAC/CPI เท่ากับ 392,015,563 บาท ซึ่งต่ำกว่างบประมาณเดิม 84,119,324 บาท ผลการศึกษายืนยันว่าEVM ร่วมกับMicrosoft Project 2016 เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการตรวจพบปัญหาความล่าช้าและคาดการณ์ต้นทุนโครงการก่อสร้างอาคารสูงในภาคใต้ของประเทศไทยได้อย่างเป็นระบบ

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ค่า CPI ที่ปรับตัวดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก 0.858 เป็น 1.215 สะท้อนถึงความสามารถของผู้รับเหมาในการควบคุมต้นทุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ค่า SPI ที่ยังต่ำกว่า 1.0 บ่งชี้ถึงความจำเป็นเชิงบริหารในการเร่งรัดแผนงาน โดยเฉพาะงานสถาปัตยกรรม (C.AR) ซึ่งมีสัดส่วนงบประมาณสูงถึงร้อยละ 48.1 ของ BAC ผลการศึกษานี้เสนอแนะให้ผู้บริหารโครงการนำ EVM มาใช้เป็นเครื่องมือตัดสินใจเชิงรุกในโครงการก่อสร้างอาคารสูงที่มีบริบทคล้ายกันในอนาคตใต้ของประเทศไทย

¹ สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย

Department of Construction Management, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Bangkok 10330, Thailand.



คำสำคัญ : การวิเคราะห์มูลค่างานที่ได้รับ การควบคุมต้นทุน การควบคุมเวลา Microsoft Project 2016 อาคารชุดพักอาศัยสูง

Abstract

This study aims to: (1) investigate the application of Earned Value Management (EVM) integrated with Microsoft Project 2016 for monitoring and controlling a high-rise residential construction project, and (2) quantitatively analyze project performance in terms of schedule and cost using CPI, SPI, and EAC. The case study is the ESCENT HATYAI II project a 38-story residential condominium located on Kanchanawanit Road, Hat Yai District, Songkhla Province, valued at THB 587.5 million with a contract duration of 668 days (16 August 2025 – 15 June 2027). Notably, the contractor, TTS Engineering (2004) Co., Ltd., took over the project from the original contractor, who returned the contract due to financial liquidity problems, commencing work from the structural floor at Level 4. This quantitative case study utilized actual project data including the Master Schedule, BOQ, progress reports, and actual cost records, analyzed over two reporting periods: Period 1 (31 December 2025) and Period 2 (31 March 2026). The Budget at Completion (BAC) was THB 476,134,887 (excluding VAT). Results showed that in Period 1, SPI = 0.653 and CPI = 0.858, indicating that the project was behind schedule and had a cost overrun relative to earned value. In Period 2, SPI improved to 0.786 and CPI improved significantly to 1.215, demonstrating greater cost efficiency. The Estimate at Completion (EAC) calculated using BAC/CPI was THB 392,015,563 — approximately THB 84.1 million below the original budget. The findings confirm that EVM integrated with Microsoft Project 2016 is an effective tool for the early detection of schedule delays and cost issues in high-rise construction projects in southern Thailand.

Keywords : Earned Value Management Cost Control Schedule Control Microsoft Project 2016 High-Rise Residential Construction

บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นหนึ่งในภาคเศรษฐกิจที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศ การดำเนินโครงการก่อสร้างโดยเฉพาะอาคารชุดพักอาศัยสูง (High-Rise Residential Construction) มีความซับซ้อนสูงเกี่ยวข้องกับผู้รับเหมาช่วงหลายรายและต้องดำเนินงานในพื้นที่จำกัดซึ่งทำให้โครงการมีความเสี่ยงต่อความล่าช้าและต้นทุนบานปลาย (Kerzner, 2017; Cheng & Li, 2014) งานวิจัยของ อรรถพล นามละคร และคณะ (2568) พบว่าปัญหาสภาพคล่องของผู้รับเหมาและการขาดระบบติดตามต้นทุนที่บูรณาการเวลาและต้นทุนเข้าด้วยกันเป็นสาเหตุสำคัญของความล่าช้าและต้นทุนบานปลายในโครงการก่อสร้างของไทย

วิธีการวิเคราะห์มูลค่างานที่ได้รับ (Earned Value Management: EVM) ได้รับการยอมรับในระดับสากลว่าเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการบูรณาการข้อมูลแผนงาน งบประมาณ และผลการดำเนินงานจริง (Fleming & Koppelman, 2016; PMI, 2021) โดยสามารถทำหน้าที่เป็น Early Warning System ตรวจพบปัญหาตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นซึ่งมีต้นทุนในการแก้ไขต่ำกว่าการรอให้ปัญหาปรากฏในระยะท้ายงานวิจัยของ Christensen (1999) ยืนยันว่าค่า CPI ที่วัดได้เมื่อโครงการผ่านมาร้อยละ 20 ของระยะเวลามีเสถียรภาพสูงและสามารถทำนายต้นทุนสุดท้ายได้อย่างแม่นยำ

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ EVM ร่วมกับ Microsoft Project 2016 ในโครงการก่อสร้างอาคารชุดพักอาศัยสูงในบริบทของภาคใต้ประเทศไทยยังมีน้อยมาก (ขวัญสุขศรี สุชาติ, 2564; สมชาย วรธงไชย, 2555) การศึกษาค้นคว้าจึงมุ่งเติมเต็มช่องว่างดังกล่าวโดยใช้โครงการ ESCENT HATYAI II เป็นกรณีศึกษา

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ EVM ร่วมกับ Microsoft Project 2016 ในการติดตามและควบคุมโครงการก่อสร้างอาคารชุดพักอาศัยสูง กรณีศึกษาโครงการ ESCENT HATYAI II อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา
2. เพื่อวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพการดำเนินงานด้านระยะเวลาและต้นทุนเชิงปริมาณโดยใช้ตัวชี้วัด CPI, SPI และ EAC

อุปกรณ์และวิธีการ

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) รูปแบบกรณีศึกษา (Case Study) ตามแนวทางของ Yin (2018) กรอบแนวคิดอ้างอิงมาตรฐาน EVM ตาม PMBOK Guide (PMI, 2021) และ ANSI/EIA-748 โครงการกรณีศึกษาคือ ESCENT HATYAI II อาคารชุดพักอาศัยสูง 38 ชั้น บวกชั้นใต้ดิน 1 ชั้น จำนวน 662 ห้องพัก พื้นที่ใช้สอยรวม 43,225.18 ตารางเมตร มูลค่าสัญญา 587,500,000 บาท (รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม) ระยะเวลาก่อสร้าง 668 วัน ตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม 2568 ถึง 15 มิถุนายน 2570 ตั้งอยู่ที่ถนนกาญจนวนิชย์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา งบประมาณ BAC ที่ใช้ในการวิเคราะห์ EVM เท่ากับ 476,134,887.19 บาท (ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม)

ทั้งนี้ โครงการดังกล่าวมีบริบทพิเศษที่สำคัญ กล่าวคือ บริษัท ที.ที.เอส. เอ็นจิเนียริง (2004) จำกัด ได้เข้าทำงานต่อจากผู้รับเหมาเดิมซึ่งขาดสภาพคล่องในการดำเนินงาน จนต้องคืนงานให้แก่เจ้าของโครงการ โดยบริษัทเข้าทำงานต่อในส่วนของการก่อสร้าง งานสถาปัตยกรรม และงาน Hardscape เริ่มต้นดำเนินงานตั้งแต่วันที่ 4 วันเริ่มสัญญาคือวันที่ 16 สิงหาคม 2568 ถึงวันที่ 15 มิถุนายน 2570 รวมระยะเวลาก่อสร้างทั้งสิ้น 668 วัน การวิเคราะห์ EVM ในการศึกษาครั้งนี้จึงอ้างอิง Baseline ที่กำหนดขึ้นใหม่ นับตั้งแต่วันที่บริษัทเข้าทำงานต่อ

ข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลทุติยภูมิจากเอกสารโครงการที่ผ่านการรับรอง ได้แก่ (1) แผนงานหลัก (Master Schedule) สำหรับกำหนด Baseline และ Planned Value (PV) (2) บัญชีปริมาณงานและราคา (BOQ)



สำหรับกำหนด Budget at Completion (BAC) และงบประมาณรายหมวดงาน (3) รายงานความก้าวหน้ารายเดือน (% Complete) สำหรับคำนวณ Earned Value (EV) และ (4) ข้อมูลต้นทุนจริง (Actual Cost: AC) จากระบบบริหารต้นทุนก่อสร้าง (โปรแกรมพจมาน) แบบ Real-time ตรวจสอบความน่าเชื่อถือด้วยหลัก Triangulation (Yin, 2018) โดยเปรียบเทียบข้อมูลจาก 3 แหล่ง คือเอกสารเบิกจ่าย รายงานหน้างาน และระบบบัญชีโครงการ

เครื่องมือหลักที่ใช้วิเคราะห์ ได้แก่ Microsoft Project 2016 สำหรับจัดทำแผนงาน กำหนด Baseline และคำนวณตัวชี้วัด EVM อัตโนมัติ และ Microsoft Excel สำหรับจัดทำกราฟ S-Curve และสรุปตัวชี้วัดรายงวด วิเคราะห์ข้อมูลใน 1 ช่วงเวลา คือ ช่วงที่ 1 (16 สิงหาคม – 31 ธันวาคม 2568) และช่วงที่ 2 (1 มกราคม - 31 มีนาคม 2569) ตัวชี้วัดที่ใช้ ได้แก่ PV, EV, AC, CPI, SPI, CV, SV, EAC, ETC, VAC และ TCPI ตามสูตรมาตรฐาน PMI (2021)

ผลและวิจารณ์

4.1 ผลการวิเคราะห์ EVM ช่วงที่ 1 (ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2568)

ตารางที่ 1 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวชี้วัด EVM ช่วงที่ 1 (ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2568)

ตัวชี้วัด	ช่วงที่ 1 (31 ธ.ค. 2568)	แนวโน้ม / วิเคราะห์
% แผน (Plan)	15.99%	ตามแผน
% จริง (Actual)	10.44%	ต่ำกว่าแผน
PV (บาท)	76,133,159	-
EV (บาท)	49,708,482	-
AC (บาท)	57,953,852	-
SPI	0.653	ดีขึ้น แต่ < 1.0
CPI	0.858	ดีขึ้นมาก > 1.0
SV (บาท)	-26,424,677	ถ่างกว้างขึ้น
CV (บาท)	-8,245,370	เปลี่ยนเป็นบวก
EAC-CPI (บาท)	-	< BAC ประหยัดงบ
TCPI	-	0.941 — ทำได้

หมายเหตุ: BAC = 476,134,887.19 บาท (ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม) ค่าเงินหน่วย: บาท

จากตารางที่ 1 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวชี้วัด EVM ช่วงที่ 1 (ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2568) ความก้าวหน้าตามแผนอยู่ที่ร้อยละ 15.99 ในขณะที่ความก้าวหน้าจริงอยู่ที่ร้อยละ 10.44 โดยมีค่า PV เท่ากับ 76,133,159 บาท EV เท่ากับ 49,708,482 บาท และ AC เท่ากับ 57,953,852 บาท ค่า SPI = 0.653 (< 1.0) แสดงว่าโครงการช้ากว่าแผนร้อยละ 34.7 ค่า CPI = 0.858 (< 1.0) แสดงว่าต้นทุนจริงสูงกว่ามูลค่างานที่ได้ SV = -26,424,677 บาท และ CV = -8,245,370 บาท

สาเหตุหลักของค่า CPI ต่ำในช่วงนี้มาจากต้นทุน Preliminary (C.P) ที่สูงตามธรรมชาติของช่วงเริ่มต้น ซึ่งได้แก่ ค่าแรงงาน เครื่องจักร และอุปกรณ์เข้าหน้างาน (AC ช่วงนี้ = 22.6 ล้านบาท จาก BAC ของหมวด C.P เพียง 95.6 ล้านบาท) ผลนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ตระกูลสันติรัตน์ และคณะ (2565) ที่พบว่าค่าดำเนินการงานก่อสร้าง (Overhead Cost) ของโครงการอาคารสูงในไทยเฉลี่ยร้อยละ 18.44 ของมูลค่าโครงการ ซึ่งหมวด C.P ร้อยละ 20.1 ของ BAC ในโครงการนี้อยู่ในระดับสอดคล้องกัน และ Fleming & Koppelman (2016) ที่ระบุว่า EVM ทำหน้าที่เป็น Early Warning System ได้ตั้งแต่ช่วงแรก

นอกจากปัจจัยเชิงบริบทข้างต้นแล้ว ค่า SPI ที่ต่ำในช่วงที่ 1 ยังสามารถอธิบายได้ด้วยแนวคิด Learning Curve Effect ตาม Hendrickson & Au (2008) ซึ่งระบุว่าโครงการก่อสร้างที่มีการเปลี่ยนผู้รับเหมา กลางโครงการมักต้องใช้เวลา 2-3 เดือนในการ Ramp-up ก่อนที่ประสิทธิภาพจะเข้าสู่ระดับปกติ สอดคล้องกับ แนวโน้ม SPI ที่ปรับตัวดีขึ้นจาก 0.653 เป็น 0.786 ในช่วง 3 เดือนถัดมา (มกราคม-มีนาคม 2569)

เมื่อพิจารณาแผนและความก้าวหน้าแยกตามหมวดงาน ณ สิ้นสุดช่วงที่ 1 พบว่า งานโครงสร้าง (C.ST) มีแผนสะสมร้อยละ 6.92 ของงบหมวด (BAC = 108,897,279 บาท) และมีความก้าวหน้าจริง (AC) เท่ากับ 32,924,821 บาท คิดเป็นร้อยละ 30.2 ของงบหมวด สะท้อนว่างานโครงสร้างเป็นตัวขับเคลื่อนหลักในช่วงนี้ งานสถาปัตยกรรม (C.AR) มี AC เพียง 1,716,683 บาท จากงบ 229,114,638 บาท (ร้อยละ 0.7) เนื่องจาก เพิ่งเริ่มต้น และงาน Hardscape (C.HSA + C.HSS) มี AC รวม 11,906 บาท ตามธรรมชาติของงานปลาย โครงการที่ยังไม่เริ่มดำเนินการในช่วงนี้

4.2 ผลการวิเคราะห์ EVM ช่วงที่ 2 (ณ วันที่ 31 มีนาคม 2569)

ตารางที่ 2 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวชี้วัด EVM ช่วงที่ 2 (ณ วันที่ 31 มีนาคม 2569)

ตัวชี้วัด	ช่วงที่ 2 (31 มี.ค. 2569)	แนวโน้ม / วิเคราะห์
% แผน (Plan)	33.45%	ตามแผน
% จริง (Actual)	26.30%	ต่ำกว่าแผน
PV (บาท)	159,267,120	-
EV (บาท)	125,223,475	-
AC (บาท)	103,100,093	-
SPI	0.786	ดีขึ้น แต่ < 1.0
CPI	1.215	ดีขึ้นมาก > 1.0
SV (บาท)	-34,043,645	ต่ำกว่าขึ้น
CV (บาท)	22,123,382	เปลี่ยนเป็นบวก

ตารางที่ 2 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวชี้วัด EVM ช่วงที่ 2 (ณ วันที่ 31 มีนาคม 2569) (ต่อ)

ตัวชี้วัด	ช่วงที่ 2 (31 มี.ค. 2569)	แนวโน้ม / วิเคราะห์
EAC-CPI (บาท)	392,015,564	< BAC ประหยัดงบ
TCPI	0.941	0.941 — ทำได้

จากตารางที่ 2 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวชี้วัด EVM ช่วงที่ 2 (ณ วันที่ 31 มีนาคม 2569) ณ สิ้นสุดช่วงที่ 2 ความก้าวหน้าตามแผนอยู่ที่ร้อยละ 33.45 ความก้าวหน้าจริงร้อยละ 26.30 โดยมีค่า PV เท่ากับ 159,267, 120 บาท EV เท่ากับ 125,223,475 บาท และ AC เท่ากับ 103,100,093 บาท ค่า SPI ปรับตัวดีขึ้นเป็น 0.786 แต่ยังคงต่ำกว่า 1.0 แสดงว่ายังมีความล่าช้า ในขณะที่ CPI ปรับตัวดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็น 1.215 (> 1.0) สะท้อนว่าการควบคุมต้นทุนมีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างชัดเจน $CV = +22,123,382$ บาท แสดงว่าต้นทุนต่ำกว่ามูลค่างานที่ได้

การปรับตัวของ CPI จาก 0.858 เป็น 1.215 ในช่วงนี้มีปัจจัยสำคัญมาจากการก่อสร้าง (C.ST) ที่ขับเคลื่อนโครงการซึ่งมี CPI ดี AC สะสมของ C.ST อยู่ที่ 58.4 ล้านบาท จาก BAC 108.9 ล้านบาท (ร้อยละ 53.6 ของงบ) ส่วน SPI ยังคงต่ำกว่า 1.0 โดย $SV = -34,043,644$ บาท ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ขวัญสุขศรี สุชาติ (2564) ที่พบว่าการประยุกต์ใช้ EVM สามารถตรวจพบแนวโน้มการปรับตัวของ SPI ได้อย่างต่อเนื่อง และสอดคล้องกับ Christensen (1999) ที่ยืนยันว่า CPI มีเสถียรภาพสูงหลังจากโครงการผ่านร้อยละ 20 ของระยะเวลา ซึ่งโครงการนี้ผ่านมาแล้วร้อยละ 34.13 ($r > 0.85$)

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในโครงการก่อสร้างประเภทอื่น พบว่าแนวโน้ม CPI ที่ปรับตัวดีขึ้นในช่วงที่ 2 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Acebes et al. (2015) ที่ศึกษาโครงการก่อสร้างหลายประเภทในยุโรป ซึ่งพบว่าโครงการที่นำ EVM มาประยุกต์ใช้อย่างสม่ำเสมอมีแนวโน้ม CPI ปรับตัวดีขึ้นในช่วงไตรมาสที่ 2 เนื่องจากผู้บริหารสามารถระบุและแก้ไขปัญหาต้นทุนได้ทันเวลาที่ นอกจากนี้ Lipke et al. (2009) ยังพบว่าการนำ EVM ไปใช้ในโครงการก่อสร้างภาคเอกชนช่วยลดต้นทุนส่วนเกินได้เฉลี่ยร้อยละ 10-15 เมื่อเทียบกับโครงการที่ไม่มีระบบติดตามแบบบูรณาการ ซึ่งสนับสนุนคุณค่าของการนำ EVM มาประยุกต์ใช้ในบริบทของโครงการ ESCENT HATYAI II

เมื่อพิจารณาแผนและความก้าวหน้าแยกตามหมวดงาน ณ สิ้นสุดช่วงที่ 2 พบว่างานก่อสร้าง (C.ST) มี AC สะสม 58,384,056 บาท คิดเป็นร้อยละ 53.6 ของงบหมวด (BAC = 108,897,279 บาท) สะท้อนถึงความก้าวหน้าที่ดีโดยงานก่อสร้างดำเนินการแล้วเสร็จถึงขั้น 18 งานสถาปัตยกรรม (C.AR) มี AC สะสม 10,059,466 บาท จากงบ 229,114,638 บาท (ร้อยละ 4.4) โดยงานแล้วเสร็จถึงขั้น 11 ซึ่งเป็นหมวดงานที่ต้องเฝ้าระวังเนื่องจากมีสัดส่วนงบสูงถึงร้อยละ 48.1 ของ BAC แต่ความก้าวหน้ายังต่ำ งาน Hardscape (C.HSA + C.HSS) มี AC รวม 101,793 บาท ยังคงต่ำตามธรรมชาติของงานปลายโครงการ โดยรวมช่วงที่ 2 แสดงให้เห็นการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในงานก่อสร้างที่เป็นตัวขับเคลื่อน CPI ให้ดีขึ้นจาก 0.858 เป็น 1.215

เมื่อพิจารณาแนวโน้ม (Trend Analysis) ของตัวชี้วัด EVM ในสองช่วงเวลา พบว่าอัตราการปรับตัวของ $CPI(\Delta = +0.357)$ สูงกว่าอัตราการปรับตัวของ SPI ($\Delta = +0.133$) อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งชี้ว่าในขณะที่การควบคุมต้นทุนมีการปรับปรุงอย่างรวดเร็ว ปัญหาความล่าช้าด้านเวลายังคงเป็นความท้าทายหลักของโครงการ หากแนวโน้มนี้ยังคงต่อเนื่อง คาดว่า SPI จะเข้าใกล้ 1.0 ได้ในช่วงไตรมาสที่ 3-4 ของโครงการ



(ประมาณกันยายน-ธันวาคม 2569) ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด Trend Analysis ของ PMI (2021) ที่แนะนำให้ใช้ข้อมูลอย่างน้อย 2 จุดในการพยากรณ์แนวโน้มโครงการ

4.3 การคาดการณ์ต้นทุนสิ้นสุดโครงการ (EAC)

การคาดการณ์ EAC ด้วย 3 วิธีตามมาตรฐาน PMI (2021) ให้ผลดังนี้ วิธีที่ 1 $EAC = BAC/CPI = 392,015,564$ บาท ($VAC = +84,119,323$ บาท) วิธีที่ 2 $EAC = AC + (BAC - EV) = 454,011,505$ บาท และวิธีที่ 3 $EAC = AC + (BAC - EV)/(CPI \times SPI) = 469,969,418$ บาท ค่า $TCPI = 0.941$ แสดงว่างานที่เหลือต้องดำเนินงานด้วย $CPI \geq 0.941$ ซึ่งทำได้เนื่องจาก CPI ปัจจุบันอยู่ที่ 1.215 สำหรับการศึกษาแนะนำให้ใช้วิธี $CPI \times SPI$ เป็นค่า Conservative เนื่องจากงานยังมีความล่าช้าสะสม

4.4 การวิเคราะห์รายหมวดยาน (WBS)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ Actual Cost แยกตามหมวดยาน (WBS)

WBS	หมวดยาน	BAC (บาท)	AC งวด 1 (บาท)	AC งวด 2 (บาท)	วิเคราะห์
C.P	Preliminary	95,900,555	22,579,230	28,175,135	ต้นทุนสูงตามธรรมชาติ ช่วงต้น
C.ST	โครงสร้าง	108,897,279	32,924,821	58,384,056	ขับเคลื่อนโครงการ CPI ดี
C.AR	สถาปัตยกรรม	229,114,638	1,716,683	10,059,466	48% ของ BAC เพิ่งเริ่ม ต้องติดตาม
C.EX	งานภายนอกอาคาร	17,335,201	721,212	2,751,897	เร็วกว่างาน AR
C.HSA	Hardscape	15,252,898	11,116	11,116	งานปลายโครงการ ปกติ
C.HSS	โครงสร้างภูมิสถาปัตย์	9,634,316	790	90,677	งานปลายโครงการ ปกติ
รวม	ทั้งโครงการ	476,134,887	57,953,852	103,100,093	$CPI=1.215$ $SPI=0.786$

จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ Actual Cost แยกตามหมวดยาน (WBS) เมื่อวิเคราะห์รายหมวดยานพบว่าหมวด C.AR (หมวดยานสถาปัตยกรรม) มีงบประมาณสูงที่สุด 229,114,638 บาท (ร้อยละ 48.1 ของ BAC) แต่มี AC สะสมในช่วงที่ 2 เพียง 10,059,466 บาท (ร้อยละ 4.4 ของงบ) ซึ่งเป็นความเสี่ยงสำคัญที่ต้องติดตามใกล้ชิดเนื่องจากงานสถาปัตยกรรมภายในห้องพักมีจำนวนชิ้นมากและต้องดำเนินการต่อเนื่องกัน ในขณะที่หมวด C.ST (โครงสร้าง) มีความก้าวหน้าที่สุดด้วย AC ร้อยละ 53.6 ของงบ ส่วน C.HSA และ C.HSS (งาน Hardscape) มี AC ต่ำมากตามธรรมชาติของงานปลายโครงการ รายละเอียดแสดงในตารางที่ 2



บทสรุป

การศึกษานี้ยืนยันว่า EVM ร่วมกับ Microsoft Project 2016 เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการติดตามและควบคุมโครงการก่อสร้างอาคารชุดพักอาศัยสูงในประเทศไทย โดยสรุปผลตามวัตถุประสงค์ 2 ข้อ ได้แก่

วัตถุประสงค์ที่ 1 การประยุกต์ใช้ EVM ร่วมกับ Microsoft Project 2016 ทำให้สามารถสร้าง WBS ครอบคลุม 6 หมวดงานหลัก กำหนด Baseline เชื่อมโยงงบประมาณ 476.1 ล้านบาท และคำนวณตัวชี้วัด PV/EV/AC/CPI/SPI/EAC ได้อัตโนมัติ ลดข้อผิดพลาดในการคำนวณ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ขวัญสุศรี สุชาติ (2564) และ สมชาย วรธงไชย (2555) ที่ยืนยันว่าการบูรณาการ EVM กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์บริหารโครงการเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงในบริบทการก่อสร้างของประเทศไทย

วัตถุประสงค์ที่ 2 การวิเคราะห์ตัวชี้วัดเชิงปริมาณพบว่า SPI ปรับตัวดีขึ้นจาก 0.653 เป็น 0.786 แต่ยังต่ำกว่าแผนทั้ง 2 งวด CPI ปรับตัวขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก 0.858 เป็น 1.215 แสดงถึงการควบคุมต้นทุนที่มีประสิทธิภาพ EAC (BAC/CPI) = 392,015,563 บาท คาดว่าประหยัดได้ 84,119,324 บาทจาก BAC เดิม และ TCPI = 0.941 ซึ่งอยู่ในวิสัยที่ทำได้

ข้อเสนอแนะ ได้แก่ (1) ควรเร่งรัดแผนงาน C.AR โดยจัดประชุม Look-ahead Schedule ทุก 2 สัปดาห์ เนื่องจากเป็น 48% ของงบรวมที่ยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น (2) รักษา $CPI \geq 1.0$ โดยเฉพาะในงาน C.ST ที่ขับเคลื่อนโครงการ (3) ใช้ EAC วิธี $CPI \times SPI = 469,969,418$ บาท เป็นตัวเลข Worst Case สำหรับการวางแผนทางการเงิน และ (4) รายงาน EVM งวดถัดไป ณ 30 มิถุนายน 2569 เพื่อติดตามแนวโน้ม SPI ต่อเนื่อง ข้อจำกัดของการศึกษา คือเป็นกรณีศึกษาเดี่ยวจึงไม่สามารถ Generalize ผลไปยังโครงการอื่นได้โดยตรง และวิเคราะห์เฉพาะมิติเชิงปริมาณ ไม่ครอบคลุมคุณภาพหรือความเสี่ยง

ในเชิงนโยบายสำหรับผู้บริหารโครงการก่อสร้างอาคารสูง การศึกษานี้เสนอแนะให้ (1) กำหนดให้การวิเคราะห์ EVM เป็นมาตรฐานในโครงการที่มีมูลค่าเกิน 200 ล้านบาท เพื่อให้ผู้ว่าจ้างและผู้รับเหมามีกลไกติดตามประสิทธิภาพโครงการที่โปร่งใสและตรวจสอบได้ (2) ตั้งเกณฑ์เตือนภัยล่วงหน้า (Early Warning Threshold) ที่ $CPI < 0.90$ หรือ $SPI < 0.80$ เพื่อกระตุ้นให้เกิดการทบทวนแผนงานก่อนที่ปัญหาจะสะสม และ (3) ส่งเสริมการพัฒนาศักยภาพบุคลากรด้านการประยุกต์ใช้ EVM ร่วมกับ Microsoft Project ในองค์กรก่อสร้างของภาคได้ประเทศไทย เพื่อยกระดับมาตรฐานการบริหารโครงการในระดับภูมิภาค

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัท ที.ที.เอส. เอ็นจิเนียริง (2004) จำกัด ที่อนุญาตให้ใช้ข้อมูลโครงการ ESCENT HATYAI II สำหรับการศึกษานี้ และขอขอบคุณอาจารย์และคณะกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระทุกท่านสำหรับคำแนะนำอันมีคุณค่า



เอกสารอ้างอิง

- อรรถพล นามละคร, กิตติพงษ์ สุวิโร, นิรชร นกแก้ว, สุกุม ลิปิเลิศ, วีระศักดิ์ ละอองจันทร์, และจตุพล ตั้งปกาศิต. (2568). การศึกษาความล่าช้าในโครงการก่อสร้างที่มีสาเหตุมาจากการจัดการด้านการเงิน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 30 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์.
- ตระกูลสันติรัตน์ ฉ., สุขศิริพัฒน์พงศ์ ช., ทับยัง ว. และโพธิ์จันทร์ ว. (2565). การประเมินค่าดำเนินการงานก่อสร้างสำหรับโครงการก่อสร้างอาคารสูง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27 ณ จังหวัดเชียงใหม่.
- ขวัญสุขศรี, สุชาติ. (2564). การศึกษาแนวทางการบริหารต้นทุนโครงการก่อสร้างโดยใช้การวิเคราะห์มูลค่าที่ได้รับ: กรณีศึกษาการก่อสร้างโรงงานผลิตยางพาราอัดแท่ง จังหวัดสกลนคร. สารนิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการงานวิศวกรรม มหาวิทยาลัยสยาม.
- สมชาย วรธงไชย. (2555). การวางแผนและติดตามควบคุมต้นทุนโครงการก่อสร้าง. โครงการงานวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Acebes, F., Pajares, J., Galán, J. M., & López-Paredes, A. (2015). Beyond earned value management: A graphical framework for integrated cost, schedule and risk monitoring. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 226, 252–259.
- Atkinson, R. (1999). Project management: Cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon. *International Journal of Project Management*, 17(6), 337–342.
- Cheng, E. W. L., & Li, H. (2014). Development of a practical model of risk management for construction projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 21(2), 165–183.
- Christensen, D. S. (1999). Using the CPI to forecast the final cost of a project: Current research and practice. *The Journal of Cost Analysis and Management*, 1(1), 31–47.
- Fleming, Q. W., & Koppelman, J. M. (2016). *Earned value project management* (4th ed.). Newtown Square, PA: Project Management Institute.
- Hendrickson, C., & Au, T. (2008). *Project management for construction*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University.
- Kerzner, H. (2017). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling* (12th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Microsoft. (2016). *Microsoft Project 2016 user guide*. Redmond, WA: Microsoft Corporation.
- Project Management Institute. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide)* (7th ed.). Newtown Square, PA: PMI.
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.

การหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอ่านยาวทั่วจีโนมในผู้ป่วยโรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติ

Long-Read Whole-Genome Sequencing in Craniosynostosis

ณัฐกฤตา จิระเจริญสกุล¹, มณัฏฐ์ พงษ์พานิช², รุ่งโรจน์ ตั้งพงษ์^{3,4}, วุทธิชาติ กมลวิศิษฎ์^{3,4}, จรัญ มหาทุมะรัตน์⁵, นนท ไรจน์วชิรนนท์⁵, เฉลิมพล ศรีจอมทอง^{3,4}, ศุภกร รักวงศ์ขจร^{3,4}, กนกวรรณ สันติะวงศ์^{3,4}, ภัทรา ยี่ทอง⁶ และ วรศักดิ์ โชติเลอศักดิ์^{3,4}

Nathakrita Jiracharoensakul¹, Monnat Pongpanich², Rungroj Thangpong^{3,4}, Wuttichart Kamolvisit^{3,4}, Charan Mahatumarat⁵, Nond Rojvachiranonda⁵, Chalurmpon Srichomthong^{3,4}, Supphakorn Rakwongkhachon^{3,4}, Kanokwan Santawong^{3,4}, Patra Yeetong⁶ and Vorasuk Shotelersuk^{3,4}

บทคัดย่อ

โรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติ (craniosynostosis) เกิดจากการที่รอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดกันเร็วกว่าปกติ โดยพบได้ประมาณ 1 ใน 2,000 ถึง 2,500 รายในประชากร นอกเหนือจากความผิดปกติของรูปร่างกะโหลกศีรษะแล้ว ผู้ป่วยยังอาจมีอาการทางคลินิกอื่นร่วมด้วย ทั้งนี้ลักษณะอาการและสาเหตุของโรคในผู้ป่วยแต่ละรายมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยมียีนที่เกี่ยวข้องกับโรคนี้มากถึง 207 ยีน และยังมีรูปแบบการถ่ายทอดทางพันธุกรรมที่หลากหลาย จากการศึกษาที่ผ่านมาในผู้ป่วยโรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติด้วยเทคโนโลยีการหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอ่านสั้น พบว่าสามารถระบุสาเหตุของโรคได้เพียงร้อยละ 68 ดังนั้น การศึกษานี้จึงมุ่งศึกษาผู้ป่วยจำนวน 21 รายที่ยังไม่สามารถหาสาเหตุของโรคได้จากวิธีดังกล่าว โดยใช้เทคโนโลยีการหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอ่านยาวทั่วจีโนม (long-read whole-genome sequencing) ผลการศึกษาพบ duplication ขนาด 21 คู่เบสในยีน *TWIST1* ซึ่งส่งผลให้เกิด in-frame insertion ของกรดอะมิโน 7 ตัว ในผู้ป่วยจำนวน 1 ราย คิดเป็นร้อยละ 4.76 และเป็นสาเหตุของโรค Saethre-Chotzen syndrome ซึ่งมีการถ่ายทอดทางพันธุกรรมแบบยีนเด่นบนโครโมโซมร่างกาย ข้อมูลที่ได้เป็นประโยชน์ต่อผู้ป่วยและครอบครัวในด้านการวินิจฉัย การดูแลผู้ป่วย และความเข้าใจกลไกของโรคในอนาคต

คำสำคัญ : โรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติ; เทคโนโลยีการหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอ่านยาว

¹ ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย

Department of Botany, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.

² ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย

Department of Mathematics and Computer Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.

³ ศูนย์ความเป็นเลิศทางการแพทย์ด้านจีโนมิกส์และการแพทย์แม่นยำ โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ สภากาชาดไทย กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย

Excellence Center for Medical Genetics and Precision Medicine, King Chulalongkorn Memorial Hospital, the Thai Red Cross Society, Bangkok 10330, Thailand.

⁴ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเวชพันธุศาสตร์ ภาควิชากุมารเวชศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย

Center of Excellence for Medical Genomics, Department of Pediatrics, Faculty of Medicine, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.

⁵ ภาควิชาศัลยศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย

Department of Surgery, Faculty of Medicine, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.

⁶ สาขาพันธุศาสตร์มนุษย์ ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย

Division of Human Genetics, Department of Botany, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.



Abstract

Craniosynostosis is a condition characterized by the premature fusion of one or more cranial sutures, with an estimated incidence of approximately 1 in 2,000–2,500 individuals. In addition to abnormal cranial morphology, affected individuals may present with a spectrum of associated clinical features. The phenotypic presentation and underlying etiology vary considerably among patients, with over 207 genes implicated and diverse modes of inheritance reported. Previous studies using short-read sequencing technologies have identified the genetic cause in only approximately 68% of cases. Therefore, this study aimed to investigate 21 patients with unresolved diagnoses using long-read whole-genome sequencing. A 21-base pair duplication in the TWIST1 gene was identified in one patient (4.76%), resulting in an in-frame insertion of seven amino acids. This variant was determined to be causative of Saethre–Chotzen syndrome, an autosomal dominant disorder. These findings may improve diagnostic yield, support clinical management, and contribute to a better understanding of the molecular mechanisms underlying craniosynostosis.

Keyword : craniosynostosis; HiFi long read sequencing; PacBio; Saethre–Chotzen syndrome

บทนำ

โรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติ (craniosynostosis) เป็นโรคที่เกิดจากการปิดของรอยประสานกะโหลกศีรษะเร็วกว่าปกติ ส่งผลให้รูปทรงกะโหลกศีรษะผิดปกติ โดยภาวะนี้สามารถส่งผลกระทบได้ตั้งแต่ระดับโครงสร้างของกะโหลกศีรษะไปจนถึงการทำงานของสมอง โดยผู้ป่วยอาจมีอาการร่วม เช่น ความดันในกะโหลกศีรษะสูง ความผิดปกติของการมองเห็นและการได้ยิน รวมไปถึงพัฒนาการล่าช้า ทั้งนี้ โรคดังกล่าวสามารถพบได้ประมาณ 1 ใน 2,000 ถึง 2,500 รายของประชากร (Johnson & Wilkie, 2011; Kajdic et al., 2018; Panchal & Uttchin, 2003) โรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติ สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มหลัก ได้แก่ กลุ่มที่หนึ่ง isolated คือกลุ่มที่มีความผิดปกติเฉพาะที่กะโหลกศีรษะ ซึ่งสามารถเกิดได้จากทั้งผลกระทบจากปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เช่น ความดันภายในกะโหลกศีรษะต่ำเกินไป (Alperovich et al., 2025; Boyadjiev & Consortium, 2007) และปัจจัยทางพันธุกรรม และกลุ่มที่สอง syndromic คือกลุ่มที่พบความผิดปกติที่กะโหลกศีรษะ ร่วมกับความผิดปกติของอวัยวะอื่น เช่น แขนขา หรือระบบการได้ยิน โดยกลุ่มหลังมักเกี่ยวข้องกับปัจจัยทางพันธุกรรมเป็นหลัก โดยกลุ่มอาการที่พบได้บ่อย เช่น Apert, Crouzon, Muenke และ Pfeiffer syndromes (Kabbani & Raghuveer, 2004; Kimonis et al., 2007; Wang et al., 2016)

ปัจจุบันมีรายงานอื่นที่เกี่ยวข้องกับโรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติจากฐานข้อมูล Human Phenotype Ontology (HPO: HP:0001363) จำนวน 207 ยีน ซึ่งกลไกการกลายพันธุ์ของโรคนี้มิได้ทั้งการกลายพันธุ์แบบ loss-of-function และการกลายพันธุ์แบบ gain-of-function นอกจากนี้ยังสามารถพบการกลายพันธุ์ได้หลายรูปแบบ ตั้งแต่การกลายพันธุ์ขนาดเล็กอย่าง single nucleotide variation ไปจนถึงความ

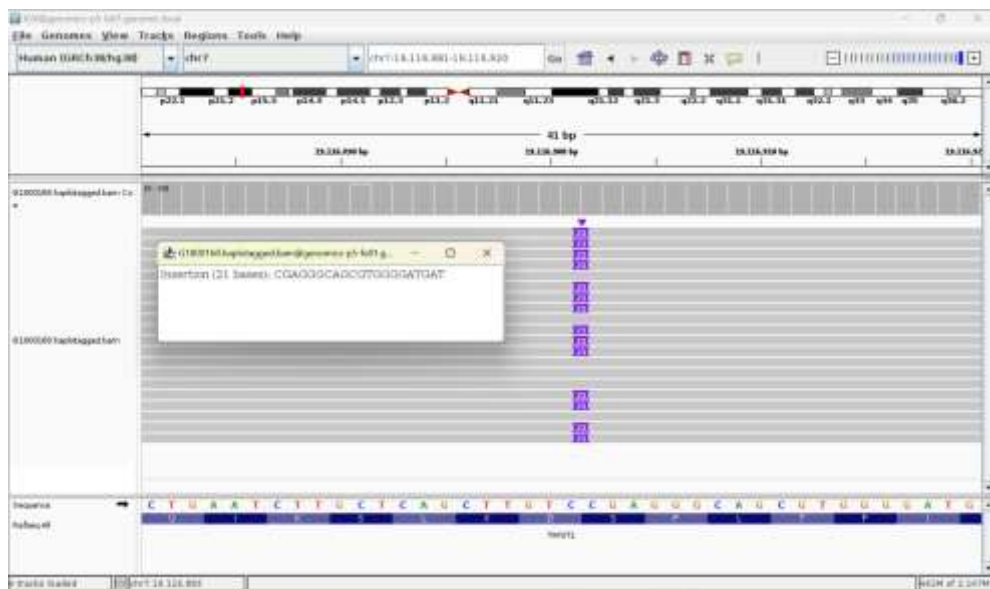
แปรผันทางพันธุกรรมขนาดใหญ่อย่าง structural variation ได้อีกด้วย (Borst et al., 2025; Katouni et al., 2023)

ในการศึกษาความแปรผันทางพันธุกรรมที่เป็นสาเหตุของโรคหายากโรคโครอยประสาทกะโหลกศีรษะเชื่อมติด ผิดปกติในยุคแรกนิยมใช้เทคโนโลยีการหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบ Sanger sequencing ซึ่งเป็นเทคนิคที่เน้นการศึกษาเฉพาะยีนหรือ exon ที่เป็น hotspot ของโรค ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดยีนที่ต้องการศึกษาล่วงหน้า และไม่สามารถครอบคลุมโรคที่มีสาเหตุมาจากหลายยีนได้ ต่อมาเทคโนโลยีการหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอ่านสั้น next-generation sequencing (NGS) อย่าง whole-exome sequencing (WES) และ whole-genome sequencing (WGS) ได้เข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสามารถศึกษาหลายยีนพร้อมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในโรคที่มียีนที่เป็นสาเหตุของโรคหายาก การใช้เทคโนโลยีการหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอ่านสั้น NGS สามารถช่วยประหยัดเวลาและคํ่ามากกว่าการศึกษาทีละยีนด้วยการหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบแซงเกอร์ (Wilkie et al., 2017; Lee et al., 2014) แม้ว่าเทคโนโลยีการหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอ่านสั้นจะมีประสิทธิภาพสูงในการศึกษาการกลายพันธุ์ในหลายยีนพร้อมกันได้ แต่ยังคงมีโรคหายากจำนวนหนึ่งที่ไม่สามารถระบุความผิดปกติทางพันธุกรรมได้ โดยเฉพาะในกรณีที่เกี่ยวข้องกับความแปรผันที่มีความซับซ้อน ได้แก่ structural variation, repeat expansions และ pseudogenes ซึ่งอยู่นอกขอบเขตความสามารถของเทคโนโลยีการหาลำดับดีเอ็นเอแบบอ่านสั้น (Bamshad et al., 2011; Hu et al., 2021; Metzker, 2010) เทคโนโลยีการหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอ่านยาว (long-read sequencing) จึงเข้ามามีบทบาทในการลดข้อจำกัดดังกล่าวนี้ โดยเทคโนโลยีนี้เป็นเทคโนโลยีการหาลำดับนิวคลีโอไทด์ที่สามารถอ่านลำดับเบสได้ต่อเนื่องที่ความยาวตั้งแต่หลักพันถึงหลักล้านคู่เบสในหนึ่ง read ทำให้สามารถตรวจจับความแปรผันทางพันธุกรรมที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น ความแปรผันเชิงโครงสร้าง และบริเวณที่มีความซับซ้อนได้ดีกว่า เทคโนโลยีการหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอ่านสั้น โดยปัจจุบันมี 2 แพลตฟอร์มหลัก ได้แก่ Pacific Biosciences ซึ่งใช้หลักการ single-molecule real-time sequencing โดยตรวจจับสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ระหว่างการสังเคราะห์ดีเอ็นเอและอ่านดีเอ็นเอในรูปร่างวงกลม (circular consensus sequencing) และ Oxford Nanopore Technologies ซึ่งอาศัยการวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าขณะสายดีเอ็นเอเคลื่อนผ่านรูนาโน (nanopore) ซึ่งทั้งสองเทคโนโลยีสามารถลดข้อจำกัดของเทคโนโลยีการหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอ่านสั้นได้ (Eid et al., 2009; Jain et al., 2016; Logsdon et al., 2020)

จากการศึกษาสาเหตุทางพันธุกรรมของโรคโครอยประสาทกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติ ในผู้ป่วยโรคจำนวน 91 ราย ด้วยเทคโนโลยีการหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบแซงเกอร์ exome sequencing และ short-read genome sequencing พบว่าสามารถตรวจพบความแปรผันทางพันธุกรรมที่เป็นสาเหตุของโรคนี้ได้ร้อยละ 68 และยังมีผู้ป่วยอีกร้อยละ 32 ที่ยังไม่ทราบการกลายพันธุ์ที่เป็นสาเหตุของโรค ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการกลายพันธุ์ในผู้ป่วยโรคโครอยประสาทกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติ จำนวน 21 ราย ที่ไม่พบการกลายพันธุ์จากการใช้เทคโนโลยีก่อนหน้านี้ โดยใช้เทคโนโลยีการหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอ่านยาวทั่วจีโนม (long-read whole genome sequencing) เพื่อหาสาเหตุของโรคซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อแพทย์ในการช่วยยืนยันผลการวินิจฉัย รวมถึงให้ข้อมูลที่ถูกต้องแก่ผู้ป่วยและครอบครัวต่อไป

ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาความแปรผันทางพันธุกรรมที่เป็นสาเหตุของโรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติด ผิดปกติจำนวน 21 ราย ด้วยเทคโนโลยีการหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอ่านยาวทั่วจีโนม โดยแบ่งออกเป็นผู้ป่วย โรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม isolated จำนวน 15 ราย และ กลุ่ม syndromic จำนวน 6 ราย โดยผู้ป่วยทุกคนได้รับการตรวจวินิจฉัยจากแพทย์เฉพาะทาง จากการศึกษาพบ ความแปรผันทางพันธุกรรมที่เป็นสาเหตุของโรคในผู้ป่วย 1 ราย คิดเป็นร้อยละ 4.76 (1/21) จากกลุ่มผู้ป่วยโรค รอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติชนิด syndromic ที่มีความผิดปกติของรูปร่างกะโหลกศีรษะแบบ turri-brachycephaly ซึ่งสัมพันธ์กับ bicoronal synostosis นอกจากนี้ยังมีลักษณะ low hairline, exotropia, bilateral ptosis, low set ears, mild midface hypoplasia, high arched palate และ neurodevelopmental delay



ภาพที่ 1 การตรวจพบ in-frame duplication ขนาด 21 คู่เบสด้วย long-read sequencing ในบริเวณยีน *TWIST1*

ภาพแสดงผลจาก long-read whole genome sequencing บนโปรแกรม IGV (Integrative Genomics Viewer) GRCh38 พบ in-frame duplication ขนาด 21 คู่เบส (CGAGGGCAGCGTGGGATGAT) บริเวณโครโมโซม ที่ 7 ตำแหน่งนิวคลีโอไทด์ที่ 19116903 ถึง 19116923 บริเวณยีน *TWIST1* exon ที่ 1 แสดงด้วยสัญลักษณ์สีม่วง ใน read หลายเส้นอย่างสม่ำเสมอ สะท้อนถึงการมีความน่าเชื่อถือของ variant สูง

จากการศึกษาผู้ป่วยโรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติจำนวน 21 รายนี้โดยวิเคราะห์ ความแปรผันทางพันธุกรรมที่พบในยีนที่เคยมีรายงานว่าเป็นสาเหตุของโรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติด ผิดปกติ พบความแปรผันทางพันธุกรรมในผู้ป่วย 1 ราย รูปแบบ in-frame duplication ขนาด 21 คู่เบส โดยมี

ลำดับดังนี้ CGAGGGCAGCGTGGGGATGAT ในยีน *TWIST1* บนโครโมโซมคู่ที่ 7 exon ที่ 1 ตำแหน่งนิวคลีโอไทด์ลำดับที่ g.19116903 ถึง 19116923 จัดอยู่ในกลุ่มความสำคัญทางคลินิกเป็น likely pathogenic ตาม American College of Medical Genetics and genomics (ACMG) (Richards et al., 2015) เป็นสาเหตุของโรค Saethre–Chotzen syndrome และมีรูปแบบการถ่ายทอดทางพันธุกรรมแบบ autosomal dominant inheritance เป็นการกลายพันธุ์ที่เคยมีรายงานมาก่อนหน้านี้ในงานวิจัยของ Topa และคณะ ปี ค.ศ. 2020 อาการทางคลินิกพบการเชื่อมติดกันก่อนกำหนดของรอยประสานกะโหลกศีรษะชนิดโครีโนลสองตำแหน่ง (Topa et al., 2020) โดยมีความรุนแรงน้อยกว่าคนไข้ที่พบในการศึกษาครั้งนี้

โรค Saethre–Chotzen syndrome เป็นโรคในกลุ่มโรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติที่เกิดจากการกลายพันธุ์ของยีน *TWIST1* ที่แปลรหัสโปรตีนเป็นทรานสคริปชันแฟกเตอร์ (transcription factor) ในกลุ่ม basic helix–loop–helix มีบทบาทสำคัญในการควบคุมการพัฒนาและการสร้างกระดูกของกะโหลกศีรษะในระยะตัวอ่อน โดยโปรตีนนี้มีหน้าที่สำคัญในการควบคุมการทำงานของยีนที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเซลล์เมเซนไคม์ และการสร้างกระดูก ซึ่งมีความสำคัญในการเป็นเซลล์ต้นกำเนิดของโครงสร้างกะโหลกศีรษะ เช่น กระดูกกะโหลกศีรษะ รอยประสานกะโหลกศีรษะ หรือ เนื้อเยื่อเกี่ยวพันของศีรษะ เป็นต้น โดยหากโปรตีนดังกล่าวทำงานผิดปกติไปจะส่งผลให้เกิดการเชื่อมติดของรอยประสานกะโหลกศีรษะก่อนเวลาที่เหมาะสม เป็นลักษณะสำคัญของโรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติ (Ghouzzi et al., 1997; Howard et al., 1997; Li et al., 2020) โดยโรคนี้มีความหลากหลายของอาการที่แตกต่างกันไปในแต่ละบุคคล โดยมีลักษณะเด่นคือการเชื่อมติดก่อนกำหนดของรอยประสานกะโหลกศีรษะ coronal ทำให้กะโหลกศีรษะผิดรูปและใบหน้าไม่สมมาตร ร่วมกับลักษณะจำเพาะ เช่น ptosis, low set ears, low hairline และอาจพบ syndactyly ได้เล็กน้อย รวมถึง hearing loss โดยพัฒนาการทางสติปัญญาส่วนใหญ่จะปกติ หรือในผู้ป่วยบางรายอาจพบเพียงความผิดปกติของรูปร่างกะโหลกศีรษะร่วมกับการกลายพันธุ์ของยีน (Twigg & Wilkie, 2015) โดยความแปรผันทางพันธุกรรมที่พบในคนไข้โรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติจำนวน 1 ราย (1/21) ในกลุ่ม syndromic นี้ อยู่ในโดเมน basic helix–loop–helix (bHLH) เป็นโดเมนสำคัญของโปรตีน TWIST1 โดยโดเมน bHLH ซึ่งต้องอาศัยความสมดุลของระยะและมุมระหว่างเกลียวแอลฟา (alpha helix) ที่เชื่อมด้วย loop region เพื่อให้สามารถเกิด dimer ได้อย่างเสถียรและจับกับดีเอ็นเอได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเพิ่มกรดอะมิโนในบริเวณ loop นี้จะทำให้โครงสร้างเชิงมิติ (conformation) ของ helix–loop–helix เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ความสามารถในการควบคุมการแสดงออกของยีนเป้าหมายลดลง (Massari & Murre, 2000; Ghouzzi et al., 1997) และเกิดการกลายพันธุ์ที่ทำให้การทำงานของยีนโปรตีนลดลงหรือสูญเสียไป (Kimonis et al., 2007)

เทคโนโลยีการหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอ่านยาว มีความสามารถในการหาลำดับดีเอ็นเอได้ต่อเนื่องตั้งแต่หลักหมื่นคู่เบสจนถึงหลักล้านคู่เบส ทำให้ครอบคลุมบริเวณรอยต่อของความแปรผันได้โดยตรงและไม่จำเป็นต้องอาศัยการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอด้วยกระบวนการพีซีอาร์ ทำให้ปัญหาที่อาจเกิดจากความผิดพลาดของการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอหมดไป การศึกษาครั้งนี้ใช้เทคโนโลยี HiFi circular consensus sequencing (CCS) เป็นเทคโนโลยีของบริษัท Pacific Biosciences ซึ่งมีจุดเด่นคือ การทำให้โมเลกุลดีเอ็นเอมีลักษณะเป็นวงกลมและถูกอ่านซ้ำหลายรอบ ซึ่งมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 13.5 กิโลเบส และมีความแม่นยำต่อเบสสูงมากถึง ~99.99% (Moustakli et al., 2025; Wang et al., 2025; Wenger et al., 2019) โดยมีความแม่นยำมากกว่า



เทคโนโลยี Oxford nanopore ที่มีจุดเด่นคือ สามารถอ่านดีเอ็นเอได้ที่มีความยาวมากถึงหลักแสนถึงหลักล้านคู่เบส แต่ยังคงมีความแม่นยำที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีของ Pacific Biosciences (Logsdon et al., 2020) ในการศึกษานี้มีเหตุผลสำคัญทั้งด้านความแม่นยำของลำดับเบสและชนิดของความแปรผันทางพันธุกรรมที่ต้องการตรวจหา โดย PacBio HiFi ให้ความถูกต้องของลำดับเบสสูงมาก เหมาะสำหรับการตรวจพบ insertion/indel ขนาดเล็กถึงปานกลาง รวมถึงความแปรผันในบริเวณที่มีความซับซ้อน ซึ่งพบได้ในยีนที่เกี่ยวข้องกับ craniosynostosis เช่น *TWIST1* นอกจากนี้ PacBio ยังสามารถระบุ breakpoint ของ structural variants ได้อย่างแม่นยำ ในขณะที่ Oxford Nanopore แม้มีจุดเด่นด้านความยาวของ read และการตรวจพบ structural variants ขนาดใหญ่ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำต่อเบส

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยี long-read whole genome sequencing (LR-WGS) สามารถเพิ่มศักยภาพในการวินิจฉัยในผู้ป่วย craniosynostosis ที่ไม่พบความผิดปกติจากการตรวจแบบ short-read ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในกรณีที่เกี่ยวข้องกับความแปรผันเชิงโครงสร้างหรือบริเวณจีโนมที่มีความซับซ้อนซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญของเทคโนโลยีเดิม แม้ว่าต้นทุนของ LR-WGS จะยังสูงกว่า แต่การนำมาใช้ในผู้ป่วยที่คัดเลือกอย่างเหมาะสมอาจมีความคุ้มค่าในเชิงระบบ เนื่องจากช่วยลดการตรวจซ้ำ ลดระยะเวลาการวินิจฉัย และสนับสนุนการให้คำปรึกษาทางพันธุกรรมที่แม่นยำ นอกจากนี้ การระบุสาเหตุทางพันธุกรรมยังอาจส่งผลต่อการวางแผนการรักษาและการติดตามในระยะยาว ผลลัพธ์ของการศึกษานี้สนับสนุนบทบาทของ LR-WGS ในฐานะการตรวจลำดับต่อมาสำหรับผู้ป่วยที่ยังไม่สามารถวินิจฉัยได้ด้วยวิธีเดิม

สรุป

จากการศึกษาพบความแปรผันทางพันธุกรรมในผู้ป่วยโรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติจำนวน 21 ราย พบความแปรผันทางพันธุกรรมชนิด duplication จำนวน 21 คู่เบส ที่เกิดขึ้นในยีน *TWIST1* ที่ตำแหน่งนิวคลีโอไทด์ลำดับที่ c.400_420dup บนโครโมโซมคู่ที่ 7 ซึ่งเป็นสาเหตุของโรค Saethre–Chotzen syndrome ที่มีการถ่ายทอดแบบยีนเด่นบนโครโมโซมร่างกาย จากการศึกษาทำให้ทราบการกลายพันธุ์ที่เป็นสาเหตุของโรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อแพทย์ผู้ป่วยและครอบครัว ในการวินิจฉัยและวางแผนการรักษาต่อไป

คำขอบคุณ

ขอขอบพระคุณผู้ป่วยโรครอยประสานกะโหลกศีรษะเชื่อมติดผิดปกติที่เข้าร่วมการศึกษานี้ และทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษาที่มีส่วนช่วยให้การศึกษาในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี



เอกสารอ้างอิง

- Alperovich, M., Tonello, C., Mayes, L. C., & Kahle, K. T. (2025). Non-syndromic craniosynostosis. *Nature Reviews Disease Primers*, 11, 24.
- Bamshad, M. J., Ng, S. B., Bigham, A. W., Tabor, H. K., Emond, M. J., Nickerson, D. A., & Shendure, J. (2011). Exome sequencing as a tool for Mendelian disease gene discovery. *Nature Reviews Genetics*, 12, 745-755.
- Borst, A., Schweitzer, T., Horn, D., Kunstmann, E., König, E.-M., Pluta, N., & Klopocki, E. (2025). Functional analyses of splice site variants in *TCF12*. *Human Genomics*, 19, 45.
- Boyadjiev, S. A., & Consortium, I. C. (2007). Genetic analysis of non-syndromic craniosynostosis. *Orthodontics & craniofacial research*, 10, 129-137.
- Eid, J., Fehr, A., Gray, J., Luong, K., Lyle, J., Otto, G., Peluso, P., Rank, D., Baybayan, P., & Bettman, B. (2009). Real-time DNA sequencing from single polymerase molecules. *Science*, 323, 133-138.
- Ghouzzi, V. E., Merrer, M. L., Perrin-Schmitt, F., Lajeunie, E., Benit, P., Renier, D., Bourgeois, P., Bolcato-Bellemin, A.-L., Munnich, A., & Bonaventure, J. (1997). Mutations of the *TWIST* gene in the Saethre-Chotzene syndrome. *Nature Genetics*, 15, 42-46.
- Howard, T. D., Paznekas, W. A., Green, E. D., Chiang, L. C., Ma, N., Luna, R. I. O. D., Delgado, C. G., Gonzalez-Ramos, M., Kline, A. D., & Jabs, E. W. (1997). Mutations in *TWIST*, a basic helix-loop-helix transcription factor, in Saethre-Chotzen syndrome. *Nature Genetics*, 15, 36-41.
- Hu, T., Chitnis, N., Monos, D., & Dinh, A. (2021). Next-generation sequencing technologies: an overview. *Human immunology*, 82, 801-811.
- Jain, M., Olsen, H. E., Paten, B., & Akeson, M. (2016). The Oxford Nanopore MinION: delivery of nanopore sequencing to the genomics community. *Genome Biology*, 17, 239.
- Johnson, D., & Wilkie, A. O. M. (2011). Craniosynostosis. *European Journal of Human Genetics*, 19, 369-376.
- Kabbani, H., & Raghuveer, T. S. (2004). Craniosynostosis. *American family physician*, 69, 2863-2870.
- Kajdic, N., Spazzapan, P., & Velnar, T. (2018). Craniosynostosis - recognition, clinical characteristics, and treatment. *Bosn J Basic Med Sci*, 18, 110-116.
- Katouni, K., Nikolaou, A., Mariolis, T., Protogerou, V., Chrysikos, D., Theofilopoulou, S., & Filippou, D. (2023). Syndromic craniosynostosis: a comprehensive review. *Cureus*, 15, e50448.
- Kimonis, V., Gold, J.-A., Hoffman, T. L., Panchal, J., & Boyadjiev, S. A. (2007). Genetics of craniosynostosis. *Seminars in Pediatric Neurology*.
- Langmead, B., Trapnell, C., Pop, M., & Salzberg, S. L. (2009). Ultrafast and memory-efficient alignment of short DNA sequences to the human genome. *Genome Biol*, 10, R25.



- Lee, H., Deignan, J. L., Dorrani, N., Strom, S. P., Kantarci, S., Quintero-Rivera, F., Das, K., Toy, T., Harry, B., & Yourshaw, M. (2014). Clinical exome sequencing for genetic identification of rare Mendelian disorders. *JAMA*, 312, 1880-1887.
- Li, H. (2013). Aligning sequence reads, clone sequences and assembly contigs with BWA-MEM. *arXiv: Genomics*.
- Li, H., & Durbin, R. (2009). Fast and accurate short read alignment with Burrows-Wheeler transform. *Bioinformatics*, 25, 1754-1760.
- Li, W., Yu, W., Jiang, X., Gao, X., Wang, G., Jin, X., Zhao, Z., & Liu, Y. (2020). The construction and comprehensive prognostic analysis of the LncRNA-associated competitive endogenous RNAs network in colorectal cancer [Original Research]. *Frontiers in genetics*, Volume 11 - 2020.
- Logsdon, G. A., Vollger, M. R., & Eichler, E. E. (2020). Long-read human genome sequencing and its applications. *Nat Rev Genet*, 21, 597-614.
- Massari, M. E., & Murre, C. (2000). Helix-loop-helix proteins: regulators of transcription in eucaryotic organisms. *Molecular and cellular biology*, 20, 429-440.
- Metzker, M. L. (2010). Sequencing technologies—the next generation. *Nature Reviews Genetics*, 11, 31-46.
- Moustakli, E., Christopoulos, P., Potiris, A., Zikopoulos, A., Mavrogianni, D., Karampas, G., Kathopoulos, N., Anagnostaki, I., Domali, E., Tzallas, A. T., Drakakis, P., & Stavros, S. (2025). Long-read sequencing and structural variant detection: unlocking the hidden genome in rare genetic disorders. *Diagnostics (Basel)*, 15.
- Panchal, J., & Uttchin, V. (2003). Management of craniosynostosis. *Plastic and reconstructive surgery*, 111, 2032-2048.
- Sedlazeck, F. J., Lee, H., Darby, C. A., & Schatz, M. C. (2018). Piercing the dark matter: bioinformatics of long-range sequencing and mapping. *Nat Rev Genet*, 19, 329-346.
- Topa, A., Rohlin, A., Andersson, M. K., Fehr, A., Lovmar, L., Stenman, G., & Kölby, L. (2020). NGS targeted screening of 100 Scandinavian patients with coronal synostosis. *American Journal of Medical Genetics Part A*, 182, 348-356.
- Twigg, S. R., & Wilkie, A. O. (2015). A genetic-pathophysiological framework for craniosynostosis. *The American Journal of Human Genetics*, 97, 359-377.
- Wang, B., Jia, P., Gao, S., Zhao, H., Zheng, G., Xu, L., & Ye, K. (2025). Long and accurate: how HiFi sequencing is transforming genomics. *Genomics Proteomics Bioinformatics*, 23.
- Wang, J. C., Nagy, L., & Demke, J. C. (2016). Syndromic craniosynostosis. *Facial Plastic Surgery Clinics*, 24, 531-543.



- Wenger, A. M., Peluso, P., Rowell, W. J., Chang, P.-C., Hall, R. J., Concepcion, G. T., Ebler, J., Fungtammasan, A., Kolesnikov, A., Olson, N. D., Töpfer, A., Alonge, M., Mahmoud, M., Qian, Y., Chin, C.-S., Phillippy, A. M., Schatz, M. C., Myers, G., DePristo, M. A., Hunkapiller, M. W. (2019). Accurate circular consensus long-read sequencing improves variant detection and assembly of a human genome. *Nature Biotechnology*, 37, 1155-1162.
- Wilkie, A. O., Johnson, D., & Wall, S. A. (2017). Clinical genetics of craniosynostosis. *Current opinion in pediatrics*, 29, 622-628.

การประเมินประสิทธิภาพชุดตรวจแอนติบอดีชนิด IgM ต่อเชื้อ *Leptospira* ด้วยวิธีอิมมูโนโครมาโทกราฟี ในผู้ป่วยสงสัยโรคฉี่หนู : การศึกษาในโรงพยาบาลตรัง

Diagnostic Performance of an IgM Antibody Test for *Leptospira* Based on Immunochromatography in Suspected Leptospirosis Patients: A Study at Trang Hospital.

ศศิวรรณ สุวรรณสถิตย์^{1,2} ควีน ไทรเมือง¹ นุชนี่ แสงกุล³ สกาวรัตน์ สิทธิพล¹ และ กุลชาติ จังภักทพงศ์¹
Sasiwan Suwansatit^{1,2} Kween Saimuang¹ Nuchanee Sangkul³ Sakaorat Sittipol¹ and
Kulachart Jangpatarapongsa¹

บทคัดย่อ

โรคฉี่หนูเป็นโรคติดต่อที่เป็นปัญหาสาธารณสุขสำคัญ โดยการวินิจฉัยในระยะแรกยังมีข้อจำกัดจากวิธีมาตรฐานที่ซับซ้อนและใช้เวลานาน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความจำเพาะของนวัตกรรมชุดตรวจแอนติบอดีชนิด IgM ต่อเชื้อ *Leptospira* ด้วยวิธีอิมมูโนโครมาโทกราฟี (LEP-M Plus) ในผู้ป่วยสงสัยโรคฉี่หนู ณ โรงพยาบาลตรัง โดยเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน Microscopic Agglutination Test (MAT) การศึกษานี้ใช้ตัวอย่างซีรัมทั้งหมด 185 ตัวอย่าง ประกอบด้วยกลุ่มผู้ป่วยสงสัยติดเชื้อ *Leptospira* จำนวน 80 ตัวอย่าง กลุ่มคนสุขภาพดี 80 ตัวอย่าง และกลุ่มตัวอย่างที่ติดเชื้ออื่น ได้แก่ Dengue virus, HIV, HCV, HBV และ *Treponema pallidum* รวม 25 ตัวอย่าง โดยใช้ผล MAT เป็นเกณฑ์มาตรฐาน ผลการศึกษาพบว่าชุดตรวจ LEP-M Plus มีความไวร้อยละ 98.75 และความจำเพาะร้อยละ 97.50 โดยมีค่าพยากรณ์ผลบวกและผลลบร้อยละ 97.53 และ 98.73 ตามลำดับ และไม่พบการเกิดปฏิกิริยาข้ามกับเชื้อชนิดอื่น

สรุปได้ว่าชุดตรวจ LEP-M Plus มีประสิทธิภาพสูง เหมาะสำหรับการคัดกรองและช่วยวินิจฉัยโรคฉี่หนูใน ทางคลินิก อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในกลุ่มตัวอย่างที่หลากหลายและใช้หลายระดับ cut-off เพื่อยืนยันความแม่นยำในอนาคต

คำสำคัญ : โรคฉี่หนู แอนติบอดีชนิด IgM อิมมูโนโครมาโทกราฟี การทดสอบการเกาะกลุ่มด้วยกล้องจุลทรรศน์

¹ ศูนย์วิจัยพัฒนานวัตกรรมและชีวการแพทย์สารสนเทศ คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดนครปฐม 73170 ประเทศไทย

Center for Research Innovation and Biomedical Informatics, Faculty of Medical Technology, Mahidol University, Nakhon Pathom 73170, Thailand.

² ห้องปฏิบัติการชีวโมเลกุล โรงพยาบาลเลิดสิน จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10500 ประเทศไทย
Department of Biomolecular, Lersin Hospital, Bangkok province 10500, Thailand

³ ห้องปฏิบัติการด้านภูมิคุ้มกันวิทยา โรงพยาบาลตรัง จังหวัดตรัง 92000 ประเทศไทย
Department of Immunology, Trung Hospital, Trung province 92000, Thailand



Abstract

Leptospirosis is an important infectious disease and a significant public health concern. Early diagnosis remains challenging due to the complexity and time-consuming nature of standard diagnostic methods. This study aimed to evaluate the diagnostic performance and specificity of an immunochromatographic assay for detecting anti-*Leptospira* IgM antibodies (LEP-M Plus) in patients suspected of leptospirosis at Trang Hospital, in comparison with the gold standard Microscopic Agglutination Test (MAT). A total of 185 serum samples were included in this study, comprising 80 suspected leptospirosis cases, 80 healthy controls, and 25 samples from patients with other infections, including Dengue virus, HIV, HCV, HBV, and *Treponema pallidum*. MAT was used as the reference standard. The results showed that the LEP-M Plus assay demonstrated a sensitivity of 98.75% and a specificity of 97.50%, with positive and negative predictive values of 97.53% and 98.73%, respectively. and no cross-reactivity with other infections was observed. In conclusion, the LEP-M Plus test exhibits high efficiency and is suitable for clinical screening and auxiliary diagnosis of leptospirosis. However, further studies with more diverse samples and multiple cut-off levels are recommended to confirm its diagnostic precision in the future.

Keyword : Leptospirosis IgM antibody Immunochromatography Microscopic Agglutination Test

1. บทนำ

โรคฉี่หนู เป็นโรคอุบัติซ้ำที่เป็นปัญหาสาธารณสุขสำคัญระดับโลกและประเทศไทย เกิดจากเชื้อแบคทีเรียกลุ่มสไปโรชีตสายพันธุ์ก่อโรค *Leptospira interrogans* ซึ่งแพร่กระจายผ่านปัสสาวะของสัตว์พาหะ เช่น หนู โค กระบือ และสุนัข เชื้อสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ผ่านทางบาดแผล ผิวหนังที่อ่อนนุ่มจากการแช่น้ำเป็นเวลานาน หรือผ่านทางเยื่อเมือกต่าง ๆ อาการทางคลินิกมีตั้งแต่อาการไม่รุนแรงคล้ายไข้หวัดใหญ่ ไปจนถึงอาการรุนแรงที่ทำให้เกิดความล้มเหลวของอวัยวะต่าง ๆ เช่น ตับ ไต และระบบไหลเวียนโลหิต ซึ่งหากไม่ได้รับการวินิจฉัยและรักษาอย่างทันท่วงทีอาจนำไปสู่การเสียชีวิตได้ (Terpstra et al., 2003)

ในประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่ภาคใต้และภาคเหนือ มักพบการระบาดอย่างต่อเนื่องในช่วงฤดูฝน หรือสถานการณ์อุทกภัย ซึ่งสภาพแวดล้อมที่ชื้นแฉะและน้ำท่วมขังเป็นปัจจัยเสี่ยงหลักที่ส่งเสริมการแพร่กระจายของเชื้อ อย่างไรก็ตาม การวินิจฉัยโรคฉี่หนูในระยะแรกทำได้ยากเนื่องจากอาการทางคลินิกไม่มีความเฉพาะเจาะจง โดยมักมีอาการคล้ายคลึงกับโรคติดเชื้ออื่น ๆ เช่น ไข้เลือดออก หรือไวรัสตับอักเสบบี ปัจจุบันการตรวจวินิจฉัยทางห้องปฏิบัติการมีหลายวิธี ทั้งวิธีทางตรง เช่น การเพาะแยกเชื้อ การตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์ และการตรวจสารพันธุกรรม (PCR) ซึ่งเหมาะสำหรับตรวจในระยะเริ่มแรกของโรค ส่วนวิธีทางอ้อมที่เป็นวิธีมาตรฐาน คือ MAT ซึ่งมีความจำเพาะสูง แต่มีข้อจำกัดสำคัญคือ ขั้นตอนการทดสอบยุ่งยากซับซ้อน ต้องใช้บุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญสูง ต้องเพาะเลี้ยงเชื้อมีชีวิตจำนวนมากสายพันธุ์ และ



ใช้ระยะเวลาในการรายงานผล ทำให้ไม่เหมาะสำหรับการใช้งานในสถานพยาบาลระดับปฐมภูมิหรือการควบคุมโรคในพื้นที่ห่างไกล (กรมควบคุมโรค, 2563)

จากข้อจำกัดดังกล่าว การพัฒนาวัตกรรมการทดสอบเชิงคุณภาพแบบรวดเร็ว ที่มีประสิทธิภาพจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะชุดตรวจหาแอนติบอดีชนิด IgM ซึ่งเป็นแอนติบอดีที่ร่างกายสร้างขึ้นในระยะแรกของการติดเชื้อ วัตกรรมการตรวจหา *Leptospira* IgM Rapid Test (LEP-M Plus) ที่พัฒนาโดย คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล อาศัยหลักการอิมมูโนโครมาโทกราฟี ซึ่งใช้งานง่าย ทราบผลรวดเร็วภายในเวลาไม่เกิน 15 นาที และไม่ต้องอาศัยเครื่องมือพิเศษ จึงเป็นทางเลือกที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการคัดกรองผู้ป่วยเบื้องต้น

อย่างไรก็ตาม เพื่อให้เกิดความมั่นใจในการนำวัตกรรมการนี้ไปใช้งานจริงในทางคลินิก จำเป็นต้องมีการประเมินสมรรถนะเชิงวินิจฉัยอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะการเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน MAT และการตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาข้ามกับโรคติดเชื้ออื่น เช่น Dengue virus, HIV, HCV, HBV และ *Treponema pallidum* เป็นต้น ผู้วิจัยจึงสนใจทำการศึกษาการประเมินสมรรถนะเชิงวินิจฉัยวัตกรรมการตรวจหาเพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงประจักษ์ที่เป็นประโยชน์ต่อการวินิจฉัยและการดูแลรักษาผู้ป่วยอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของนวัตกรรมการตรวจหาแอนติบอดีชนิด IgM ต่อเชื้อ *Leptospira*

2.2 เพื่อศึกษาความจำเพาะของนวัตกรรมการตรวจหาแอนติบอดีชนิด IgM ต่อเชื้อ *Leptospira* โดยศึกษาการเกิดปฏิกิริยาข้ามกับตัวอย่างซีรัมที่ติดเชื้อมาก่อนโรคชนิดอื่น ๆ

3. อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 ประชากรกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในการศึกษานี้ทั้งหมด 185 ตัวอย่าง ดังนี้ ตัวอย่างซีรัมที่ส่งสัยการติดเชื้อ *Leptospira* จำนวน 80 ตัวอย่าง และกลุ่มตัวอย่างซีรัมคนที่สุขภาพดี 80 ตัวอย่าง ตัวอย่างซีรัมที่สงสัยการติดเชื้อชนิดอื่น แบ่งเป็นเชื้อไวรัส Dengue virus, HIV, HCV, HBV และเชื้อแบคทีเรีย *Treponema pallidum* IgM จำนวน กลุ่มละ 5 ตัวอย่าง รวมเป็น 25 ตัวอย่าง การศึกษานี้ได้รับการอนุมัติด้านจริยธรรมการวิจัยในคนจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในคน โรงพยาบาลตรัง เลขที่ 064/09-2568 และได้รับการรับรองจากสำนักงานคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในคนชุดกลาง มหาวิทยาลัยมหิดล รหัสโครงการ MU-CIRB 2025/390.2507

3.2 เกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง

ในการศึกษานี้ใช้ผลการตรวจด้วยวิธี MAT ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในการจำแนกกลุ่มตัวอย่าง ซีรัมถูกเก็บให้อยู่ในสภาพดี ปริมาณเพียงพอ และจัดเก็บภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ -20 องศา โดยมีเกณฑ์ที่ใช้คัดเลือก ดังนี้

3.2.1 กลุ่มตัวอย่างที่ให้ผลบวก คือกลุ่มตัวอย่างซีรัมผู้ป่วยที่สงสัยติดเชื้อ *Leptospira* โดยมีผลบวกจากการตรวจด้วยวิธีอิมมูโนโครมาโทกราฟีของชุดตรวจ GenBody จากโรงพยาบาลตรัง และได้รับการตรวจยืนยันผลเป็นผลบวกจาก Single serum ที่ titer 1:400 ขึ้นไป ด้วยวิธี MAT จาก ศูนย์วิจัยพัฒนานวัตกรรมและชีวการแพทย์สารสนเทศ คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล

3.2.2 กลุ่มตัวอย่างที่ให้ผลลบ คือกลุ่มตัวอย่างซีรัมคนที่สุขภาพดีและได้รับการตรวจยืนยันผลเป็นลบด้วยวิธี MAT จาก ศูนย์วิจัยพัฒนานวัตกรรมและชีวการแพทย์สารสนเทศ คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล และเกณฑ์ทางคลินิก ดังนี้

3.2.2.1 กลุ่มตัวอย่างซีรัมคนที่สุขภาพดี คือ ตัวอย่างซีรัมจากบุคคลที่ไม่ปรากฏอาการทางคลินิก และ ให้ผลลบ ด้วยวิธี MAT จาก Single serum ที่ titer < 1:400

3.2.2.2 กลุ่มตัวอย่างซีรัมติดเชื้ออื่น คือ ตัวอย่างซีรัมจากผู้ป่วยที่ได้รับการยืนยันว่าติดเชื้อชนิดอื่น ได้แก่ ไวรัส Dengue, HBV, HCV, HIV และแบคทีเรีย *Treponema pallidum* ด้วยวิธีทางห้องปฏิบัติการเทคนิคการแพทย์โรงพยาบาลตรัง และ ให้ผลลบ ด้วยวิธี MAT จาก Single serum ที่ titer < 1:400

3.3 รูปแบบการศึกษา

งานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นการ การทดลอง (Experiment)

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.4.1 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ *Leptospira* IgM

1. ชุดทดสอบสำเร็จรูป : ชุดตรวจหาแอนติบอดีชนิด IgM ต่อเชื้อ *Leptospira* (LEP-M Plus)
2. บัฟเฟอร์ : น้ำยาบัฟเฟอร์ เฉพาะสำหรับชุดตรวจ LEP-M Plus
3. อุปกรณ์วัดปริมาตรของเหลวขนาดเล็ก : ไมโครปิเปตชนิดปรับปริมาตรได้ช่วงการวัด 20-200 ไมโครลิตร พร้อมทิปปราศจากเชื้อ
4. อุปกรณ์จับเวลา : นาฬิกาจับเวลาดิจิทัลสำหรับควบคุมระยะเวลาการอ่านผลการทดสอบและปากกาสำหรับระบุรหัสตัวอย่างบนชุดทดสอบ
5. อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล : ถุงมือยางชนิดไม่มีแป้งและเสื้อกาวน์สำหรับปฏิบัติการ
6. อุปกรณ์สำหรับการจัดการขยะติดเชื้อ : ถังสำหรับทิ้งทิปและถุงแดงสำหรับขยะติดเชื้อ
7. อุปกรณ์ทำความสะอาด : แอลกอฮอล์ 70% และ ผ้าก๊อซ สำหรับเช็ดทำความสะอาดพื้นที่ปฏิบัติงานก่อนและหลังการทดสอบ
8. ตัวอย่างซีรัม : กลุ่มตัวอย่างซีรัมทั้งหมด 185 ตัวอย่าง จากโรงพยาบาลตรัง ที่ได้รับการยืนยันผลด้วยวิธี MAT จากศูนย์วิจัยพัฒนานวัตกรรมและชีวการแพทย์สารสนเทศ คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัย มหิดล

3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ *Leptospira* IgM Rapid Test (LEP-M Plus)

1. การเตรียมตัวอย่าง : นำตัวอย่างซีรัม ทั้งหมด 185 ตัวอย่าง ที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ออกมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องและรอให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องก่อนเริ่มทำการทดสอบ

2. การเตรียมชุดทดสอบ : นำชุดทดสอบ LEP-M Plus ออกจากซองบรรจุ วางบนพื้นราบที่สะอาด และแห้ง พร้อมระบุรหัสตัวอย่างลงบนชุดทดสอบให้ชัดเจน

3. การทดสอบ : ใช้ไมโครปิเปตดูดตัวอย่างซีรัมปริมาตร 60 ไมโครลิตร หยดลงในช่องใส่ตัวอย่างของชุดทดสอบ หยดน้ำยาบัฟเฟอร์ จำนวน 3 หยด ลงในช่องใส่ตัวอย่างตามทันทีเริ่มจับเวลาการเกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 15 นาที โดยตั้งนาฬิกาจับเวลาดิจิทัล

4. การอ่าน : เมื่อครบกำหนดเวลา 15 นาที ให้ทำการอ่านผลการทดสอบโดยพิจารณาการปรากฏของแถบสีที่ตำแหน่งเส้นทดสอบ และเส้นควบคุม ตามเกณฑ์ที่ระบุในคู่มือการใช้งาน ดังนี้ รูปที่ 3.1

5. การบันทึกผล : รวบรวมและบันทึกผลการทดสอบทั้งหมดลงในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติต่อไป

3.5 วิธีหาคำนวณ

3.5.1 คำนวณหาค่า ความไว ความจำเพาะ ค่าพยากรณ์ผลบวก และ ค่าพยากรณ์ผลลบ โดยตาราง two-by-two table จากค่า True positive False positive False negative และ True negative นิยามของแต่ละตัวแปร ดังตาราง 3.1 และ 3.2

3.5.2 คำนวณการเกิดปฏิกิริยาข้ามกับตัวอย่างซีรัมที่ติดเชื้อมีโรคชนิดอื่นๆโดยการนำตัวอย่างที่ให้ผลบวกจากการทำปฏิกิริยากับเชื้อทั้งสองชนิดหารด้วยจำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่นำมาทดสอบความจำเพาะจากนั้นคูณ ด้วยหนึ่งร้อย เพื่อสรุปผลออกมาเป็นค่าร้อยละ

4. ผลและวิจารณ์

จากการวิเคราะห์ตาราง two-by-two ดังตารางที่ 4.1 พบว่า ชุดตรวจสามารถตรวจพบผู้ป่วยได้ถูกต้องจำนวน 79 ราย และตรวจระบุผู้ที่ไม่เป็นโรคได้ถูกต้องจำนวน 78 ราย ขณะที่พบผลบวกหลง จำนวน 2 ราย และผลลบหลง เพียง 1 ราย จากข้อมูลดังกล่าวคำนวณได้ว่าชุดตรวจมีความไว เท่ากับร้อยละ 98.75 และความจำเพาะ เท่ากับร้อยละ 97.50 นอกจากนี้ ค่า ค่าพยากรณ์ผลบวก และ ค่าพยากรณ์ผลลบ เท่ากับร้อยละ 97.53 และ 98.73 ตามลำดับ ตามรูปที่ 4.2 และไม่พบการเกิดปฏิกิริยาข้ามกับตัวอย่างซีรัมที่ติดเชื้อมีโรคชนิดอื่นๆ

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าชุดตรวจ LEP-M Plus มีประสิทธิภาพในการวินิจฉัยโรคอยู่ในระดับสูงเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการทดสอบชุดตรวจแอนติบอดีชนิด IgM ต่อเชื้อ *Leptospira* ด้วยวิธี อิมมูโนโครมาโทกราฟี หลายชนิด เช่น การศึกษาหนึ่งในประเทศ รายงานว่าชุดตรวจ RDTs ที่ตรวจหาภูมิคุ้มกัน IgM จำนวน 5 ยี่ห้อที่ใช้ในประเทศไทย สำหรับ *Leptospira* มีค่าความไวอยู่ในเกณฑ์ต่ำมาก โดยมีค่าระหว่าง 1.8% ถึง 75% และความจำเพาะ 52.3–97.7% ซึ่งสะท้อนว่าชุดตรวจในงานวิจัยนี้มีความสามารถในการตรวจพบผู้ป่วยได้ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (Dinhuzen J et al., 2021) สอดคล้องกับรายงานการศึกษาในประเทศอินโดนีเซียล่าสุด (2025) ซึ่งประเมินชุดตรวจ RDTs 4 ยี่ห้อ เทียบกับวิธี MAT พบว่าชุดตรวจส่วนใหญ่มีค่าความไวแปรผันกว้างตั้งแต่ 30.9% จนถึง 83.6% โดยมีเพียงยี่ห้อเดียวที่สามารถทำค่าความไวได้สูงเกิน 80% อย่างไรก็ตามยังมีบางงานวิจัย แนะนำให้ใช้ RDT มากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน หรือยืนยันผลด้วยวิธี MAT เสมอ แม้ว่าผลลัพธ์จะอยู่ในระดับดีเยี่ยม แต่ควรพิจารณาข้อจำกัดสำคัญของการศึกษา กล่าวคือ ชุดตรวจ



แบบ IgM โดยทั่วไปมีความไวที่แตกต่างกันตามระยะของโรค โดยเฉพาะในระยะเริ่มต้นอาจให้ผลลบลงได้ เนื่องจากระดับแอนติบอดียังไม่สูงเพียงพอ (Levett, 2001)

5. สรุป

ชุดตรวจ LEP-M Plus มีประสิทธิภาพสูงในการวินิจฉัยโรค โดยมีค่าความไวและความจำเพาะอยู่ในระดับสูง เหมาะสำหรับนำไปใช้คัดกรองและช่วยวินิจฉัยเบื้องต้นในผู้ป่วยสงสัยโรคฉี่หนูในบริบทของโรงพยาบาล ต้ง นอกจากนี้ประสิทธิภาพทางวิชาการแล้ว ชุดตรวจนี้ยังมีจุดเด่นด้านต้นทุนที่ต่ำกว่าวิธีมาตรฐาน และใช้งานง่ายโดยไม่ต้องอาศัยบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะทางสูงเหมือนวิธี MAT ทำให้ลดภาระงานและเพิ่มความรวดเร็วในการรายงานผลเพื่อการรักษาที่ทันทั่วถึง นวัตกรรมนี้จึงมีความคุ้มค่าสูงสำหรับโรงพยาบาลระดับปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยเฉพาะในพื้นที่ห่างไกลหรือในเขตสุขภาพที่มีการระบาดต่อเนื่อง ซึ่งควรพิจารณาจัดซื้อติดโรงพยาบาลเพื่อเป็นเครื่องมือหลักในการคัดกรองหน้างาน อย่างไรก็ตาม เพื่อยืนยันศักยภาพของนวัตกรรมชุดตรวจนี้ในระดับที่กว้างขึ้น ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยเพิ่มจำนวนและความหลากหลายของกลุ่มตัวอย่างให้ครอบคลุมผู้ป่วยในระยะต่าง ๆ ของโรคมามากขึ้น อีกทั้งควรมีการประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ในสถานพยาบาลหลายระดับ เพื่อสนับสนุนการผลักดันเข้าสู่ระบบบริการสุขภาพและเป็นมาตรฐานการคัดกรองในระดับนโยบายต่อไปอย่างมีประสิทธิภาพ

6. คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ หอสมุดคุ้มกันวิทยา โรงพยาบาลต้ง เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนเครื่องมือตัวอย่างเพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้ และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีววิทยาศาสตร์ (องค์การมหาชน) ในฐานะผู้สนับสนุนทุนวิจัยสำหรับการประเมินประสิทธิภาพชุดทดสอบในกลุ่มประชากรไทย นอกจากนี้ทุนสนับสนุน งานวิชาการ กรมการแพทย์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์นักศึกษาศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการทางเทคนิคการแพทย์ คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล



เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมโรค กองระบาดวิทยา. (2563). สรุปรายงานการเฝ้าระวังโรค ประจำปี 2562 (Annual Epidemiological Surveillance Report 2019) (พิมพ์ครั้งที่ 1). กระทรวงสาธารณสุข.

Dinhuzen, J., Limothai, U., Tachaboon, S., Krairojananan, P., Laosatiankit, B., Boonprasong, S., Khositseth, S., Peerapornratana, S., Tungsanga, K., Sitprija, V., Kellum, J. A., & Srisawat, N. (2021). A prospective study to evaluate the accuracy of rapid diagnostic tests for diagnosis of human leptospirosis: Result from THAI-LEPTO AKI study. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 15(2), Article e0009159. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0009159>

Handayani, F., Widanarti, E. T., Kusuma, C. W., Ristiyanto, R., Soebandrio, A., & Gasem, M. H. (2025). Accuracy of four rapid diagnostic tests (RDTs) for human leptospirosis diagnosis in Indonesia. *Microbiology Spectrum*, 13(6), Article e01524-24. <https://doi.org/10.1128/spectrum.01524-24>

Levett, P. N. (2001). Leptospirosis. *Clinical Microbiology Reviews*, 14(2), 296–326. <https://doi.org/10.1128/CMR.14.2.296-326.2001>

Terpstra, W. J. (2003). Human leptospirosis: Guidance for diagnosis, surveillance and control. World Health Organization.

ตารางที่ 3.1 ตารางอธิบายความหมายของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณทางสถิติ

คำศัพท์	ความหมาย
True Positive	ผลตรวจ LEP-M Plus เป็นบวก และ MAT ก็เป็นบวกจริง
True Negative	ผลตรวจ LEP-M Plus เป็นลบ และ MAT ก็เป็นลบจริง
False Positive	ผลตรวจ LEP-M Plus เป็นบวก แต่ MAT เป็นลบ
False Negative	ผลตรวจ LEP-M Plus เป็นลบ แต่ MAT เป็นบวก

ตารางที่ 3.2 ตาราง two-by-two

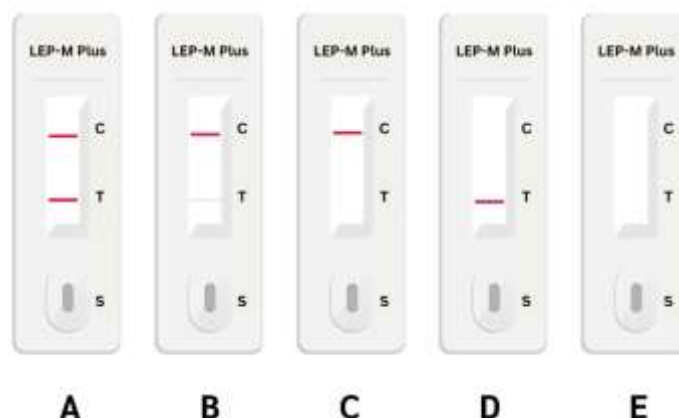
การทดสอบด้วย LEP-M Plus	การทดสอบด้วย MAT		รวม
	ผลบวก	ผลลบ	
ผลบวก	True Positive	False Positive	Total
ผลลบ	False Negative	True Negative	Total
รวม	Total	Total	Total

ตารางที่ 4.1 ตาราง two-by-two การประเมินประสิทธิภาพของชุดตรวจ LEP-M Plus

การทดสอบด้วย LEP-M Plus	การทดสอบด้วย MAT		รวม
	ผลบวก	ผลลบ	
ผลบวก	79	2	81
ผลลบ	1	78	79
รวม	80	80	160

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการประเมินประสิทธิภาพของชุดตรวจ LEP-M Plus

ตัวชี้วัด (Indicator)	LEP-M Plus
ความไว	98.75%
ความจำเพาะ	97.50%
ค่าพยากรณ์ผลบวก	97.53%
ค่าพยากรณ์ผลลบ	98.73%



รูปที่ 3.1 การแปลผลการทดสอบ *Leptospira* IgM Rapid Test (LEP-M Plus) แสดงผลบวก, ผลลบ, และผลที่ไม่สามารถแปลผลได้

ผลบวก (Positive) - รูป A และ B ปรากฏแถบสีแดง 2 แถบอย่างชัดเจน โดยแถบหนึ่งปรากฏที่ตำแหน่งเส้นควบคุม (C) และอีกแถบหนึ่งปรากฏที่ตำแหน่ง เส้นทดสอบ (T) บ่งชี้ว่ามีแอนติบอดีชนิด IgM ต่อเชื้อ *Leptospira* ในตัวอย่างซีรัมของผู้ป่วย และชุดตรวจสามารถจับสัญญาณได้ ความเข้มของแถบสีที่เส้นทดสอบ (T) อาจแตกต่างกันไป (เช่น เข้มมากในรูป A หรือจางลงในรูป B) โดยให้ถือว่าเป็นผลบวกหากปรากฏแถบสีที่เส้นทดสอบ (T)



ผลลบ (Negative) - รูป C ปรากฏแถบสีแดงเพียงแถบเดียวที่ตำแหน่ง เส้นควบคุม (C) เท่านั้น และไม่ปรากฏแถบสีใดๆ ที่เส้นทดสอบ (T) บ่งชี้ว่าไม่มีแอนติบอดีชนิด IgM ต่อเชื้อ *Leptospira* หรือมีในปริมาณที่ต่ำกว่าขีดจำกัดในการตรวจวัดของชุดตรวจ

ผลที่ไม่สามารถแปลผลได้ (Invalid) - ไม่ปรากฏแถบสีแดงที่ตำแหน่งเส้นควบคุม (C) โดยในรูป D ปรากฏแถบสีแดงเฉพาะที่เส้นทดสอบ (T) แต่ไม่ปรากฏที่เส้นควบคุม (C) ซึ่งอาจเกิดจากปรากฏการณ์ High Dose Hook Effect เนื่องจากมีปริมาณแอนติบอดีในตัวอย่างสูงเกินไปจนขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาที่เส้นควบคุม ส่วนในรูป E ไม่ปรากฏแถบสีใดๆ ทั้งที่เส้นควบคุม (C) และเส้นทดสอบ (T) ผลการทดสอบลักษณะนี้ไม่สามารถนำมาใช้ในการวินิจฉัยได้ อาจมีสาเหตุมาจากปริมาณตัวอย่างไม่เพียงพอ ขั้นตอนการทดสอบไม่ถูกต้อง หรือชุดตรวจเสื่อมสภาพ วิธีแก้ไขในรูป D คือต้องทำการเจือจางตัวอย่าง หากสงสัย Hook Effect หรือทำการทดสอบใหม่ทันทีโดยใช้ชุดทดสอบอันใหม่และปฏิบัติตามขั้นตอนการทดสอบ ในรูป E หากปัญหายังคงอยู่ควรติดต่อผู้ผลิตเพื่อตรวจสอบคุณภาพชุดตรวจต่อไป



การศึกษาการใช้สารทดแทนความหวานในผลิตภัณฑ์น้ำปลาหวาน

A study on the use of sweeteners in Thai sweet sauce products (Nam Pla Wan)

ตรีรัตน์ ทองฟ้า¹, เพชรลัดดา โต๊ะภู¹, พรชนก ไบเรือง¹, สุธิณัฐ มีบุตรสม¹ และ ภาวิกา รุ่งพิชัยพิเชฐ¹

Trirat Tongfa¹, Phetladda Tohku¹, Pornchanok Bairueng¹, Sutinut Meebudsom¹ and

Parika Rungpichayapichet¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดสารทดแทนความหวาน ได้แก่ ฟรุกโตโอลิโกแซ็กคาไรด์ (FOS) ทรีฮาโลส และซูคราโลส และระดับการทดแทนน้ำตาล (10 และ 20%) ต่อคุณลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี, ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (Browning Index, BI), ค่าความแตกต่างของสีรวม (Total Color Difference, ΔE), ความหนืด และค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity, a_w) ทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid, TSS) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณสาร 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) รวมถึงคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์น้ำปลาหวานโดยเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำปลาหวานมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.74–0.77 และ pH 5.7–6.1 มีค่าใกล้เคียงกันในทุกสูตร การใช้สารทดแทนความหวานที่ระดับ 20% ส่งผลให้ค่า TSS และความหนืดเพิ่มขึ้นจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การใช้ทรีฮาโลสไม่ส่งผลต่อค่า ΔE และค่า BI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในทุกระดับการทดแทน ในขณะที่การใช้ FOS ที่ระดับ 20% ให้ค่า BI สูงที่สุด (33.64 ± 12.52) ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่าการใช้สารทดแทนความหวานที่ระดับ 10% ได้รับคะแนนความชอบในทุกด้านไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม ($p > 0.05$) โดยสูตรที่ใช้ซูคราโลสที่ระดับ 10% มีแนวโน้มได้รับยอมรับสูงกว่าในคุณลักษณะด้านสี รสชาติและความชอบโดยรวม

คำสำคัญ : การพัฒนาผลิตภัณฑ์, สารให้ความหวานทางเลือก, การทดแทนน้ำตาล, สารทดแทนน้ำตาล, ปฏิกริยาเมลลาร์ด

Abstract

This research aimed to investigate the effects of different sweeteners fructooligosaccharide (FOS), trehalose, and sucralose at substitution levels of 10% and 20% on the physicochemical and sensory properties of Thai sweet sauce product. Physical properties, including colors, browning index (BI), total color difference (ΔE), viscosity, and water activity (a_w), were analyzed alongside

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

chemical parameters such as total soluble solids (TSS), pH, and 5-hydroxymethylfurfural (HMF) content. Results indicated that a_w (0.73–0.76) and pH (5.7–6.1) remained relatively stable across all formulations. However, increasing sweetener substitution to 20% significantly enhanced TSS and viscosity compared to the control ($p \leq 0.05$). While trehalose substitution showed no significant impact on ΔE or BI at either level ($p > 0.05$), the 20% FOS formulation exhibited the highest BI (33.64 ± 12.52). Sensory evaluation revealed that 10% substitution levels across all sweeteners yielded preference scores comparable to the control ($p > 0.05$). Notably, the 10% sucralose formulation demonstrated the highest potential for consumer acceptance, specifically in terms of color, flavor, and overall liking. These findings suggest that low-level sweetener substitution can effectively maintain the quality attributes of Thai sweet sauce product while providing a potential approach for sugar reduction.

Keyword : Product development, Alternative sweeteners, Sugar replacement, Sugar substitutes, Maillard reaction

บทนำ

น้ำปลาหวานเป็นเครื่องเคียงพื้นบ้านที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว ทั้งในด้านรสชาติและลักษณะปรากฏ โดยมีรสหวานเป็นลักษณะเด่นจากน้ำตาลซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก ร่วมกับรสเค็มจากน้ำปลา และมีการปรุงแต่งด้วยส่วนผสมต่าง ๆ เช่น กุ้งแห้ง กะปิ หอมแดง และพริก (มพช. 114/2546) ลักษณะสีของน้ำปลาหวานที่มีสีน้ำตาลเข้มนั้นเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ เช่น กลูโคสและฟรุกโตส กับกรดอะมิโนหรือโปรตีนที่พบในวัตถุดิบ เช่น น้ำปลาและกุ้งแห้ง (มณัญญา และคณะ, 2560) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณสูงอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภคในระยะยาว ซึ่งไม่สอดคล้องกับแนวโน้มการบริโภคอาหารในปัจจุบัน การใช้สารทดแทนความหวานจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปริมาณน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ ถึงแม้ว่าการใช้สารทดแทนความหวานจะเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว แต่การเปลี่ยนชนิดของน้ำตาลอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี โดยเฉพาะการเกิดสีน้ำตาลที่ผ่านปฏิกิริยาเมลลาร์ด รวมถึงการเปลี่ยนแปลงความข้นหนืดของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณการใช้สารทดแทนความหวาน เพื่อลดปริมาณน้ำตาลในผลิตภัณฑ์น้ำปลาหวาน โดยยังคงรักษาคุณลักษณะทางกายภาพ เคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสให้ใกล้เคียงกับสูตรดั้งเดิม เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้อย่างเหมาะสม



วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารทดแทนความหวานต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมีและการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ปลาหวาน

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์น้ำปลาหวาน ได้แก่ น้ำตาลมะพร้าว (ยี่ห้อ Lin coconut palm sugar), น้ำตาลทราย (ยี่ห้อ Lin), หอมแดง, พริกแดง, น้ำปลา(ตราทิพรส), กะปิแห้ง(ตราเรือทะเล), สารทดแทนความหวาน ทรีฮาโลส, ซูคราโลส, FOS (บริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด, ประเทศไทย), มอลโตเดกซ์ทริน (บริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด, ประเทศไทย), กุ้งแห้ง(ตราริมเลอาหารทะเลแปรรูป)

การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์น้ำปลาหวานสูตรควบคุมและสูตรการใช้สารทดแทนความหวาน

การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์น้ำปลาหวาน ทั้งในสูตรควบคุมและสูตรที่ใช้สารทดแทนความหวาน ดำเนินการตามขั้นตอนที่ระบุในแผนภาพกระบวนการผลิต (ภาพที่ 1) ปริมาณสัดส่วนของสารทดแทนความหวานแต่ละชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยกำหนดระดับการทดแทน 10% และ 20% คำนวณจากสัดส่วนความหวานเทียบเท่าของสารทดแทนความหวานแต่ละชนิดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม จึงทำให้ปริมาณสารที่ใช้จริงแตกต่างกันตามค่าความหวานและสมบัติของสารแต่ละชนิด นอกจากนี้ยังตราส่วนสำหรับวัตถุดิบอื่นๆ ได้แก่ หอมแดง 13% น้ำปลา น้ำสะอาด และกุ้งแห้งอย่างละ 8% พริก 5.5% และกะปิ 1.5%

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ

วัดค่าสี ด้วยเครื่อง Colorimeter (KONICA MINOLTA รุ่น CM-5) ในระบบ CIE L*, a*, b* และคำนวณค่า ΔE รวมถึงคำนวณค่า BI ตามวิธีการของ Palou et al. (1999), วัดความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer (Brookfield รุ่น LV DVBT หัววัด LV-2) ที่อุณหภูมิ 25°C และวัดค่า a_w ด้วยเครื่อง Water Activity Meter (benchtop water activity meter รุ่น AQUALAB 4TE, METER Group, Inc., USA) ที่อุณหภูมิ 25 °C

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมี

วัดค่า TSS ด้วยเครื่อง Digital refractometer (รุ่น Pal 2, ATAGO Co. Ltd., Japan) ในหน่วย °Brix, วัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter (pH-meter รุ่น S220 Seven Compact TM pH/Ion, USA) และวัดปริมาณ HMF ด้วยวิธี UV-VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 284 และ 336 นาโนเมตรตามวิธีการของ (Kamboj et al., 2024)

การวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัส

ประเมินโดยใช้ผู้ทดสอบ 30 คน ใช้แบบทดสอบความชอบด้วยวิธี 9-point Hedonic Scale (1=ไม่ชอบมากที่สุด และ 9=ชอบมากที่สุด) โดยประเมินคุณลักษณะด้าน สี กลิ่น รสชาติ ความข้นหนืด และความชอบโดยรวม

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) และวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of Variance: ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป IBM SPSS Statistics 26

ผลและวิจารณ์

ผลของชนิดและระดับการทดแทนน้ำตาลของสารทดแทนความหวานต่อคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำปลาลาหวาน

ตารางที่ 2 แสดงคุณลักษณะทางเคมีและกายภาพของผลิตภัณฑ์น้ำปลาลาหวานสูตรต่าง ๆ จะเห็นว่า ค่า a_w ของทุกสูตรอยู่ในช่วง 0.74–0.77 จัดอยู่ในกลุ่มอาหารประเภท intermediate moisture food ซึ่งเป็นคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ประเภทซอสที่มีน้ำตาลสูง เนื่องจากน้ำตาลจับกับน้ำในระบบส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระลดลงจึงช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียได้แต่ยังคงมีความเสี่ยงต่อการเจริญของยีสต์และรา (Thompson, 2009) ค่า pH ของทุกสูตรอยู่ในช่วง 5.7–6.1 ซึ่งเป็นสภาวะกรดอ่อนที่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด เนื่องจากหุ้มน้ำตาลยังสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำตาลรีดิวซ์ได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้ปริมาณสารทดแทนความหวานที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ผลิตภัณฑ์น้ำปลาลาหวานมีค่า TSS และค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้น โดยการใช้สารทดแทนความหวานทุกชนิดที่ระดับการทดแทน 20% จะส่งผลให้ค่า TSS ค่าความหนืดมีค่าสูงกว่าสูตรควบคุม ($72.37 \pm 1.35^\circ \text{Brix}$ และ 309.70 cP ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งอาจสัมพันธ์กับโครงสร้างโมเลกุลและความสามารถในการจับน้ำของสารให้ความหวานแต่ละชนิด โดยเฉพาะ FOS ซึ่งเป็น oligosaccharide สามารถเกิด พันธะไฮโดรเจนกับน้ำและเพิ่มการยึดจับน้ำในระบบอาหาร ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำลดลงและค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น (Jackson et al., 2023)

ผลของชนิดและระดับการทดแทนน้ำตาลของสารทดแทนความหวานต่อคุณสมบัติทางด้านสี

จากการศึกษาพบว่า ชนิดและปริมาณของสารทดแทนความหวานที่ใช้ทดแทนน้ำตาลมีผลต่อการเกิดสีน้ำตาลและค่าสีของผลิตภัณฑ์น้ำปลาลาหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 3) โดยการใช้ทรีฮาโลสที่ระดับการทดแทน 10% และ 20% ไม่ส่งผลต่อค่า BI และ ΔE อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์มีสีใกล้เคียงสูตรควบคุม ขณะที่การใช้ FOS และซูคราโลสทำให้ค่า BI และ ΔE สูงขึ้นและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเฉพาะเมื่อระดับการทดแทนน้ำตาลเพิ่มขึ้นจาก 10% เป็น 20% ทั้งนี้เนื่องจากทรีฮาโลสไม่ใช่น้ำตาลรีดิวซ์และทนความร้อนสูง (Karseno et al, 2017) จึงไม่ส่งเสริมการเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด ส่วนซูคราโลสไม่ทำปฏิกิริยาเมลลาร์ดโดยตรง (Hellwig, 2024) ขณะที่ FOS สามารถสลายตัวภายใต้ความร้อนให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ได้แก่ น้ำตาลฟรุกโตสที่เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้ (Guo et al., 2023) ส่งผลให้ตัวอย่างที่ใช้ FOS และซูคราโลสมีสีน้ำตาลที่เข้มกว่าตัวอย่างควบคุม เมื่อพิจารณา ค่า HMF พบว่าปริมาณที่พบไม่สอดคล้องกับค่า BI โดยสูตรที่ใช้ FOS ที่ระดับการทดแทน 20% แม้มีค่า BI ที่สูง

ที่สุด (33.64 ± 12.52) แต่กลับให้ค่า HMF ต่ำที่สุด (111.23 ± 6.56 mg/kg) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ค่า BI เป็นการวัดความเข้มของสารสีน้ำตาลเมลานอยดินที่ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ (420 นาโนเมตร) (Bolshakova et al, 2024) ขณะที่ HMF เป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการให้ความร้อนและเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเมลลาร์ด ที่วัดด้วยค่าการดูดกลืนแสงในย่าน UV (284 และ 336 นาโนเมตร) (Kamboj et al., 2024) อีกทั้ง HMF สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องและเปลี่ยนเป็นสารประกอบสีน้ำตาลโมเลกุลสูง เช่น เมลานอยดิน ในระยะท้ายของปฏิกิริยาได้ และเมื่อพิจารณาจากค่า L^* ($25.43 - 27.06$) ร่วมกับค่า ΔE แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมอยู่ในระดับที่ผู้บริโภครับรู้ได้ยาก โดยทั่วไปค่า ΔE น้อยกว่า 2 เป็นช่วงที่ผู้บริโภคทั่วไปสังเกตความแตกต่างของสีได้ยาก ส่งผลให้ลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ยังคงใกล้เคียงสูตรควบคุม (ภาพที่ 2) โดยเฉพาะสูตรใช้สารทดแทนความหวานที่ 10% ดังนั้น การใช้สารทดแทนความหวานที่ระดับการทดแทน 10% สามารถรักษาคุณภาพด้านสีและคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีใกล้เคียงกับสูตรควบคุม และนำไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส เพื่อยืนยันการยอมรับของผู้บริโภคต่อไป

ผลของชนิดและระดับการทดแทนน้ำตาลของสารทดแทนความหวานต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสเพื่อประเมินความชอบของผู้ทดสอบต่อตัวอย่างผลิตภัณฑ์น้ำปลาหวานสูตรควบคุม และสูตรที่ใช้สารทดแทนความหวานที่ระดับการทดแทน 10% (ตารางที่ 4) พบว่าสูตรที่ใช้ชูคราโลส ได้รับคะแนนความชอบด้านสี 6.83 ± 1.53 รสชาติ 6.23 ± 1.68 และความชอบโดยรวม 6.43 ± 1.68 สูงกว่าตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างสารทดแทนความหวานชนิดอื่นๆ แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในขณะที่สูตรทรีฮาโลส ได้รับคะแนนความชอบด้านสีและความชอบโดยรวมที่ 6.60 ± 1.73 และ 6.17 ± 1.84 ตามลำดับ สูตรที่ใช้ FOS ได้รับคะแนนความชอบด้านกลิ่นรส และรสชาติ ต่ำกว่าสูตรอื่น และส่งผลให้ความชอบโดยรวมลดลงเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม โดยภาพรวมการใช้สารทดแทนความหวานมีแนวโน้มทำให้คะแนนด้านกลิ่นรส รสชาติ และความชื้นหนืดลดลงเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกคุณลักษณะ ($p > 0.05$) จึงอาจสรุปได้ว่าการใช้ชูคราโลสในที่ระดับการทดแทน 10% มีแนวโน้มได้รับการยอมรับจากผู้ทดสอบที่ดีกว่าสูตรควบคุม

สรุป

จากการศึกษาผลของชนิดและระดับการทดแทนน้ำตาลของสารทดแทนความหวานต่อคุณลักษณะทางกายภาพ เคมี สี และประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์น้ำปลาหวาน พบว่า ชนิดและระดับการทดแทนน้ำตาลของสารทดแทนความหวานมีผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยค่า TSS ความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้สารทดแทนความหวาน ขณะที่ค่า a_w และ pH ยังคงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับสูตรควบคุม ในด้านสี พบว่าการใช้ชูคราโลสและทรีฮาโลสที่ระดับการทดแทน 10% สามารถชะลอการเกิดสีน้ำตาลได้ดีที่สุด โดยมีค่า BI และค่า ΔE ใกล้เคียงสูตรควบคุม ต่างจากการใช้ FOS ที่ส่งผลให้สีน้ำตาลเข้มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการประเมินทางประสาทสัมผัส พบว่าสูตรที่ใช้ชูคราโลสระดับการทดแทน 10% มีแนวโน้มได้รับคะแนนความชอบในด้านสีและรสชาติมากกว่าสูตรที่ใช้สารทดแทนชนิดอื่น อีก



ทั้งให้ผลใกล้เคียงสูตรควบคุม อย่างไรก็ตาม ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม ($p > 0.05$) จึงสรุปได้ว่าการใช้สูตรโลสที่ระดับการทดแทน 10% เป็นสูตรที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์น้ำปลาหวานสูตรใช้สารทดแทนความหวาน อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอายุการเก็บรักษาและความปลอดภัยทางจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์



เอกสารอ้างอิง

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. 2561. น้ำปลาลาหวาน [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 30 มีนาคม 2569. เข้าถึงได้จาก :

[https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0114_61\(น้ำปลาลาหวาน\).pdf](https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0114_61(น้ำปลาลาหวาน).pdf)

มนัญญา คำวชิระพิทักษ์, กาญจนา เสือโพธิ์ไทย และอารีรัตน์ ทับกลาง. (2560). การผลิตและพัฒนาสูตรของน้ำปลา

หวาน. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยสวนดุสิต (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี), 10(1), 1-12.

Bolshakova, E. I., Kruchinin, A. G., Turovskaya, S. N., Illarionova, E. E., Yurova, E. A., Barkovskaya, I.

A., & Galstyan, A. G. (2024). Effects provided by sugar substitutes upon the quality indicators of model systems of sweetened condensed milk in storage. *J Dairy Sci*, 107(11), 9110-9123. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25160>

El Hosry, L., Elias, V., Chamoun, V., Halawi, M., Cayot, P., Nehme, A., & Bou-Maroun, E. (2025).

Maillard Reaction: Mechanism, Influencing Parameters, Advantages, Disadvantages, and Food Industrial Applications: A Review. *Foods*, 14(11), 1881.

Guo, Y., Li, H., Zhao, X., Zhang, Y., Pang, X., Xie, N., Wang, Y., Yu, J., Lv, J., & Zhang, S. (2023).

Changes in Maillard reaction products, volatile substances and active proteins of goat milk under different heat treatments. *International Dairy Journal*, 146.

<https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105714>

Hellwig, M. (2024). Formation of Chlorinated Carbohydrate Degradation Products and Amino Acids

during Heating of Sucralose in Model Systems and Food. *J Agric Food Chem*, 72(47), 26441-26450. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c08059>

Kamboj, R., Sandhu, R. S., & Nanda, V. (2024). Effect of heating and pH on hydroxymethylfurfural

content, diastase and invertase activity of Dalbergia honey using response surface methodology. *Food Chemistry Advances*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100766>



ตารางที่ 1 ปริมาณน้ำตาลทรายและสารทดแทนความหวานที่ใช้ในผลิตภัณฑ์น้ำปลาหวาน

ชนิดและระดับการทดแทนของสาร	วัตถุดิบ			
	น้ำตาลทราย	น้ำตาลมะพร้าว	สารทดแทนความหวาน (%)	Maltodextrin (%)
- Control	28.0	28.0	-	-
- Trehalose10%	21.78	21.78	12.44	-
- FOS10%	18.67	18.67	18.67	-
- Sucralose10%	25.20	25.20	0.0039	5.5907
- Trehalose20%	15.56	15.56	24.89	-
- FOS 20%	9.335	9.355	37.33	-
- Sucralose20%	22.40	22.40	0.0187	11.1813

ตารางที่ 2 ผลของชนิดและระดับการทดแทนของสารทดแทนความหวานต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำปลาหวาน

ชนิดและระดับการทดแทนของสาร	คุณลักษณะทางเคมีและกายภาพ			
	a_w	TSS (°Brix)	Viscosity (cP)	pH
- Control	0.7591±0.00 ^a	72.37±1.35 ^b	309.70±28.02 ^b	6.00±0.16 ^{bc}
- Trehalose10%	0.7602±0.00 ^a	72.00±0.68 ^b	390.80±30.49 ^b	5.88±0.23 ^c
- FOS10%	0.7709±0.02 ^a	72.82±2.06 ^b	393.16±153.78 ^b	6.13±0.11 ^{ab}
- Sucralose10%	0.7719±0.01 ^a	72.80±2.54 ^b	449.50±85.15 ^b	5.81±0.13 ^c
- Trehalose20%	0.7412±0.02 ^b	74.28±2.89 ^{ab}	943.28±725.50 ^a	5.82±0.19 ^c
- FOS 20%	0.7594±0.05 ^a	76.90±2.43 ^a	1065.50±362.30 ^a	6.21±0.15 ^a
- Sucralose20%	0.7693±0.01 ^a	75.98±3.53 ^a	1142.00±158.78 ^a	5.98±0.10 ^{bc}

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวคอลัมน์ที่มีแบบอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ตารางที่ 3 ผลของชนิดและระดับการทดแทนของสารทดแทนความหวานต่อพารามิเตอร์ในด้านสีของผลิตภัณฑ์น้ำตาลหวาน

ชนิดและระดับ	คุณลักษณะทางเคมีและกายภาพ					
การทดแทน						
ของสารทดแทน	L*	a*	b*	ΔE	BI	HMF (mg/kg)
ความหวาน						
- Control	25.57±0.01 ^b	3.18±0.01 ^b	2.12±0.02 ^c	0.00 ^c	17.34±0.64 ^c	154.19±3.81 ^a
- Trehalose10%	25.81±0.01 ^b	3.37±0.02 ^b	2.54±0.00 ^{bc}	0.52±0.03 ^{bc}	19.49±0.97 ^{bc}	156.74±4.87 ^a
- FOS10%	26.32±0.01 ^b	4.71±0.03 ^b	3.32±0.02 ^b	2.08±0.00 ^b	25.96±5.21 ^b	123.65±0.85 ^b
- Sucralose10%	25.43±0.64 ^b	4.29±0.18 ^b	3.21±0.19 ^b	1.65±0.25 ^b	25.31±3.07 ^b	147.90±5.93 ^a
- Trehalose20%	25.96±0.01 ^b	3.58±0.01 ^b	2.78±0.01 ^{bc}	0.86±0.02 ^{bc}	20.96±0.90 ^{bc}	123.80±1.06 ^b
- FOS 20%	27.06±0.03 ^a	5.93±0.05 ^a	4.57±0.05 ^a	3.97±0.07 ^a	33.64±12.52 ^a	111.23±6.56 ^c
- Sucralose20%	25.92±0.00 ^b	3.67±0.03 ^b	2.62±0.02 ^{bc}	0.78±0.03 ^{bc}	20.55±0.98 ^{bc}	146.71±2.96 ^a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวคอลัมน์ที่มีแบบอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

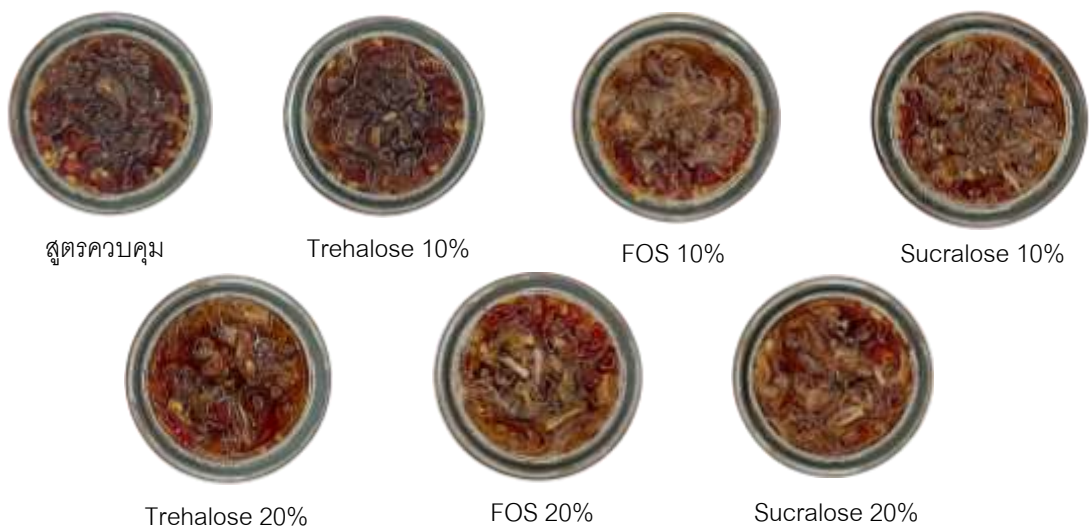
ตารางที่ 4 ผลของชนิดน้ำตาลและสารทดแทนความหวานต่อคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสของน้ำตาลหวาน โดยใช้วิธีทดสอบ 9-point Hedonic scale จำนวนผู้ทดสอบ 30 คน

ชนิดและระดับ	ลักษณะคุณภาพ				
การทดแทนของ					
สารทดแทนความหวาน	สี ^{ns}	กลิ่นรส ^{ns}	รสชาติ ^{ns}	ความข้นหนืด ^{ns}	ความชอบโดยรวม ^{ns}
- Control	6.73±1.72	6.43±1.65	6.00±1.88	6.30±1.70	6.13±1.91
- Trehalose10%	6.60±1.73	6.17±1.93	6.17±1.78	6.07±1.91	6.17±1.84
- FOS10%	6.60±1.73	5.97±2.11	5.83±2.00	6.07±1.86	5.90±1.60
- Sucralose10%	6.83±1.53	6.37±1.30	6.23±1.68	5.93±1.46	6.43±1.68

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแถวเดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ns แสดงถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



ภาพที่ 1 แผนภาพกระบวนการการผลิตผลิตภัณฑ์น้ำปลารสหวานสูตรควบคุมและสูตรที่ใช้สารทดแทนความหวาน ได้แก่ Trehalose, Sucralose และ FOS ที่ระดับการทดแทน 10 และ 20%



ภาพที่ 2 ลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์น้ำปลารสหวานสูตรควบคุม และสูตรที่ทดแทนด้วยสารทดแทนความหวาน ประกอบด้วย Trehalose, Sucralose และ FOS ที่ระดับการทดแทน 10 และ 20%

ผลของการใช้อินนูลินเป็นสารทดแทนไขมันต่อคุณภาพของเค้กกล้วยหอม

The Effect of Inulin as a Fat Replacer on the Quality of Banana Cakes

ธนันพัชร ห้วยหงษ์ทอง¹, พิมพชนก เกียรติสุพิมล¹, เยาวนุช บุญธรรม¹ และ สินี นองเต้าดำ¹

Tananpat Huaihongthong¹, Pimchanok Keitsupimol¹, Yaowanut Buntham¹ and Sinee Nongtaodum¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้อินนูลิน (Inulin) เป็นสารทดแทนไขมันในเค้กกล้วยหอมที่ระดับ 0, 25, 50, 75 และ 100% จากการศึกษาพบว่า เมื่อระดับการทดแทนเพิ่มขึ้น ค่าความสว่าง (L^*) ของเค้กกล้วยหอมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) มีค่าลดลง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.29-7.07 และ 18.23-19.43 ตามลำดับ ค่าความสูงของเค้กกล้วยหอมที่ทดแทนไขมันด้วยอินนูลินมีแนวโน้มลดลง ส่วนปริมาณความชื้นของเค้กกล้วยหอมที่ทดแทนไขมันด้วยอินนูลินมีค่าเพิ่มขึ้น (27.88–34.90%) ค่า Water activity (a_w) ของเค้กกล้วยหอมที่ทดแทนไขมันด้วยอินนูลินมีค่าอยู่ในช่วง 0.8884 ถึง 0.9033 นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณการทดแทนไขมันด้วยอินนูลินส่งผลให้เค้กกล้วยหอมมีความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การประเมินทางประสาทสัมผัสพบว่า ค่าคะแนนเฉลี่ยความชอบโดยรวมของเค้กกล้วยหอมที่ทดแทนไขมันด้วยอินนูลินที่ระดับ 25% มีค่าไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ($p > 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 6.56 (ชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง)

คำสำคัญ : อินนูลิน, สารทดแทนไขมัน, เค้กกล้วยหอม, คุณภาพ

Abstract

The objective of this research was to study the effect of inulin as a fat replacer on the quality of banana cakes at levels of 0, 25, 50, 75, and 100%. The results indicated that as the level of inulin replacement increased, the lightness (L^*) of the banana cakes significantly increased ($p \leq 0.05$). Conversely, the redness (a^*) and yellowness (b^*) values significantly decreased, ranging from 5.29-7.07 and 18.23–19.43, respectively. The height of the banana cakes with inulin replacement tended to decrease. Replacing fat with inulin led to an increase in the moisture content of the banana cakes, ranging from 27.88% to 34.90%. The water activity (a_w) of banana cakes with fat replaced by inulin ranged from 0.8884 to 0.9033. Furthermore, increasing the fat replacement with inulin led to a

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

¹Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.



significant increase in hardness ($p \leq 0.05$). Sensory evaluation revealed that the overall liking score for banana cakes with 25% inulin fat replacement was not significantly different from that of the control ($p > 0.05$), with a mean score of 6.56 (slight to moderate preference).

Keyword : Inulin, Fat replacer, Banana cakes, Quality

บทนำ

ในปัจจุบันเค้กกล้วยหอมจัดเป็นผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่ได้รับความนิยม และบริโภคกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งโดยส่วนประกอบหลักของเค้กกล้วยหอมคือ แป้ง ไขมัน ไข่ และกล้วยหอม โดยทั่วไปไขมันในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่จะมีหน้าที่ช่วยกักเก็บอากาศ และส่งผลให้มีปริมาตรของผลิตภัณฑ์เบเกอรี่เพิ่มขึ้น มีเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น (Fernandes *et al.*, 2017) แต่ทั้งนี้การบริโภคผลิตภัณฑ์อาหารที่มีปริมาณไขมันสูง จะส่งผลเสียต่อสุขภาพ และนำไปสู่การเกิดโรคเรื้อรังต่างๆ ได้ เช่น โรคอ้วน โรคเบาหวาน ระดับคอเลสเตอรอลสูง ความดันโลหิตสูง และโรคหัวใจ เป็นต้น ทางเลือกเพื่อลดปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารคือการใช้สารทดแทนไขมัน (Milićević *et al.*, 2020)

อินนูลินเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์จัดเป็นเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ โมเลกุลของอินนูลินจะประกอบไปด้วยโมเลกุลของน้ำตาลฟรุกโตสมาต่อกันเป็นโพลีเมอร์แต่มีโมเลกุลปลายสุดที่เป็นน้ำตาลกลูโคสและยังเป็นพรีไบโอติกซึ่งเป็นอาหารของแบคทีเรียด้วย ในช่วงที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่ได้มีการใช้อินนูลินเป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารหลากหลายชนิด เช่น ลูกชิ้น ไส้กรอก มاکาโรน ไอศกรีม คุกกี้ บิสกิต และมัฟฟิน (Rodríguez-García *et al.*, 2013; Giarnetti *et al.*, 2015; Tiwari *et al.*, 2015; Alaei *et al.*, 2018; Ren *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2022; Montoya *et al.*, 2022) เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของการใช้อินนูลินเป็นสารทดแทนไขมันต่อคุณภาพของเค้กกล้วยหอมโดยศึกษาระดับต่างๆ (0, 25, 50, 75 และ 100%) เพื่อให้เป็นทางเลือกสำหรับผู้รักสุขภาพที่นิยมรับประทานผลิตภัณฑ์เค้กกล้วยหอม

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของการใช้อินนูลินเป็นสารทดแทนไขมันที่ระดับต่างๆ (0, 25, 50, 75 และ 100%) ต่อคุณภาพของเค้กกล้วยหอม

อุปกรณ์และวิธีการ

1. วัตถุดิบ ได้แก่ แป้งสาลี (ตราพัดโบก) เบคกิ้งโซดา (ตราเบสท์ฟู้ดส์) ผงฟู (ตราเบสท์ฟู้ดส์) น้ำตาลทรายขาว (ตรามิตรผล) เกลือป่น (ตราปฐพี) น้ำมันรำข้าว (ตราคิง) กล้วยหอมทองสุก กลิ่นกล้วย (ตราวินเนอร์) ไข่ไก่สดเบอร์ 2 (ตราเคซีเอฟ) กรดซิตริก (เกรดอาหาร; บริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด) อินนูลิน (บริษัท Beneo) และ มاکาโรน (ตราโอพี)



2. ขั้นตอนการผลิต

2.1 นำส่วนผสมแห้ง ได้แก่ แป้งสาลี เบคกิ้งโซดา ผงฟู และอินนูลิน ร่อนเข้าด้วยกันและพักไว้

2.2 นำกล้วยหอมทองสุกมาปอกเปลือกแล้วหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ และบดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมสารละลายกรดซิตริกลงไป (อัตราส่วนของน้ำ:กรดซิตริก เท่ากับ 1:1)

2.3 นำไข่ไก่สด น้ำตาลทรายขาว และเกลือป่น ใส่ลงในหม้อผสม Kitchenaid โดยใช้หัวผสมชนิด ตะกร้อ เปิดเครื่องตีด้วยความเร็วระดับ 6 ใช้เวลา 8 นาที จะขึ้นฟูเป็นสีเหลืองนวลอ่อนๆ ปรับความเร็วระดับ 2 เติมส่วนผสมแห้ง (ข้อ 2.1) ที่ร่อนแล้วลงไปหม้อผสม ตีให้เข้ากันใช้เวลา 1 นาที โดยสูตรที่มีการทดแทนไขมันจะ เติมอินนูลินและน้ำในขั้นตอนนี้ โดยอัตราส่วนที่เติมคือ อินนูลิน:น้ำ (5:5:4.5)

2.4 เติมน้ำมันรำข้าว แล้วปรับความเร็วระดับ 4 ใช้เวลา 2 นาที ปรับความเร็วระดับ 2 เติมกล้วยหอมทองที่เตรียมไว้ (ข้อ 2.2) ใส่ลงไป ใช้เวลา 1 นาที และเติมน้ำมันกล้วยลงไป ปั่นต่ออีก 30 วินาที

2.5 นำแบทเทอร์ (Batter) ที่ได้ปริมาณ 150 กรัม เทใส่ลงพิมพ์ขนาด 7x11.5x5 เซนติเมตร ที่ได้ทำการ ารินไว้แล้ว และนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลาแล้ว นำเค้กกล้วย หอมออกมาพักบนตะแกรงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานาน 30 นาที แล้วนำมาบรรจุในถุง (Polyethylene) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการวิเคราะห์คุณภาพ

3. การวิเคราะห์คุณภาพ

3.1 วัดความสูงของเค้กกล้วยหอม โดยวัดจากบริเวณกึ่งกลางของก้อนเค้กกล้วยหอมด้วยเวอร์เนียร์ ดิจิตอล

3.2 วัดค่าสีเนื้อ (Crumb) ของเค้กกล้วยหอม (L^* , a^* , b^*) ด้วยเครื่องวัดสี Colour-view spectrophotometer (BYK Gardner Model 9000) และความแตกต่างของสี (ΔE^*) (Baixauli et al., 2008) ดัง สมการ;

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

3.3 วัดค่าเนื้อสัมผัสของเค้กกล้วยหอม Texture Profile Analysis (TPA) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส Texture Analyzer TAXT2i โดยหัววัดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร (P/25) โดยนำ เค้กกล้วยหอมมาตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาด 4x4x2 เซนติเมตร กำหนดค่า Pre-test Speed 3 mm/s, Test Speed 10 mm/s, Post-test Speed 10.0 mm/s และ Trigger-Force (50% Strain) บันทึกค่า Hardness, Springiness, Cohesiveness, Gumminess และ Chewiness ดัดแปลงจาก Gómez et al. (2007)

3.4 วัดค่า Water activity (a_w) ของเค้กกล้วยหอม ด้วยเครื่อง Water activity meter (Aqualab รุ่น Series 4TE) โดยบดตัวอย่างเค้กกล้วยหอมให้ละเอียดก่อนทำการวัด

3.5 วัดปริมาณความชื้นของเค้กกล้วยหอมตามวิธี AOAC (2000)

3.6 ประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส ด้วยแบบทดสอบ 9-point hedonic scale โดยช่วง คะแนน 1=ไม่ชอบมากที่สุด ถึง 9=ชอบมากที่สุด คุณลักษณะที่ทดสอบได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยผู้บริโภคนจำนวน 110 คน

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS V.10 (Statistics Package for Social Sciences)

ผลและวิจารณ์

1. ผลของการใช้สารทดแทนไขมันต่อค่าสี L^* a^* b^* และ ΔE^* ของเค้กกล้วยหอม

จากตารางที่ 1 และภาพที่ 1 พบว่า เมื่อใช้อินนูลินทดแทนไขมันในเค้กกล้วยหอม ส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) ของเนื้อเค้กกล้วยหอมมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากตัวอย่างควบคุม (0%) โดยค่าความสว่าง (L^*) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของการใช้อินนูลินเป็นสารทดแทนไขมันที่มากขึ้นในเค้กกล้วยหอม ทั้งนี้เนื่องจากว่าอินนูลินเมื่อรวมตัวกับน้ำจะเกิดเป็นเจลสีขาว และเมื่อเพิ่มระดับการทดแทนไขมันด้วยอินนูลินที่เพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) ของเนื้อเค้กกล้วยหอมมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับค่าสี a^* จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเป็นสีแดงในทางบวก และสีเขียวในทางลบ โดยเค้กกล้วยหอมที่ใช้อินนูลินทดแทนไขมันจะมีค่าอยู่ในช่วง 5.69-7.07 และ ค่าสี b^* จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเป็นสีเหลืองในทางบวก และสีน้ำเงินในทางลบ เค้กกล้วยหอมที่ใช้อินนูลินทดแทนไขมันจะมีค่าอยู่ในช่วง 18.23-19.43 โดยค่าสี a^* และค่าสี b^* มีค่าลดลงจากตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้ใช้อินนูลินเป็นสารทดแทนไขมัน ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 7.42 และ 20.13 ตามลำดับ ค่า ΔE^* (ค่าความแตกต่างของสี) ของเค้กกล้วยหอมที่ใช้อินนูลินทดแทนไขมันจะมีค่าอยู่ในช่วง 2.25-7.56 โดยค่า ΔE^* มากกว่า 3 มนุษย์สามารถแยกแยะความแตกต่างของสีได้เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (0%) และเค้กกล้วยหอมที่ใช้อินนูลินทดแทนไขมันที่ระดับ 25% จะมีค่า ΔE^* ที่น้อยกว่า 3 แสดงว่ามนุษย์ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างของสีเนื้อเค้กกล้วยหอมได้เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (0%) (Baixauli et al., 2008)

2. ผลของการใช้สารทดแทนไขมันต่อค่าความสูง ค่า Water activity (a_w) และปริมาณความชื้นของเค้กกล้วยหอม

จากตารางที่ 2 พบว่า ค่าความสูงของเค้กกล้วยหอมมีแนวโน้มลดลงเมื่อทดแทนไขมันด้วยอินนูลินในปริมาณที่มากขึ้น โดยเค้กกล้วยหอมที่ทดแทนไขมันด้วยอินนูลินมีค่าความสูงลดลงจากตัวอย่างควบคุม (0%) อยู่ในช่วง 0.43-2.33 มิลลิเมตร และเมื่อทดแทนไขมันด้วยอินนูลินในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นของเค้กกล้วยหอมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยปริมาณความชื้นของเค้กกล้วยหอมที่ใช้อินนูลินทดแทนไขมันมีค่าอยู่ในช่วง 27.86-34.90% ส่วนค่า Water activity (a_w) ของเค้กกล้วยหอมที่ใช้อินนูลินทดแทนไขมันจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.8821-0.9033

3. ผลของการใช้สารทดแทนไขมันต่อค่าเนื้อสัมผัสของเค้กกล้วยหอม

จากตารางที่ 3 พบว่า ค่าความแข็ง (Hardness) คือค่าแรงที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นระหว่างการเคี้ยวครั้งแรก โดยเค้กกล้วยหอมที่ใช้อินนูลินทดแทนไขมันจะมีค่าความแข็งสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อทดแทนไขมันด้วยอินนูลินในระดับ 100% จะทำให้ค่าความแข็งมีค่าสูงที่สุด (1,019.89 กรัม) ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าเค้กกล้วยหอมที่ไม่มีส่วนผสมของไขมันทำให้อนุภาคของกลูเตนและแป้งเกาะตัวกันแน่น ดังนั้นจึงส่งผลให้เค้กกล้วยหอมมีเนื้อสัมผัสที่แข็งขึ้น (Rodríguez-García et al, 2013) ค่า Springiness คือค่าการคืนตัวหลังจาก

ที่มีการสูญเสียรูปครั้งแรก โดยเค็กกล้วยหอมที่ใช้อินนูลินทดแทนไขมันจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.948-0.967 ค่า Cohesiveness คือค่าพลังที่ยึดเกาะกันภายในชิ้นอาหาร เค็กกล้วยหอมที่ใช้อินนูลินทดแทนไขมันมีค่าอยู่ในช่วง 0.653-0.787 ค่า Gumminess คือค่าพลังงานที่แยกออกจากกันจนสามารถกลืนลงไปได้ เค็กกล้วยหอมที่ใช้อินนูลินทดแทนไขมันจะมีค่าอยู่ในช่วง 420.78-663.93 กรัม และค่า Chewiness คือค่าพลังงานที่ใช้ในการเคี้ยว เค็กกล้วยหอมที่ใช้อินนูลินทดแทนไขมันมีค่าอยู่ในช่วง 441.49-628.70 กรัม

4. ผลของการใช้สารทดแทนไขมันต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของเค็กกล้วยหอม

จากตารางที่ 4 พบว่า คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของเค็กกล้วยหอมมีคะแนนเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้อินนูลินเป็นสารทดแทนไขมันในเค็กกล้วยหอม จะส่งผลให้คะแนนเฉลี่ยของคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส (ลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม) ของเค็กกล้วยหอมมีแนวโน้มลดลงจากตัวอย่างควบคุม (0%) แต่เมื่อใช้อินนูลินเป็นสารทดแทนไขมันที่ระดับ 25% เค็กกล้วยหอมมีคะแนนเฉลี่ยของคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ($p > 0.05$) โดยเค็กกล้วยหอมที่ใช้อินนูลินเป็นสารทดแทนไขมันที่ระดับ 25% คะแนนเฉลี่ยคะแนนความชอบโดยรวมเท่ากับ 6.56 (ชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง)

สรุป

การใช้อินนูลินทดแทนไขมันในเค็กกล้วยหอมส่งผลให้ค่าความสูงของเค็กกล้วยหอมมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าความสว่าง (L^*) ปริมาณความชื้น และค่าความแข็ง (Hardness) มีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้อินนูลินทดแทนไขมันในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเค็กกล้วยหอมที่ทดแทนไขมันด้วยอินนูลินที่ระดับ 25% มีค่าคะแนนความชอบโดยรวมเฉลี่ยไม่แตกต่างกับตัวอย่างควบคุม (0%) ดังนั้นเค็กกล้วยหอมที่ทดแทนไขมันด้วยอินนูลินที่ระดับ 25% จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับเป็นผลิตภัณฑ์เค็กกล้วยหอมเพื่อสุขภาพ เนื่องจากเป็นเค็กกล้วยหอมที่ลดพลังงาน พร้อมทั้งเพิ่มปริมาณใยอาหารจากอินนูลิน และทั้งนี้ยังคงคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสไม่แตกต่างกับเค็กกล้วยหอมที่ไม่มีการทดแทนไขมัน

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้



เอกสารอ้างอิง

- AOAC. (1990). Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Communities International (15th ed.). Washington, DC: AOAC.
- Alaei, F., Hojjatoleslami, M., & Hashemi Dehkordi, S.M. (2018). The effect of inulin as a fat substitute on the physicochemical and sensory properties of chicken sausages. *Food Science & Nutrition*, 6(2), 512-519.
- Baixauli, R., Salvador, A., & Fiszman, S.M. (2008). Textural and colour changes during storage and sensory shelf life of muffins containing resistant starch. *European Food Research and Technology*, 226(3), 523-530.
- Fernandes, S.S., & Salas-Mellado, M.M. (2017). Addition of chia seed mucilage for reduction of fat content in bread and cakes. *Food Chemistry*, 227, 237-244.
- Giarnetti, M., Paradiso, V.M., Caponio, F., Summo, C., & Pasqualone, A. (2015). Fat replacement in shortbread cookies using an emulsion filled gel based on inulin and extra virgin olive oil. *LWT-Food Science and Technology*, 63(1), 339-345.
- Gómez, M., Ronda, F., Caballero, P.A., Blanco, C.A., & Rosell, C.M. (2007). Functionality of different hydrocolloids on the quality and shelf-life of yellow layer cakes. *Food Hydrocolloids*, 21(2), 167-173.
- Li, J., Cui, H., Xu, X., Li, J., Lu, M., Guan, X., Zhu, D., & Liu, H. (2022). Effect of fat replacement by inulin on the physicochemical properties and sensory attributes of low-fat margarine. *Food Hydrocolloids*, 133, Article 107868.
- Milićević, N., Sakač, M., Hadnađev, M., Skrobot, D., Sarić, B., Dapčević-Hadnađev, T., Jovanov, P., & Pezo, L. (2020). Physico-chemical properties of low-fat cookies containing wheat and oat bran gels as fat replacers. *Journal of Cereal Science*, 95, Article 103056.
- Montoya, L., Quintero, N., Ortiz, S., Lopera, J., Millán, P., & Rodríguez-Stouvenel, A. (2022). Inulin as a fat-reduction ingredient in pork and chicken meatballs: Its effects on physicochemical characteristics and consumer perceptions. *Foods*, 11(8), 1066.
- Ren, Y., Song, K.Y., & Kim, Y. (2020). Physicochemical and retrogradation properties of low-fat muffins



with inulin and hydroxypropyl methylcellulose as fat replacers. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(11), 14816.

Rodríguez-García, J., Laguna, L., Puig, A., Salvador, A., & Hernando, I. (2013). Effect of fat replacement

by inulin on textural and structural properties of short dough biscuits. *Food and Bioprocess Technology*, 6(10), 2739–2750.

Tiwari, A., Sharma, H.K., Kumar, N., & Kaur, M. (2015). The effect of inulin as a fat replacer on the quality

of low-fat ice cream. *International Journal of Dairy Technology*, 68(3), 374-380.

ตารางที่ 1 ค่าสีเนื้อ L^* a^* b^* และ ΔE^* ของเค้กกล้วยหอม

ตัวอย่าง	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
0% (ควบคุม)	56.45±0.96 ^d	7.42±1.70 ^a	20.13±0.40 ^a	
25%	58.56±1.11 ^c	7.07±0.20 ^b	19.43±0.89 ^{ab}	2.25
50%	59.11±0.61 ^c	6.40±0.15 ^c	18.80±0.81 ^{bc}	3.14
75%	61.70±1.78 ^b	6.00±0.29 ^d	18.39±1.43 ^{bc}	5.71
100%	63.56±1.43 ^a	5.69±0.16 ^e	18.23±0.77 ^c	7.56

หมายเหตุ: ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 2 ค่าความสูง Water activity (a_w) และปริมาณความชื้นของเค้กกล้วยหอม

ตัวอย่าง	ความสูง (mm)	Water activity (a_w)	ปริมาณความชื้น (%)
0% (ควบคุม)	66.87±1.53 ^a	0.8821±0.0047 ^c	25.55±0.72 ^d
25%	65.19±0.20 ^b	0.8884±0.0042 ^b	27.86±0.18 ^{cd}
50%	64.54±0.22 ^b	0.8999±0.0020 ^a	31.27±0.49 ^{bc}
75%	64.57±0.19 ^b	0.8999±0.0050 ^a	34.43±1.38 ^{ab}
100%	66.44±0.83 ^a	0.9033±0.0031 ^a	34.90±0.81 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 3 ค่าเนื้อสัมผัสของเค้กกล้วยหอม

ตัวอย่าง	Hardness (g)	Springiness	Cohesiveness	Gumminess (g)	Chewiness (g)
0% (ควบคุม)	519.68±62.43 ^d	0.968±0.004 ^a	0.811±0.025 ^a	410.56±32.18 ^d	397.60±31.45 ^d
25%	535.40±90.07 ^d	0.967±0.003 ^a	0.787±0.013 ^b	420.78±65.95 ^d	441.49±63.54 ^d
50%	706.84±105.55 ^c	0.965±0.005 ^a	0.750±0.019 ^c	497.37±52.84 ^c	479.89±50.73 ^c
75%	819.27±68.88 ^b	0.951±0.006 ^b	0.692±0.014 ^d	566.96±44.28 ^b	539.06±42.90 ^b
100%	1019.89±11.41 ^a	0.948±0.010 ^b	0.653±0.021 ^e	663.93±26.39 ^a	628.70±23.24 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05)

ตารางที่ 4 คะแนนเฉลี่ยของการประเมินทางประสาทสัมผัสของเค้กกล้วยหอม (N=110 คน)

ตัวอย่าง	ลักษณะ					ความชอบโดยรวม
	ปรากฏ	สี	กลิ่นรส	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	
0% (ควบคุม)	7.24±1.50 ^a	7.20±1.42 ^{ab}	5.67±2.00 ^{ab}	5.72±1.85 ^a	6.16±1.80 ^a	6.21±1.88 ^{ab}
25%	7.21±1.41 ^a	7.23±1.44 ^a	6.17±1.91 ^a	6.05±1.96 ^a	6.33±1.68 ^a	6.56±1.68 ^a
50%	6.73±1.53 ^b	6.80±1.40 ^b	5.87±1.77 ^a	5.80±1.78 ^a	5.86±2.01 ^b	5.96±1.78 ^b
75%	6.29±1.54 ^c	6.30±1.54 ^c	5.87±1.75 ^a	5.52±1.86 ^a	5.30±1.92 ^b	5.76±1.61 ^b
100%	5.84±1.97 ^d	6.03±1.79 ^c	5.25±1.96 ^b	4.87±2.16 ^b	4.30±2.37 ^c	5.00±2.09 ^c

หมายเหตุ: ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05)



ภาพที่ 1 เค้กกล้วยหอมที่ใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมันที่ระดับ 0, 25, 50, 75 และ 100%



การจัดการสินค้าคงคลังหลายรายการภายใต้ความไม่แน่นอนของอุปสงค์

Multi-Item Inventory Management under Stochastic Demand

นิชาภา โปราณานนท์¹, กวินธร สัยเจริญ² และ ธรรมวิทย์ ประเสริฐ³

Nichapa Porananon¹, Kawinthon Saicharoen² and Thammawit Prasert³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนานโยบายการกำหนดจุดสั่งซื้อใหม่ (Reorder Point, ROP) และสินค้าคงคลังสำรอง (Safety Stock, SS) สำหรับวัตถุดิบหลายรายการภายใต้ระบบการผลิตแบบตามคำสั่งซื้อ (Make-to-Order, MTO) ของบริษัทกรณีศึกษาที่ประกอบธุรกิจจำหน่ายสินค้าประเภทเครื่องประตุนิรภัย ซึ่งประสบปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบจากการกำหนดระดับสินค้าคงคลังสำรองโดยไม่คำนึงถึงความไม่แน่นอนของอุปสงค์และระยะเวลานำส่ง ส่งผลให้เกิดการหยุดชะงักของกระบวนการผลิต การส่งมอบสินค้าไม่เป็นไปตามกำหนด และเกิดค่าปรับจากการส่งสินค้าล่าช้า งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้การกำหนดจุดสั่งซื้อและสินค้าคงคลังสำรองที่คำนึงถึงความไม่แน่นอนของทั้งอุปสงค์และระยะเวลานำส่งพร้อมกัน และบูรณาการแนวคิดการสั่งซื้อร่วมกัน (Joint Replenishment Problem, JRP) เพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมจากผู้จำหน่ายรายเดียวกัน โดยวิเคราะห์การแจกแจงทางสถิติของอุปสงค์ด้วยวิธี Anderson–Darling Test และทดสอบประสิทธิภาพของนโยบายด้วยข้อมูลอุปสงค์จริงในปีพ.ศ. 2567 ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่านโยบายที่นำเสนอสามารถลดปริมาณวัตถุดิบขาดแคลนได้ร้อยละ 89.77 จาก 55,812 ชิ้น เหลือ 5,711 ชิ้น ลดต้นทุนการสั่งซื้อร้อยละ 49.11 ลดต้นทุนการขาดแคลนร้อยละ 63.06 และลดต้นทุนรวมร้อยละ 2.33 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่านโยบายที่พัฒนาขึ้นสามารถลดการหยุดชะงักของกระบวนการผลิตและเพิ่มความสามารถในการตอบสนองคำสั่งซื้อของระบบการผลิตแบบตามคำสั่งซื้อได้อย่างมีประสิทธิภาพ

¹ 20/47 หมู่ 1 ท่าตำหนัก นครชัยศรี นครปฐม 73120 ประเทศไทย

20/47 Moo. 1 Tha Tamnak, Nakhon Chai Si, Nakhon Pathom 73120, Thailand.

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom

73000, Thailand.

³ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom

73000, Thailand.



คำสำคัญ : การจัดการสินค้าคงคลัง, วัตถุดิบ, จุดสั่งซื้อใหม่, ปริมาณสินค้าคงคลังสำรอง, การสั่งซื้อร่วมกัน, การผลิตแบบตามคำสั่งซื้อ

Abstract

This study presents the development of a reorder point (ROP) and safety stock (SS) policy for multi-item raw material in a make-to-order (MTO) manufacturing system based on a case company in the personal care products industry. The shortages occur from reorder points and safety stock set without accounting for demand and lead time uncertainty, resulting in production disruptions, delayed deliveries, and penalty costs. The proposed approach determines reorder point and safety stock levels by simultaneously considering uncertainty in both demand and lead time and integrates the joint replenishment problem (JRP) to identify appropriate order quantities for raw materials sourced from the same supplier. The statistical distribution of demand is analysed using the Anderson–Darling test and the proposed policy is evaluated using actual demand data from 2024. The results demonstrate that the proposed policy reduces raw material shortages by 89.77%, from 55,812 units to 5,711 units. In addition, ordering costs and shortage costs decrease by 49.11% and 63.06%, respectively, leading to an overall reduction of 2.33% in total inventory cost. These findings indicate that the proposed inventory policy effectively mitigates production disruptions and enhances the responsiveness of make-to-order production systems under demand and lead time uncertainty.

Keyword : Inventory Management, Raw Material, Reorder Point, Safety Stock, Joint Replenishment, Make to Order

บทนำ

การบริหารสินค้าคงคลัง (Inventory Management) ถือเป็นกระบวนการสำคัญในระบบการจัดการโซ่อุปทาน (Supply Chain Management) ที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการผลิต ต้นทุนรวมขององค์กร และความสามารถในการตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า สินค้าคงคลังเป็นทรัพยากรที่มีมูลค่าสูงและมีบทบาทสำคัญในการเชื่อมโยงระหว่างกระบวนการจัดซื้อ การผลิต และการจัดจำหน่าย อย่างไรก็ตาม การเก็บสินค้าคงคลังมากเกินไปอาจส่งผลให้เกิดต้นทุนการจัดเก็บสูงขึ้น แต่ในขณะที่การมีสินค้าคงคลังน้อยเกินไปอาจส่งผลให้เกิดการขาดแคลนวัตถุดิบ (Stockout) ซึ่งส่งผลกระทบต่อการผลิตและความพึงพอใจของลูกค้าโดยตรง ดังนั้น การหาจุดสมดุลระหว่างต้นทุนและระดับการให้บริการ เพื่อให้เกิดการขาดแคลนน้อยที่สุดจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการดำเนินธุรกิจอย่างยั่งยืน (Munyaka & Yadavalli, 2021)

ในสภาวะการแข่งขันของอุตสาหกรรม องค์กรต้องรับมือกับความผันผวนของพฤติกรรมผู้บริโภคที่คาดการณ์ได้ยาก และปัจจัยภายนอกหลากหลาย ระบบการผลิตแบบตามคำสั่งซื้อ (Make-to-Order, MTO) ซึ่งเริ่มกระบวนการผลิตเมื่อได้รับคำสั่งซื้อ จึงเป็นแนวทางที่ช่วยลดความเสี่ยงจากการผลิตเกินความต้องการ



อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวเผชิญกับความไม่แน่นอนของอุปสงค์ ส่งผลให้การบริหารสินค้าคงคลังวัตถุดิบซับซ้อนยิ่งขึ้น เนื่องจากต้องสำรองวัตถุดิบให้พร้อมใช้งานเพื่อรองรับคำสั่งซื้อที่ไม่สามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้ อีกทั้งการจัดหาวัตถุดิบจากผู้ขายหลายรายที่มีระยะเวลานำส่ง และราคาต่างกัน ยิ่งเพิ่มความซับซ้อนในการตัดสินใจเชิงนโยบาย นอกจากนี้อุปสงค์ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแบบสุ่มยังส่งผลโดยตรงต่อความต้องการใช้วัตถุดิบ ทำให้การจัดการสินค้าคงคลังวัตถุดิบหลายรายการภายใต้ระบบการผลิตตามคำสั่งซื้อนั้นต้องบริหารอย่างรอบคอบ

งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่มุ่งเน้นการแก้ปัญหาสินค้าคงคลังในมิติใดมิติหนึ่ง เช่น การกำหนดสินค้าคงคลังสำรอง (Safety Stock, SS) ภายใต้ความไม่แน่นอนของอุปสงค์เพียงอย่างเดียว (Kabeel & Eltaweel, 2024) หรือการประยุกต์ใช้การสั่งซื้อร่วม (Joint Replenishment Problem, JRP) เพื่อลดต้นทุนการสั่งซื้อโดยไม่คำนึงถึงความแปรปรวนของระยะเวลานำส่ง (Bastos et al., 2016) อย่างไรก็ตาม ในสภาพแวดล้อมการผลิตจริงที่มีทั้งอุปสงค์และระยะเวลานำส่งแปรปรวนพร้อมกัน การใช้แบบจำลองแบบมิติเดียวอาจนำไปสู่การกำหนดจุดสั่งซื้อ (Reorder Point, ROP) และการกำหนดสินค้าคงคลังสำรอง (Safety Stock, SS) ที่ต่ำกว่าความเป็นจริง ซึ่งยังคงเป็นช่องว่างที่งานวิจัยเชิงปฏิบัติในบริบทของระบบการผลิตตามคำสั่งซื้อยังไม่ได้ได้รับการศึกษาอย่างครบถ้วน

ปัจจุบันบริษัทรถยนต์ศึกษาที่ประกอบธุรกิจผลิตภัณฑ์ประเภทอุปโภค จำหน่ายสินค้าประเภทเครื่องประตันทันผิว โดยมีผลิตภัณฑ์หลากหลายประเภท เช่น แป้งฝุ่นโรยตัว ยาสระผม ครีมหาผิว เบบี้ออยล์ สบู่เหลวอาบน้ำและสระผม ซึ่งเดิมทีระบบการบริหารสินค้าคงคลังวัตถุดิบของบริษัทมีการกำหนดปริมาณวัตถุดิบคงคลังสำรอง (Minimum Stock, MS) ตามหลักเกณฑ์ที่ใช้มานาน ไม่ได้ปรับเปลี่ยนไปตามปริมาณความต้องการที่เพิ่มขึ้นของลูกค้า ก่อให้เกิดสินค้าขาดส่ง (Stockout) จากการไม่มีวัตถุดิบใช้ในการผลิต ซึ่งส่งผลให้เกิดการหยุดชะงักของกระบวนการผลิตและลดความสามารถในการส่งมอบสินค้าได้ตามกำหนด การส่งมอบสินค้าล่าช้านี้ส่งผลให้บริษัทต้องเผชิญกับค่าปรับ 10% ของราคาสินค้าที่ขาดส่ง ซึ่งเป็นต้นทุนส่วนเกินที่ไม่จำเป็นและอาจส่งผลกระทบต่อกำไรของบริษัทในระยะยาว โดยในปีพ.ศ. 2567 มีวัตถุดิบขาดแคลนทั้งหมด 22 ชนิด จำนวน 42,298 ชิ้น ส่งผลให้เกิดค่าปรับจากการขาดส่งสินค้า 57,485.58 บาท

งานวิจัยนี้พัฒนาต่อยอดจากกรอบแนวคิดที่นำเสนอไว้ในงานวิจัยก่อนหน้าของผู้วิจัย ซึ่งอยู่ระหว่างการตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ ทั้งนี้ งานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้แบบจำลองดังกล่าวกับกรณีศึกษาจริงในบริบทของอุตสาหกรรมไทย เพื่อพัฒนาแนวทางการกำหนดจุดสั่งซื้อ (Reorder Point, ROP) และสินค้าคงคลังสำรอง (Safety Stock, SS) ที่เหมาะสมสำหรับวัตถุดิบแต่ละรายการโดยคำนึงถึงความไม่แน่นอนของอุปสงค์และระยะเวลานำส่งพร้อมกัน และบูรณาการแนวคิดการสั่งซื้อร่วมกัน (Joint Replenishment Problem, JRP) เพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อวัตถุดิบหลายรายการจากผู้จำหน่ายรายเดียวกัน และทดสอบผลเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของนโยบายที่พัฒนาขึ้นกับนโยบายเดิมของบริษัทด้วยข้อมูลอุปสงค์ในปีพ.ศ. 2567 พร้อมวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) เพื่อประเมินความเสถียรของผลลัพธ์ภายใต้ความผันผวนของพารามิเตอร์สำคัญ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนานโยบายการกำหนดจุดสั่งซื้อ (Reorder Point, ROP) และสินค้าคงคลังสำรอง (Safety Stock, SS) ที่เหมาะสมสำหรับวัตถุดิบหลายรายการ โดยคำนึงถึงความไม่แน่นอนของอุปสงค์และระยะเวลานำส่ง และบูรณาการแนวคิดการสั่งซื้อร่วม (Joint Replenishment Problem, JRP) เพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อวัตถุดิบ
2. เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของนโยบายที่พัฒนาขึ้นกับนโยบายเดิมของบริษัท ซึ่งจำลองโดยใช้ข้อมูลอุปสงค์ในปีพ.ศ. 2567 และวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) เพื่อประเมินความเสี่ยงของผลลัพธ์ภายใต้ความผันผวนของอุปสงค์และระยะเวลานำส่ง

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลจริงของวัตถุดิบจำนวน 22 ชนิด ที่สั่งซื้อจากผู้จำหน่าย 11 ราย ประกอบด้วยข้อมูลอุปสงค์รายวัน ราคาวัตถุดิบ ต้นทุนการสั่งซื้อ ต้นทุนการเก็บรักษา ต้นทุนการขาดแคลน และระยะเวลานำส่งตลอดปีพ.ศ. 2567 โดยข้อมูลอุปสงค์ของวัตถุดิบมาจากการพัฒนาโครงสร้างรายการวัสดุ (Bill of Material, BOM) เริ่มต้นจากการนำข้อมูลความต้องการผลิตภัณฑ์ในปีพ.ศ. 2567 และโครงสร้างผลิตภัณฑ์มาแยกองค์ประกอบเป็นรายการวัตถุดิบ เพื่อระบุประเภท ปริมาณ และชิ้นส่วนที่ใช้ร่วมกันในหลายผลิตภัณฑ์ (Common Part) นอกจากนี้ยังต้องมีการระบุข้อมูลผู้จำหน่ายสำหรับวัตถุดิบแต่ละชนิด เพื่อจัดกลุ่มรายการที่ซื้อจากแหล่งเดียวกันให้สามารถนำมาบริหารจัดการด้วยนโยบายการสั่งซื้อ ร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งโครงสร้างรายการวัสดุนี้ถือเป็นฐานข้อมูลสำคัญในการเปลี่ยนความต้องการจากระดับผลิตภัณฑ์ไปสู่ระดับวัตถุดิบเพื่อการวางแผนสินค้าคงคลังที่แม่นยำ

การทดสอบการแจกแจงของอุปสงค์

การทดสอบการแจกแจงของอุปสงค์ใช้วิธี Anderson-Darling Goodness-of-Fit Test เปรียบเทียบการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) และการแจกแจงแบบลอการิทึมปกติ (Lognormal distribution) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการทดสอบพบว่าอุปสงค์รายวันของวัตถุดิบทั้ง 22 รายการมีการแจกแจงแบบ Lognormal สำหรับการคำนวณสินค้าคงคลังและจุดสั่งซื้อใหม่ และใช้อุปสงค์รวมในช่วงระยะเวลานำส่ง (Demand During Lead Time, DLT) ซึ่งประมาณด้วยการแจกแจงแบบปกติตามทฤษฎีบทขีดจำกัดกลาง (Central Limit Theorem, CLT) เนื่องจากค่าเฉลี่ยระยะเวลานำส่งของผู้จำหน่ายทุกรายอยู่ระหว่าง 8-16 วัน ซึ่งเพียงพอสำหรับการประมาณค่าอุปสงค์รวมในช่วงระยะเวลานำส่งด้วยการแจกแจงแบบปกติ

การกำหนดจุดสั่งซื้อ (Reorder Point, ROP) และสินค้าคงคลังสำรอง (Safety Stock, SS)

ในการหาจุดสั่งซื้อ (ROP) และสินค้าคงคลังสำรอง (SS) ของวัตถุดิบหลายรายการให้มีความเหมาะสมและเพียงพอต่อการผลิต งานวิจัยนี้กำหนดระดับบริการ (Type I Service Level) ที่ระดับ 95% ($z = 1.65$) หมายความว่าในแต่ละรอบการสั่งซื้อมีโอกาสไม่เกิดการขาดแคลนอย่างน้อย 95% โดยคำนวณจุดสั่งซื้อ (ROP) และสินค้าคงคลังสำรอง (SS) จากสมการที่ (1) และ (2) ซึ่งครอบคลุมความไม่แน่นอนของทั้งอุปสงค์และ

ระยะเวลานำส่งพร้อมกัน จากนั้นคำนวณมูลค่าในการสั่งซื้อที่ประหยัด (Economic Order Quantity, EOQ) แบบการสั่งซื้อร่วมกัน (Joint Replenishment, JRP) โดยมีดัชนีและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

ดัชนี

- i คือ รายการวัตถุดิบ ($i = 1, 2, \dots, n$)
 j คือ รายการผู้จำหน่าย ($j = 1, 2, \dots, m$)

พารามิเตอร์

- D_i คือ ความต้องการของวัตถุดิบ i ทั้งปี (ชิ้น)
 $\$Q_i$ คือ ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการสั่งซื้อวัตถุดิบ i (บาท/ครั้ง)
 c_i คือ ราคาวัตถุดิบ i (บาท/ชิ้น)
 SS_{ij} คือ สินค้าคงคลังสำรองของวัตถุดิบ i จากผู้จำหน่าย j (ชิ้น)
 z คือ ระดับการให้บริการ (Service Level)
 ROP_{ij} คือ จุดสั่งซื้อใหม่ของวัตถุดิบ i (ชิ้น)
 L คือ ระยะเวลานำส่ง (วัน)
 μ_{L_j} คือ ค่าเฉลี่ยระยะเวลานำส่งของผู้ขาย j (วัน)
 σ_{L_j} คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระยะเวลานำส่งของผู้ขาย j (วัน)
 μ_{D_i} คือ ค่าเฉลี่ยอุปสงค์ของวัตถุดิบ i (ชิ้น/วัน)
 σ_{D_i} คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอุปสงค์ของวัตถุดิบ i (ชิ้น/วัน)
 TC คือ ต้นทุนรวม (บาท)
 n คือ จำนวนครั้งในการสั่งซื้อ (ครั้ง)
 OC คือ ต้นทุนในการสั่งซื้อ (บาท/ครั้ง)
 I คือ อัตราดอกเบี้ย
 $\bar{I}_i$ คือ สินค้าคงคลังเฉลี่ยของวัตถุดิบ i (ชิ้น)
 HC_i คือ ต้นทุนการจัดเก็บวัตถุดิบ i (บาท/ชิ้น/ปี)
 o_i คือ จำนวนที่ขาดแคลนของวัตถุดิบ i (ชิ้น)
 p_i คือ ค่าปรับจากการขาดแคลนของวัตถุดิบ i (บาท/ชิ้น)

การคำนวณสินค้าคงคลังสำรอง (SS) และจุดสั่งซื้อ (ROP) โดยคำนึงถึงความไม่แน่นอนของอุปสงค์ และระยะเวลานำส่ง ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ จากนั้นหาปริมาณที่ต้องสั่งซื้อเมื่อถึงจุดสั่งซื้อ (ROP) โดยใช้แนวคิดการหามูลค่าในการสั่งซื้อที่ประหยัด (EOQ) แบบการสั่งซื้อร่วมกัน (JRP) ที่รวมรอบการสั่งซื้อของ วัตถุดิบหลายรายการจากผู้จำหน่ายรายเดียวกัน คำนวณดังสมการ (3)

$$SS_{ij} = z \times \sqrt{\mu_{L_j} \sigma_{D_i}^2 + \mu_{D_i}^2 \sigma_{L_j}^2} \quad (1)$$

$$ROP_{ij} = (\mu_{D_i} \mu_{L_j}) + SS_{ij} \quad (2)$$

$$Q_i = \frac{\$Q_i}{c_i} \quad (3)$$

ทดสอบนโยบายการกำหนดจุดสั่งซื้อ (ROP) และสินค้าคงคลังสำรอง (SS) ด้วยการจำลองสถานการณ์รายวันในปีพ.ศ. 2567 ตลอด 1 ปี ผ่านโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล (Microsoft Excel) และเปรียบเทียบผลกับนโยบายเดิมของบริษัท เพื่อประเมินประสิทธิภาพปริมาณวัตถุดิบที่ขาดแคลนและต้นทุนรวม (Total Cost) ผลรวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นในการดำเนินงาน ซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนการสั่งซื้อ (Ordering Cost) ต้นทุนการจัดเก็บ (Holding Cost) และต้นทุนการขาดแคลน (Shortage Cost) ดังสมการ (5)

$$TC = (n \times OC) + \sum_{i=1}^n (I_i \times HC_i) + \sum_{i=1}^n (O_i \times p_i) \quad (5)$$

ผลและวิจารณ์

การคำนวณสินค้าคงคลังสำรอง (SS) จุดสั่งซื้อ (ROP) และปริมาณที่ต้องสั่งซื้อ (Q) ดังสมการ (1)-(3) นำไปคำนวณกับวัตถุดิบทุกรายการ โดยยกตัวอย่างการคำนวณสินค้าคงคลังสำรอง (SS) และจุดสั่งซื้อ (ROP) ของวัตถุดิบ ฝาโลชั่น 320 มิลลิลิตร สั่งซื้อจากบริษัท แอ็คโกร จำกัด ที่มีค่าเฉลี่ยระยะเวลานำส่งของผู้จำหน่าย (μ_{L_1}) เท่ากับ 12 วัน ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุปสงค์ของวัตถุดิบ (σ_{D_1}) เท่ากับ 772.76 ชิ้นต่อวัน ค่าเฉลี่ยของอุปสงค์ของวัตถุดิบ (μ_{D_1}) เท่ากับ 877.12 ชิ้นต่อวัน ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระยะเวลานำส่งของผู้ขาย (σ_{L_1}) เท่ากับ 1.40 วัน และระดับการให้บริการ 95% ($z = 1.65$) จากนั้นหาปริมาณที่ต้องสั่งซื้อ (Q) โดยค่าใช้จ่ายที่ต้องสั่งซื้อต่อครั้ง เท่ากับ 6,874.94 บาทต่อครั้ง ต้นทุนสั่งซื้อเท่ากับ 67.6 บาทต่อครั้ง และราคาฝาโลชั่น 320 มิลลิลิตร เท่ากับ 5.25 บาท

$$\begin{aligned}
 \text{สินค้าคงคลังสำรอง} \quad SS_{11} &= 1.65 \times \sqrt{[(12(772.76)^2)] + [(877.12)^2(1.40)^2]} \\
 &= 4,859.47 \\
 &\approx 4,860 \quad \text{ชิ้น}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จุดสั่งซื้อ} \quad ROP_{11} &= (877.12 \times 12) + 4,860 \\
 &= 15,385.44 \\
 &\approx 15,386 \quad \text{ชิ้น}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณการสั่งซื้อ} \quad Q_1 &= \frac{6,874.94}{5.25} \\
 &= 1,309.51 \\
 &\approx 1,310 \quad \text{ชิ้น/ครั้ง}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณการสั่งซื้อฝาโลชั่นขนาด 320 มิลลิลิตรต่อครั้งเท่ากับ 1,310 ชิ้น โดยจะดำเนินการสั่งซื้อเมื่อระดับสินค้าคงคลังลดลงถึงจุดสั่งซื้อที่ 15,386 ชิ้น และกำหนดให้มีสินค้าคงคลังสำรองจำนวน 4,860 ชิ้น

ผลการคำนวณหาจุดสั่งซื้อ (ROP) และสินค้าคงคลังสำรอง (SS) ของวัตถุดิบทั้ง 22 รายการ และปริมาณที่ต้องสั่งซื้อจากผู้จำหน่ายทั้ง 11 ราย พบว่าวัตถุดิบที่มีค่าคลังสำรอง (SS) สูงสุดคือซิงค์ฟิล์มโรลออน 45 มิลลิลิตร ทั้งหมด 17,968 ชิ้น และสติ๊กเกอร์โรลออน 45 มิลลิลิตรทั้งหมด 17,767 ชิ้น เนื่องจากมีความผันผวนของอุปสงค์สูงและระยะเวลานำส่งนาน ดังแสดงผลวัตถุดิบที่คัดเลือกมาเป็นตัวอย่าง 8 รายการในตารางที่ 1



ตารางที่ 1 ผลการคำนวณหาจุดสั่งซื้อ (ROP) สินค้าคงคลังสำรอง (SS) และปริมาณการสั่งซื้อ (Q)

ลำดับ	ผู้จำหน่าย	วัตถุดิบ	SS (ชิ้น)	ROP (ชิ้น)	Q (ชิ้น)
1	บ.แอ็คโกร จก.	ฝาโลชั่น 320 มล.	4,872	15,397	1,310
2	บ.แอ็คโกร จก.	ขวดโลชั่น 320 มล.	11,968	26,544	622
3	บ.แอ็คโกร จก.	ขวดโรลออน 45 มล.	14,452	45,515	4,951
4	บ.เวเบอร์ จก.	สติ๊กเกอร์โรลออน 45 มล.	17,767	54,030	18,225
5	บ.ฮอนซอน จก.	ซิงค์ฟิล์มโรลออน 45 มล.	17,968	53,987	17,414
6	บ.พี เอส จก.	PVC หุ้มฝาหัวไม้	3,048	7,778	11,300
7	บ.ทรัพย์ จก.	PE ฟิล์มหด 20 เซ็นต์	172	411	217
8	บ.นิวเพรส จก.	ถาดโรลออน 45 มล.	2,539	9,441	5,397

เมื่อนำผลจากการคำนวณจุดสั่งซื้อ (ROP) สินค้าคงคลังสำรอง (SS) และปริมาณการสั่งซื้อ (Q) ไปทดสอบผลด้วยข้อมูลจริงในปีพ.ศ. 2567 ชี้ให้เห็นว่านโยบายใหม่สามารถจัดการปัญหาการขาดแคลนได้ 13 รายการจาก 14 รายการที่เคยมีปัญหาภายใต้นโยบายเดิม อย่างไรก็ตามมีเพียงฝาโลชั่น 320 มิลลิลิตร ที่ยังมีการขาดแคลน 5,711 ชิ้น เนื่องจากอุปสงค์มีลักษณะพุ่งสูงเป็นครั้งคราวในปริมาณมาก ซึ่งเป็นธรรมชาติของระบบการผลิตตามคำสั่งซื้อที่การประมาณด้วยการแจกแจงแบบปกติตามทฤษฎีบทขีดจำกัดกลาง (CLT) อาจประมาณค่าได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างนโยบายเดิมและนโยบายใหม่

ตัวชี้วัด	นโยบายเดิม (MS)	นโยบายใหม่ (ROP/SS)	ผลต่าง	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง
รายการวัตถุดิบที่เกิดการขาดแคลน (รายการ)	14	1	-13	-92.86%
ปริมาณวัตถุดิบขาดแคลน (ชิ้น)	55,812	5,711	-50,101	-89.77%
ต้นทุนการสั่งซื้อ (OC) (บาท)	37,856	19,266	-18,590	-49.11%
ต้นทุนการถือครอง (HC) (บาท)	54,173	75,597	+21,424	+39.55%
ต้นทุนการขาดแคลน (SC) (บาท)	8,195	3,027	-5,168	-63.06%
ต้นทุนรวม (บาท)	100,224	97,890	-2,334	-2.33%

จากตารางที่ 2 สาเหตุหลักที่นโยบายเดิมไม่สอดคล้องกับระดับความไม่แน่นอน เกิดจากระดับคงคลัง (Minimum Stock, MS) ของบริษัทถูกกำหนดตายตัวโดยไม่ปรับตามความผันผวนของอุปสงค์และระยะเวลานำส่งที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมจริง แม้ต้นทุนการถือครองจะเพิ่มขึ้น 39.55% เนื่องจากการเก็บวัตถุดิบสำรองที่สูงขึ้น แต่ต้นทุนรวมยังลดลง 2.33% เนื่องจากต้นทุนการสั่งซื้อที่มีการสั่งซื้อร่วมกันและต้นทุนการขาดแคลนลดลง



รูปที่ 1 กราฟการวิเคราะห์ความไว

จากรูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยระยะเวลานำส่ง (μ_L) มีความไวสูงสุดต่อปริมาณวัตถุดิบขาดคลน รองลงมาคือค่าเฉลี่ยอุปสงค์ (μ_D) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุปสงค์ (σ_D) ตามลำดับ โดยการลดลงของค่าเฉลี่ยระยะเวลานำส่งเพียง 20% ก่อให้เกิดปริมาณขาดคลนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็น 8,235 ชิ้น ในขณะที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุปสงค์มีความไวต่ำที่สุด ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าการรักษาระยะเวลานำส่งของผู้จำหน่ายให้สม่ำเสมอเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการควบคุมความเสี่ยงด้านการขาดคลนวัตถุดิบ บริษัทจึงควรให้ความสำคัญกับการบริหารความสัมพันธ์กับผู้จำหน่ายที่มีระยะเวลานำส่งสูง

สรุป

งานวิจัยนี้พัฒนานโยบายการกำหนดจุดสั่งซื้อใหม่ (Reorder Point, ROP) และสินค้าคงคลังสำรอง (Safety Stock, SS) สำหรับวัตถุดิบ 22 รายการจากผู้จำหน่าย 11 ราย ภายใต้ระบบการผลิตแบบตามคำสั่งซื้อ (Make-to-Order, MTO) โดยคำนวณระดับสินค้าคงคลังสำรองที่คำนึงถึงความไม่แน่นอนของทั้งอุปสงค์และระยะเวลานำส่งพร้อมกัน และบูรณาการแนวคิดการสั่งซื้อร่วมกัน (Joint Replenishment Problem, JRP) เพื่อหาปริมาณที่ต้องสั่งซื้อจากผู้จำหน่ายรายเดียวกัน ผลการทดสอบด้วยข้อมูลจริงย้อนหลังปีพ.ศ. 2567 พบว่านโยบายใหม่สามารถลดปริมาณสินค้าขาดคลนได้ร้อยละ 89.77 จาก 55,812 ชิ้นเหลือ 5,711 ชิ้น ลดต้นทุนการสั่งซื้อร้อยละ 49.11 และลดต้นทุนการขาดคลนร้อยละ 63.06 แม้ต้นทุนการถือครองจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 39.55 เนื่องจากปริมาณที่ต้องจัดเก็บสูงขึ้น แต่ต้นทุนรวมยังคงลดลงร้อยละ 2.33 ผลการวิเคราะห์ความไวแสดงให้เห็นว่าระยะเวลานำส่งเฉลี่ย (μ_L) มีผลกระทบต่อปริมาณสินค้าขาดคลนสูงสุด รองลงมาคืออุปสงค์เฉลี่ย (μ_D) และความผันผวนของอุปสงค์ (σ_D) ตามลำดับ ชี้ให้เห็นว่าการบริหารความสัมพันธ์กับผู้จำหน่ายเพื่อรักษาระยะเวลานำส่งให้สม่ำเสมอเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการรักษาประสิทธิภาพของนโยบายสินค้าคงคลังในระยะยาว



งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดด้านแบบจำลองและข้อมูลที่ควรพิจารณาในการนำไปประยุกต์ใช้จริง ได้แก่ การใช้ข้อมูลอุปสงค์ย้อนหลังเพียงปีพ.ศ. 2567 แม้จะครอบคลุมความผันผวนตามฤดูกาลภายในปี แต่ยังไม่สอดคล้องกับระดับความไม่แน่นอนในการอธิบายโครงสร้างความผันผวนข้ามปี ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดจุดสั่งซื้อและคงคลังสำรอง นอกจากนี้ แบบจำลองสมมติให้อุปสงค์และระยะเวลานำส่งเป็นตัวแปรสุ่มที่เป็นอิสระต่อกัน ซึ่งในสภาพแวดล้อมจริงอาจเกิดการพึ่งพาเชิงสถิติระหว่างตัวแปรทั้งสอง ส่งผลต่อความแปรปรวนของอุปสงค์รวมในช่วงระยะเวลานำส่งถูกประเมินต่ำกว่าความเป็นจริง อีกทั้งการประมาณอุปสงค์รวมในช่วงระยะเวลานำส่งด้วยการแจกแจงแบบปกติตามทฤษฎีบทขีดจำกัดกลาง อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนสำหรับวัตถุดิบที่มีลักษณะอุปสงค์พุ่งสูง ซึ่งสะท้อนจากการขาดแคลนที่ยังคงปรากฏอยู่แม้ใช้นโยบายใหม่



เอกสารอ้างอิง

- Porananon, N., Saicharoen, K., Prasert, T., & Huang, Q. (2026). Simulation-based analysis of a joint replenishment EOQ framework for multi-item raw material inventory under stochastic demand. Paper presented at the 13th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA 2026), Kyoto, Japan.
- Ai, X., et al. (2021). Optimizing multi-supplier multi-item joint replenishment. PLOS ONE, 16(2). <https://doi.org/e0247082>
- Akharif, A. (2023). The characteristics of demand rates in the inventory routing problem. Advances in Social Sciences Research Journal, 10(3), 123-134
- Bastos, M., Nunes, Melo, & Carneiro. (2016). A systematic literature review on the joint replenishment problem solutions. Production, 27(00). <https://doi.org/e20162229>
- Chopra, S., & Meindl, P. (2016). Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation (7th ed.).
- Golany, B., & Lev-Er, A. (1992). Comparative analysis of multi-item joint replenishment inventory models. International Journal of Production ResearchGate, 30(8), 1791–1801.
- Kabeel, A., & Eltaweel, M. (2024). Comparative analysis of safety stock determination approaches in manufacturing companies. International Journal of Production Research.
- Peeters, K., et al. (2020). Hybrid make-to-stock and make-to-order systems. International Journal of Production Research.
- Marchello Pamolango, A. D. D. (2025). Determination of Safety Stock and Reorder Point Using Spreadsheet Simulation for Inventory Control of Packaging Materials. Jurnal Sains, Teknologi dan Industri, 23 No. 1, 187-197.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2014). Applied Statistics and Probability for Engineers (6th ed.). Wiley.
- Munyaka, J. B., & Yadavalli, V. S. (2021). Inventory Management Concepts and Implementations: A Systematic Review. ResearchGate.
- Upadhyay, S., et al. (2023). Analyzing the Factors for Implementing Make-to-Order Manufacturing System. Sustainability (MDPI).



การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสนับสนุนการตรวจเฝ้าระวังสถานประกอบการผลิตและนำเข้าเครื่องมือแพทย์

Development of web application to support inspection of manufacturing and importing establishments of medical devices

รติพันธ์ เรืองhirun¹

Ratipan Ruanghirun¹

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสนับสนุนการตรวจเฝ้าระวังสถานประกอบการผลิตและนำเข้าเครื่องมือแพทย์ และประเมินผลผู้ใช้งาน เป็นการวิจัยเชิงพัฒนาโดยดำเนินการผ่านแพลตฟอร์ม Google Applications ได้แก่ Google Sheets และ Google Apps Script ร่วมกับการเขียนภาษา HTML กลุ่มตัวอย่างคือเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานด้านการตรวจเฝ้าระวัง จำนวน 10 ราย เก็บข้อมูลโดยการทดลองใช้งานระบบและแบบสอบถาม วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนาด้วยค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า การใช้เว็บแอปพลิเคชัน ช่วยลดระยะเวลาในการสืบค้นข้อมูลลดลงจากค่าเฉลี่ย 110.83 วินาที เหลือ 55.41 วินาที (ลดลงร้อยละ 50) ด้านการประเมินความพึงพอใจภายหลังการทดสอบการใช้งานแอปพลิเคชัน พบว่าผู้ใช้มีความพึงพอใจโดยรวมทุกด้าน อยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.71 ± 0.46) โดยเฉพาะด้านการใช้งานและภาพลักษณ์การแสดงผล อยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.80 ± 0.41) การใช้งานที่ง่ายและสอดคล้องกับการปฏิบัติงานจริง สรุปได้ว่า เว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นสามารถลดระยะเวลาในการทำงาน และได้รับการยอมรับจากผู้ใช้งานในระดับสูง จึงมีศักยภาพในการนำไปใช้ได้ในงานตรวจเฝ้าระวังสถานประกอบการของหน่วยงานสาธารณสุข

คำสำคัญ : เว็บแอปพลิเคชัน, การตรวจเฝ้าระวัง, เครื่องมือแพทย์

Abstract

This research aimed to develop a web application to support the surveillance of medical device manufacturing and importing establishments and to evaluate user performance. This developmental research was implemented using the Google Workspace platform, specifically Google Sheets and Google Apps Script, in conjunction with HTML. The sample consisted of 10 officers responsible for medical device surveillance. Data were collected through system testing with

¹ กลุ่มงานเภสัชกรรมและคุ้มครองผู้บริโภค โรงพยาบาลท่าแซะ 2 หมู่ 2 ตำบลทรัพย์อนันต์ อำเภوتاแซะ ชุมพร 86140

Department of Pharmacy and Consumer Protection, Tha Sae Hospital, 2 Moo 2, Sap Anan Subdistrict, Tha Sae District, Chumphon 86140, Thailand



standardized tasks and satisfaction questionnaires, then analyzed using descriptive statistics, including mean and standard deviation. The results revealed that using the web application significantly reduced data retrieval and preparation time from an average of 110.83 seconds to 55.41 seconds (a 50.00% reduction). Regarding the post-test evaluation, overall user satisfaction was at the highest level ($\bar{x} = 4.71$, S.D. = 0.46). Specifically, the dimension of usability and interface design received the highest rating ($\bar{x} = 4.80$, S.D. = 0.41), highlighting its ease of use and alignment with actual work processes. In conclusion, the developed web application effectively reduces workload duration and has gained high user acceptance, demonstrating strong potential for implementation in medical device surveillance within public health agencies.

Keywords: web application, surveillance inspection, medical device, Google Apps Script

บทนำ

เครื่องมือแพทย์เป็นผลิตภัณฑ์ด้านสุขภาพที่มีความสำคัญต่อการวินิจฉัย การรักษา และการฟื้นฟูสมรรถภาพของผู้ป่วย โดยเกี่ยวข้องโดยตรงกับความปลอดภัยของผู้บริโภค ประเทศไทยจึงกำหนดให้การผลิตและการนำเข้าเครื่องมือแพทย์อยู่ภายใต้การกำกับดูแลตามพระราชบัญญัติเครื่องมือแพทย์ พ.ศ. 2551 และที่แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2562 กำหนดให้ผู้ประกอบการต้องจดทะเบียนสถานประกอบการและขึ้นทะเบียนผลิตภัณฑ์ก่อนดำเนินการกิจการ รวมถึงต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดด้านกฎหมายอย่างเคร่งครัด (สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา, 2551; 2562) ภายหลังการจำหน่ายสู่ตลาด การเฝ้าระวังและกำกับดูแลเครื่องมือแพทย์มีบทบาทสำคัญในการสร้างความมั่นใจว่าผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและปลอดภัย โดยอยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา มีภารกิจหลัก ได้แก่ การตรวจเฝ้าระวังและป้องกันการฝ่าฝืนกฎหมาย การรับเรื่องร้องเรียน และการติดตามเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ด้านความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, ม.ป.ป.)

อย่างไรก็ตาม การดำเนินงานในปัจจุบันยังพบปัญหาการจัดการข้อมูลที่กระจัดกระจาย ขาดการเชื่อมโยงอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้การเตรียมข้อมูล การคัดกรองและจัดลำดับสถานประกอบการ รวมถึงการวางแผนการออกตรวจใช้เวลาและเกิดความซ้ำซ้อน อีกทั้งยังขาดระบบรายงานผลที่เป็นปัจจุบัน นำไปสู่การตรวจซ้ำหรือการตรวจไม่ครอบคลุม โดยเฉพาะเมื่อมีสถานประกอบการจำนวนมากถึง 5,305 แห่ง เมื่อเทียบกับจำนวนบุคลากรที่จำกัด (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2568) ในระดับสากล องค์การอนามัยโลกได้ให้ความสำคัญกับการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาใช้ในการพัฒนาระบบสุขภาพ ผ่านยุทธศาสตร์ Global Strategy on Digital Health 2020 – 2027 เน้นการใช้เทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดความซ้ำซ้อน และสนับสนุนการตัดสินใจบนฐานข้อมูลเชิงประจักษ์ (World Health Organization, 2020) สอดคล้องกับนโยบายของกระทรวงสาธารณสุขที่ผลักดันการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในระบบสุขภาพ เพื่อยกระดับการให้บริการ ภายใต้แผนสุขภาพดิจิทัล พ.ศ. 2564-2568 (กระทรวงสาธารณสุข, 2564)



จากปัญหาและแนวทางดังกล่าว ผู้วิจัยจึงพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อสนับสนุนการตรวจเฝ้าระวังสถานประกอบการด้านเครื่องมือแพทย์ โดยใช้ Google Applications ที่เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้รวบรวม จัดเก็บ และบริหารจัดการข้อมูลได้อย่างเป็นระบบ ช่วยค้นหาข้อมูลได้รวดเร็ว และสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ทุกที่ทุกเวลา การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันดังกล่าวเป็นแนวทางที่ช่วยเพิ่มศักยภาพด้านประสิทธิภาพและประสิทธิผลของกระบวนการทำงาน การตรวจเฝ้าระวังเครื่องมือแพทย์ ช่วยลดภาระงานของเจ้าหน้าที่ เพิ่มความรวดเร็วและความถูกต้องในการปฏิบัติงาน และยกระดับระบบการกำกับดูแลให้มีความทันสมัยและยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสนับสนุนการทำงานด้านการตรวจเฝ้าระวังสถานประกอบการผลิตและนำเข้าเครื่องมือแพทย์
2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเว็บแอปพลิเคชันฯ โดยพิจารณาจากระยะเวลาในการเตรียมและค้นหาข้อมูลที่ใช้ในการตรวจเฝ้าระวังที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทำงานแบบเดิมกับการใช้งานเว็บแอปพลิเคชันฯ
3. เพื่อประเมินความพึงพอใจของบุคลากรเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานด้านการตรวจเฝ้าระวังต่อการใช้เว็บแอปพลิเคชันในการทำงานตรวจเฝ้าระวังสถานประกอบการผลิตและนำเข้าเครื่องมือแพทย์ที่พัฒนาขึ้น

สมมติฐานของการศึกษา

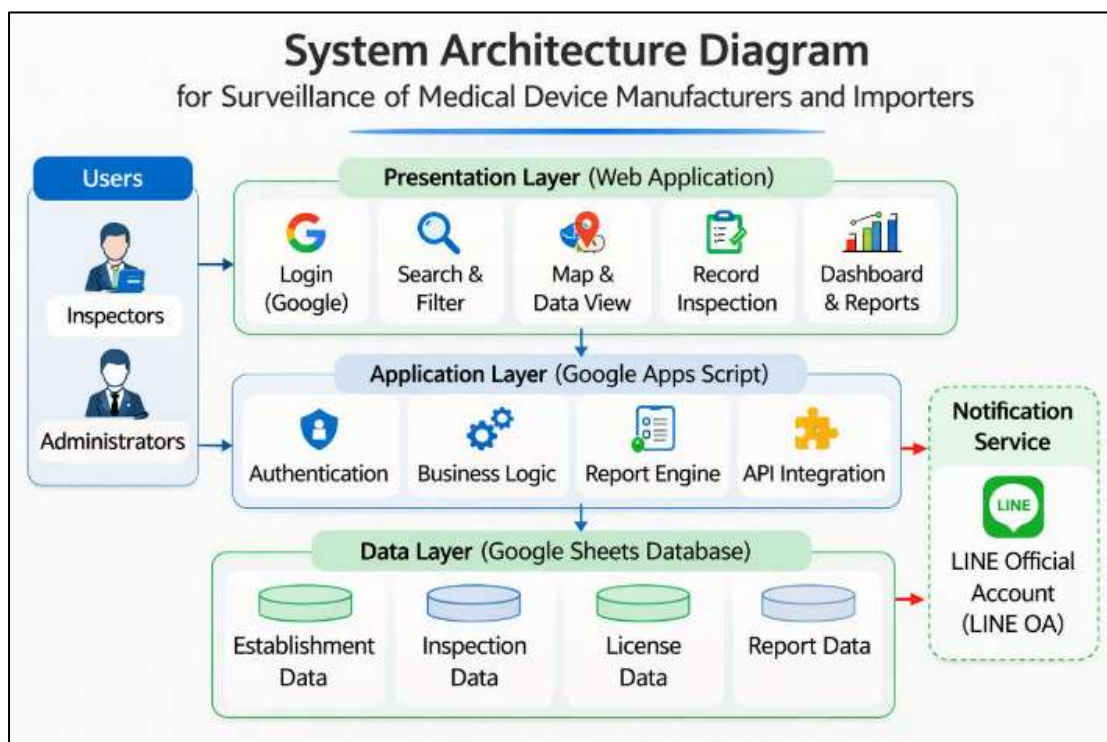
การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสนับสนุนการตรวจเฝ้าระวังสถานประกอบการผลิตและนำเข้าเครื่องมือแพทย์ ให้ที่สามารถสืบค้นได้เป็นระบบ

อุปกรณ์และวิธีการ

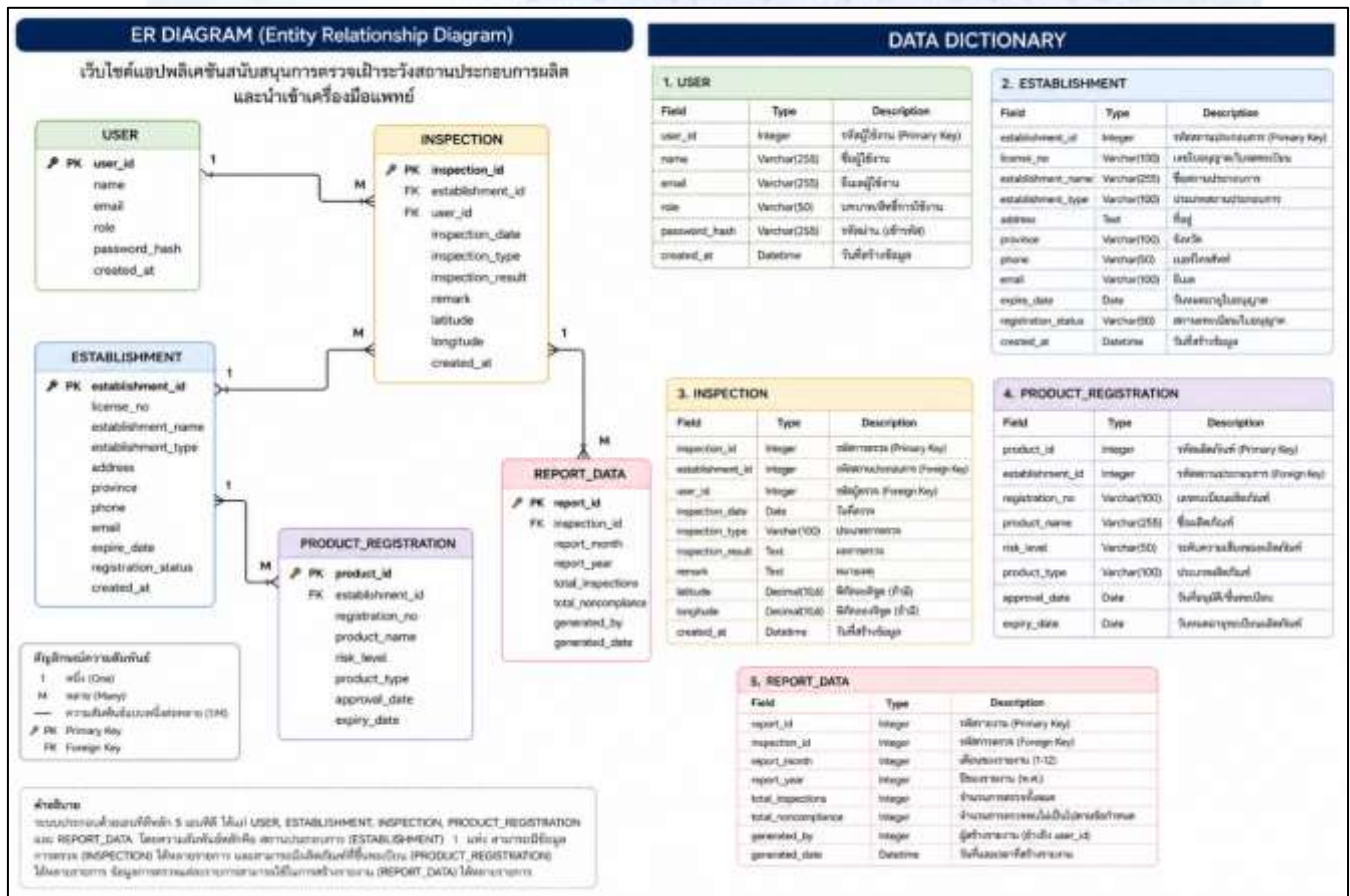
การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงพัฒนา (Developmental Research) งานวิจัยได้ผ่านการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์จากมหาวิทยาลัยศิลปากร (เลขที่ COE 68.0318-029) ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 5 ส่วน ดังต่อไปนี้

1. การศึกษาปัญหาและการวิเคราะห์ระบบงานเดิม ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาระบบงานเดิมโดยการรวบรวมข้อมูลจากหลายแหล่ง ได้แก่ การสัมภาษณ์บุคลากรผู้ปฏิบัติงานด้านการตรวจเฝ้าระวังสถานประกอบการ การศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้อง เช่น ไฟล์ข้อมูลในรูปแบบ Microsoft Excel และแบบบันทึกผลการตรวจ เพื่อทำความเข้าใจขั้นตอนการดำเนินงาน ปัญหา และข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในการปฏิบัติงานจริง นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งาน (User Requirements) และความสัมพันธ์ของข้อมูลภายในระบบ พร้อมทั้งจัดทำแบบจำลองกระบวนการทำงานโดยใช้แผนภาพการไหลของข้อมูล (Data Flow Diagram: DFD) เพื่อแสดงโครงสร้างและการเชื่อมโยงของข้อมูลในระบบเดิม ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นแนวทางสำคัญในการออกแบบและพัฒนาระบบเว็บแอปพลิเคชันต่อไป
2. การออกแบบและพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันดำเนินการบนแพลตฟอร์ม Google Apps Script โดยใช้ Google Sheets เป็นฐานข้อมูล สำหรับจัดเก็บข้อมูลสถานประกอบการและข้อมูลผลการตรวจเฝ้าระวัง ร่วมกับการใช้ภาษา Google Apps Script สำหรับการประมวลผลฝั่งเซิร์ฟเวอร์

และใช้ภาษา HTML และ JavaScript สำหรับออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (User Interface: UI) เพื่อให้ระบบสามารถใช้งานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้อย่างสะดวก ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยฟังก์ชันหลัก ได้แก่ การแสดงข้อมูลภาพรวมในรูปแบบ Dashboard เพื่อสนับสนุนการติดตามผลการดำเนินงาน, ค้นหาข้อมูลสถานประกอบการตามเงื่อนไขต่าง ๆ, แสดงพิกัดสถานประกอบการในรูปแบบแผนที่, คัดกรองและสุ่มเลือกสถานประกอบการสำหรับตรวจ, การแสดงข้อมูลสถานประกอบการในรูปแบบตาราง, บันทึกผลการตรวจผ่านระบบออนไลน์ และแจ้งเตือนรายงานผลผ่าน Line Official Account แบบอัตโนมัติรายเดือน



ภาพที่ 1 แผนผังการออกแบบโปรแกรมระบบสนับสนุน
การตรวจเฝ้าระวังสถานประกอบการผลิตและนำเข้าเครื่องมือแพทย์



ภาพที่ 2 ภาพแสดง ER diagram และ Data dictionary

3. การประเมินประสิทธิภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ หลังการพัฒนาเว็บแอป ผู้วิจัยได้ประเมินประสิทธิภาพของระบบ โดยผู้เชี่ยวชาญด้านสารสนเทศทางสุขภาพ จำนวน 3 ท่าน เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมในด้านประสิทธิภาพการทำงานของระบบให้เป็นไปตามข้อกำหนด โดยครอบคลุมประเด็นด้านความสมบูรณ์ของระบบ (Completeness) เช่น การลงชื่อเข้าใช้งาน การค้นหาข้อมูล การแสดงผลแผนที่พิกัด และการบันทึกผลการตรวจประเมิน ด้านความน่าเชื่อถือและความถูกต้อง และระบบแจ้งเตือนผ่าน LINE OA กำหนดเกณฑ์การประเมินเป็น “ผ่าน/ไม่ผ่าน” โดยระบบจะต้องผ่านการทดสอบในทุกฟังก์ชัน หากพบข้อบกพร่อง ผู้วิจัยจะดำเนินการปรับปรุงแก้ไขก่อนนำไปใช้ในขั้นตอนถัดไป

ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญพบข้อบกพร่องด้านการดึงข้อมูลที่ใช้เวลานานและขาดการแสดงผลสถานะขณะประมวลผล ผู้วิจัยจึงดำเนินการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของสคริปต์เพื่อลดระยะเวลาการเข้าถึงฐานข้อมูล พร้อมทั้งเพิ่มแถบสถานะการค้นหา (Loading Status) เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบขั้นตอนการทำงานปัจจุบัน ส่งผลให้เว็บแอปพลิเคชันมีความเสถียร และแสดงผลข้อมูลได้อย่างถูกต้องตามเงื่อนไขก่อนนำไปใช้งานจริง

4. การประเมินประสิทธิภาพด้านระยะเวลาในการปฏิบัติงาน การประเมินในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการเตรียมข้อมูลระหว่างวิธีเดิม (Excel) และวิธีใหม่ (เว็บแอปพลิเคชัน) จะถูก

นำไปทดลองใช้โดยเจ้าหน้าที่กลุ่มงานกำกับดูแลหลังออกสู่ตลาดของควบคุมเครื่องมือแพทย์ จำนวน 10 ท่าน โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) คือวิธีการเตรียมข้อมูล (วิธีเดิมด้วย Excel และวิธีใหม่ด้วยเว็บแอปพลิเคชัน) ตัวแปรตาม (Dependent Variable) คือระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน (วินาที) และตัวแปรควบคุม (Control Variables) คือบุคลากรผู้ทดสอบ (ใช้คนเดียวกันในแต่ละคำถาม), ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบที่มีความยากสมมูลกัน, สภาพแวดล้อมและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์เดียวกัน และการเว้นระยะเวลาก่อนการทดลอง (Washout Period)

เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วย เว็บแอปพลิเคชัน ซึ่งผ่านการประเมินประสิทธิภาพเรียบร้อยแล้วก่อนนำมาทดสอบจริง และเครื่องมือที่ใช้เปรียบเทียบคือระบบเดิมที่ใช้ปฏิบัติงานในปัจจุบัน (ฐานข้อมูลในรูปแบบไฟล์ Excel) โดยมีภารกิจทดสอบ (Standardized Tasks) ชุดภารกิจปฏิบัติงานจริงจำนวน 10 คำถาม ผู้วิจัยคัดเลือกข้อมูลสถานการณ์ประกอบการย้อนหลังที่เคยมีการตรวจสอบเสร็จสิ้นแล้วมาจัดทำโจทย์ 10 ข้อ แบ่งความยากเป็น 3 ระดับ ดังนี้ ระดับง่าย (3 ภารกิจ) เช่น การสืบค้นข้อมูลรายบริษัท (ชื่อผู้ดำเนินการ, เบอร์โทรศัพท์, วันหมดอายุใบอนุญาต) ระดับกลาง (4 ภารกิจ) เช่น การคัดกรองข้อมูลเชิงพื้นที่และประเภทสถานประกอบการ (คัดรายชื่อบริษัทในอำเภอ/จังหวัดที่กำหนด, คัดแยกประเภทผู้ผลิต/ผู้นำเข้า) และระดับยาก (3 ภารกิจ) เช่น การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงรุกและพิกัด (สุ่มรายชื่อบริษัทที่ไม่เคยตรวจในรอบ 5 ปี, การระบุพิกัดตำแหน่งบนแผนที่)

ผู้วิจัยดำเนินการเก็บข้อมูลโดยใช้กระบวนการเปรียบเทียบแบบกลุ่มสัมพันธ์ (Paired Design) มีขั้นตอนดังนี้

- ระยะเตรียมการ ผู้วิจัยเตรียมฐานข้อมูลชุดเดียวกันทั้งในระบบ Excel และเว็บแอปพลิเคชัน
- การทดสอบวิธีเดิม (Pre-test) ให้กลุ่มตัวอย่างปฏิบัติงาน 10 ภารกิจ ด้วยระบบ Excel ผู้วิจัยทำการบันทึกระยะเวลาตั้งแต่เจ้าหน้าที่เริ่มอ่านคำถามจนถึงวินาทีที่ได้คำตอบที่ถูกต้อง
- ระยะพัก (Washout Period) เว้นระยะเวลาก่อนการทดสอบ 3 วัน เพื่อลดผลกระทบจากการเรียนรู้หรือการจดจำข้อมูลโจทย์เดิม (Learning Effect)
- การทดสอบวิธีใหม่ (Post-test) ให้กลุ่มตัวอย่าง คนเดิม ปฏิบัติงานในภารกิจเดิม (สลับรายชื่อสถานประกอบการที่มีความยากสมมูลกัน) ด้วย เว็บแอปพลิเคชัน และทำการบันทึกเวลาในลักษณะเดียวกัน

ในด้านการวิเคราะห์ผลจะใช้สถิติเชิงพรรณนาคำนวณค่าเฉลี่ยระยะเวลา เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเว็บแอปพลิเคชันในการสนับสนุนการเตรียมข้อมูลสำหรับการตรวจเฝ้าระวังสถานประกอบการเครื่องมือแพทย์

5. การประเมินความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ การประเมินความพึงพอใจมี 2 ส่วน คือ ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม 3 ข้อ และความพึงพอใจต่อการใช้งาน 14 ข้อ ที่ได้ผ่านการตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (IOC) โดยผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) แบบประเมินความพึงพอใจใช้มาตราส่วน Likert 5 ระดับ (Joshi et al., 2015) เกณฑ์การแปลความหมายค่าเฉลี่ยน้ำหนักคำถาม 1.00 – 1.80 หมายถึง เห็นด้วย/เหมาะสมสำคัญน้อยที่สุด, 1.81 – 2.60 หมายถึง เห็นด้วย/เหมาะสมสำคัญน้อย, 2.61 – 3.40

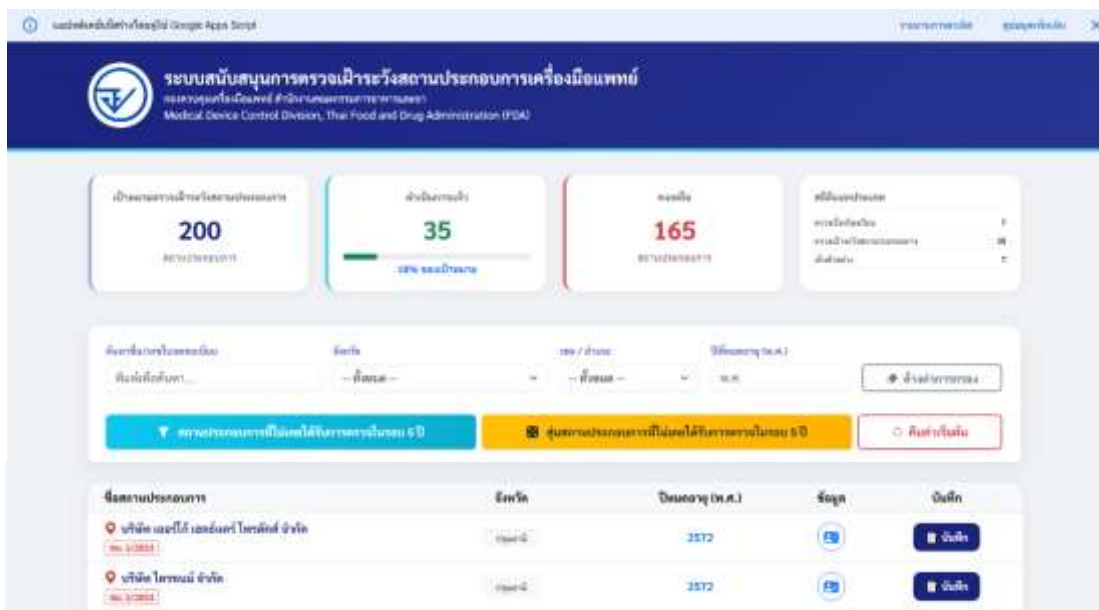


หมายถึง เห็นด้วย/เหมาะสมสำคัญปานกลาง ,3.41 – 4.20 หมายถึง เห็นด้วย/เหมาะสมสำคัญมาก และ 4.21 – 5.00 หมายถึง เห็นด้วย/เหมาะสมสำคัญมากที่สุด ตามลำดับ

ผลและวิจารณ์

ระบบงานเดิมในการตรวจเฝ้าระวังสถานประกอบการผลิตและนำเข้าเครื่องมือแพทย์มีข้อจำกัดด้านการจัดการข้อมูลที่กระจัดกระจาย ขาดการเชื่อมโยง และต้องใช้เวลาในการเตรียมข้อมูลและค้นหาข้อมูลค่อนข้างมาก ส่งผลให้เกิดความล่าช้าและความซ้ำซ้อนในการปฏิบัติงาน รวมถึงการวางแผนการตรวจที่ยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร

ภายหลังการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน พบว่าระบบสามารถรวบรวมและจัดการข้อมูลได้อย่างเป็นระบบรองรับการค้นหา การบันทึกข้อมูล และการสรุปรายงานได้เป็นปัจจุบัน ช่วยให้เจ้าหน้าที่สามารถเข้าถึงข้อมูลสถานประกอบการ ประวัติการตรวจ และข้อมูลที่เกี่ยวข้องได้สะดวกมากขึ้น ส่งผลให้กระบวนการทำงานมีความคล่องตัวและลดขั้นตอนที่ซ้ำซ้อน



ภาพที่ 3 ภาพหน้าจอเว็บแอปพลิเคชันฯ ที่ได้พัฒนาขึ้น

ในด้านประสิทธิภาพการทำงาน พบว่า ระยะเวลาในการค้นหาข้อมูลและเตรียมข้อมูลก่อนการตรวจลดลงประมาณร้อยละ 50 จากเดิมเฉลี่ย 110.83 วินาที เหลือ 55.41 วินาที แสดงให้เห็นว่าเว็บแอปพลิเคชันฯ สามารถช่วยลดระยะเวลาในการปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การประเมินความพึงพอใจภายหลังการทดสอบการใช้งานแอปพลิเคชัน พบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจโดยรวมทุกด้าน อยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.71 ± 0.46) โดยด้านการใช้งานและภาพลักษณ์การแสดงผล อยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.80 ± 0.41) กล่าวคือ ผู้ใช้งานเห็นว่าระบบใช้งานง่าย สะดวก และสอดคล้องกับการทำงานจริง ส่งผลให้เว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นได้รับการยอมรับและมีศักยภาพในการนำไปใช้จริงในงานกำกับดูแลเครื่องมือแพทย์ (ตารางที่ 1)



รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD	แปลผล
1. ด้านการออกแบบได้ตรงความต้องการของผู้ใช้งาน	4.70 $\pm$ 0.48	พึงพอใจมากที่สุด
1.1 หน้าเว็บแอปพลิเคชันมีฟังก์ชัน ตรงตามที่ต้องการใช้งาน	4.70 $\pm$ 0.48	พึงพอใจมากที่สุด
1.2 สามารถเรียกดูข้อมูลที่สำคัญได้ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ	4.80 $\pm$ 0.42	พึงพอใจมากที่สุด
1.3 สามารถบันทึกรายละเอียดการออกตรวจได้	4.70 $\pm$ 0.48	พึงพอใจมากที่สุด
1.4 ช่วยลดระยะเวลาการเตรียมข้อมูลการออกตรวจได้	4.60 $\pm$ 0.52	พึงพอใจมากที่สุด
2. ด้านการทำงานของเว็บแอปพลิเคชัน	4.62 $\pm$ 0.51	พึงพอใจมากที่สุด
2.1 การเรียกใช้คำสั่งบนเมนู ทำได้ตามที่ออกแบบ	4.60 $\pm$ 0.52	พึงพอใจมากที่สุด
2.2 แสดงข้อมูลจากการค้นหา ได้อย่างถูกต้อง	4.70 $\pm$ 0.48	พึงพอใจมากที่สุด
2.3 แสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของรายงานได้	4.60 $\pm$ 0.52	พึงพอใจมากที่สุด
2.4 แอปพลิเคชันมีความรวดเร็วในการประมวลผล	4.50 $\pm$ 0.53	พึงพอใจมากที่สุด
2.5 แอปพลิเคชัน สามารถนำมาใช้ได้สอดคล้องกับการปฏิบัติงานจริง	4.70 $\pm$ 0.48	พึงพอใจมากที่สุด
3. ด้านการใช้งานและภาพลักษณ์การแสดงผล	4.80 $\pm$ 0.41	พึงพอใจมากที่สุด
3.1 แอปพลิเคชัน มีความง่ายต่อการใช้งาน ไม่ต้องเรียนรู้การใช้งาน	4.90 $\pm$ 0.32	พึงพอใจมากที่สุด
3.2 ข้อความ และรูปภาพประกอบที่แสดง มีความเหมาะสมเข้าใจง่าย	4.80 $\pm$ 0.42	พึงพอใจมากที่สุด
3.3 ความเหมาะสมของการใช้งาน สอดคล้องกับการปฏิบัติงานจริง	4.70 $\pm$ 0.48	พึงพอใจมากที่สุด
3.4 ปริมาณข้อมูลที่นำเสนอ ใน 1 หน้าจอมีความเหมาะสม	4.80 $\pm$ 0.42	พึงพอใจมากที่สุด
4. ความพึงพอใจในภาพรวมการนำไปใช้งานของแอปพลิเคชัน	4.70 $\pm$ 0.47	พึงพอใจมากที่สุด

ตารางที่ 1 ผลการประเมินความพึงพอใจภายหลังการทดสอบการใช้งานแอปพลิเคชัน

การอภิปรายผล

ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อสนับสนุนการตรวจเฝ้าระวังสถานประกอบการผลิตและนำเข้าเครื่องมือแพทย์ สามารถยกระดับการปฏิบัติงานได้ โดยเฉพาะในด้าน การลดระยะเวลาในการสืบค้นข้อมูลและ สะท้อนศักยภาพของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศใน การสนับสนุนภารกิจด้านการกำกับดูแลเครื่องมือแพทย์

การที่ระบบสามารถลดระยะเวลาในการค้นหาและเตรียมข้อมูลได้ดี เป็นผลมาจากการบูรณาการ ข้อมูลที่เคยกระจัดกระจายเข้าสู่ระบบฐานข้อมูลกลาง ช่วยลดความซ้ำซ้อนของกระบวนการทำงาน และเพิ่ม



ความเร็วในการเข้าถึงข้อมูล สอดคล้องกับบทบาทของระบบสารสนเทศในการเพิ่มประสิทธิภาพขององค์กร และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในงานด้านสุขภาพ (Kijsanayotin, 2021; สำนักงานคณะกรรมการอาหาร และยา, 2565) ให้ผลการพัฒนาไปทิศทางเดียวกับตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ Google Application ในการบริหารจัดการข้อมูลด้านสุขภาพ เพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานและลดภาระงานของผู้ปฏิบัติงาน (วิริยา วรลยางกูร , 2564; ปิ่นมกล สมพิร์วงศ์ และสฤณชัย ปรีดาร์ลย์, 2564) ในด้านความพึงพอใจของผู้ใช้งาน พบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในระดับมากที่สุด สะท้อนให้เห็นว่าระบบ มีความเหมาะสมกับบริบทการใช้งานจริง ใช้งานง่าย และตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะของระบบที่พัฒนาบนแพลตฟอร์มที่คุ้นเคย เช่น Google Sheets และ Google Apps Script ช่วยลดความซับซ้อนในการเรียนรู้และเพิ่มการยอมรับของผู้ใช้ (Alharthi et al., 2020; Son, 2024)

อย่างไรก็ตาม แม้ผลการศึกษาจะบ่งชี้ว่าเว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ผู้วิจัยตระหนักถึงข้อจำกัดบางประการที่อาจส่งผลกระทบต่อผลเชิงสรุป และการนำไปปรับใช้ในวงกว้าง ประเด็นแรกคือ ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง คือจำนวนที่จำนวน 10 ราย โดยเป็นการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จากหน่วยงานต้นสังกัดที่มีจำนวนบุคลากรจำกัด ประเด็นสำคัญถัดมาคือ ข้อจำกัดของการทดลองแบบกลุ่มสัมพันธ์ (Paired Design) ผู้เข้าร่วมการทดสอบทุกคนเริ่มทดสอบด้วยวิธีการจัดการข้อมูลแบบเดิม (Excel) ก่อนการใช้เว็บแอปพลิเคชันฯเสมอ แม้จะมีการกำหนดระยะเวลาพักนาน 3 วัน เพื่อลดผลกระทบจากการเรียนรู้ แต่ลำดับการทดสอบที่คงที่ ดังกล่าว อาจนำไปสู่ผลกระทบด้านปัจจัยแทรกซ้อน (Confounding Variable) จากความคุ้นเคยในชุดข้อมูลและแนวทางของภารกิจทดสอบย้อนหลัง 10 ข้อ ดังนั้นหากมีการศึกษาในอนาคตควรใช้วิธีการสลับลำดับการทดสอบ (Counterbalancing) เพื่อขจัดตัวแปรแทรกซ้อนและยืนยันประสิทธิภาพของเครื่องมือได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น และเพิ่มจำนวนผู้ทดสอบให้มีจำนวนมากขึ้น

เว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนา สามารถแสดงหรือค้นหาสถานประกอบการที่ไม่เคยได้รับการตรวจประเมินเลยตลอดระยะเวลา 5 ปีได้อย่างแม่นยำ ซึ่งในระบบฐานข้อมูลเดิมมักเกิดความสับสนเนื่องจากปริมาณข้อมูลที่มหาศาลและการสืบค้นที่ซับซ้อน การเปลี่ยนแปลงนี้ช่วยปิดช่องว่างในการกำกับดูแลและช่วยให้หน่วยงานสามารถกระจายทรัพยากรเจ้าหน้าที่ลงพื้นที่ได้อย่างทั่วถึงตามความเสี่ยงจริง ในด้านความถูกต้องของข้อมูล (Data Accuracy) ระบบช่วยลดอัตราความผิดพลาดจากการบันทึกข้อมูลซ้ำซ้อนหรือการระบุผิดพลาด สถานประกอบการที่คลาดเคลื่อน ด้วยการเชื่อมโยงฐานข้อมูลใบอนุญาตเข้ากับระบบแผนที่นำทางแบบเรียลไทม์ ทำให้เจ้าหน้าที่สามารถวางแผนเส้นทางตรวจประเมินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดอัตราความซ้ำซ้อนของการปฏิบัติงานและประหยัดทรัพยากรด้านงบประมาณในการเดินทาง ตัวอย่างกรณีใช้งานจริงที่เห็นผลได้ชัดเจนคือ เมื่อเกิดสถานการณ์เฝ้าระวังผลิตภัณฑ์เครื่องมือแพทย์เร่งด่วน สามารถใช้ระบบคัดกรองพิกัดกลุ่มเป้าหมายที่มีความเสี่ยงสูงได้ทันที ซึ่งช่วยให้การตัดสินใจสั่งการเชิงนโยบายมีความรวดเร็วและแม่นยำบนพื้นฐานของข้อมูล (Data-Driven Decision Making) แทนการใช้ดุลยพินิจเพียงอย่างเดียว



บทสรุป

เว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นนี้ได้เปลี่ยนรูปแบบการทำงานจากเชิงรับไปสู่การเฝ้าระวังเชิงรุกที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น สร้างคุณค่าเชิงยุทธศาสตร์ให้แก่หน่วยงานในการคุ้มครองผู้บริโภคได้อย่างเป็นรูปธรรม ลดความเสี่ยงที่อาจเกิดจากการล่าช้าในกระบวนการตรวจสอบเอกสารและข้อมูลสถานประกอบการก่อนลงพื้นที่จริง และได้รับการยอมรับจากผู้ใช้งานอย่างชัดเจน สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาประยุกต์ใช้ในงานกำกับดูแลด้านสาธารณสุข และมีศักยภาพในการนำไปต่อยอดใช้งานในบริบทอื่นที่เกี่ยวข้องในอนาคต

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณอาจารย์สาขาสุขภาพดิจิทัล คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ตลอดจนบุคลากรของกลุ่มกำกับดูแลหลังออกสู่ตลาด กองควบคุมเครื่องสำอางค์ สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา ที่ให้ความอนุเคราะห์การดำเนินการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี



เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงสาธารณสุข. (2564). แผนปฏิบัติการด้านสุขภาพดิจิทัล กระทรวงสาธารณสุข พ.ศ. 2564–2568. https://ict.moph.go.th/upload_file/files/97c2287c8f04e13f81fec13e431e7a5e.pdf
- คณะกรรมการอาหารและยา. (2565). การขึ้นทะเบียนผลิตภัณฑ์หรือนำเข้าเครื่องมือแพทย์. <https://medical.fda.moph.go.th/product/category/about-product-registration>
- ปิ่นกมล สมพิริวงศ์, & สฤญชัย ปรีดาวัลย์. (2564). การประยุกต์ใช้ Google Sheet สำหรับการจัดทำแผนปฏิบัติงานของวิทยาลัยการสาธารณสุขสิรินธร จังหวัดชลบุรี. วารสารวิจัยระบบสาธารณสุข, 15(4), 490–510.
- วีรียา วรลยางกูร. (2564). การศึกษาประสิทธิภาพและประสิทธิผลของการใช้แอปพลิเคชันสำหรับการบริหารจัดการคลังยาต้านไวรัสในสถาบันสุขภาพเด็กแห่งชาติมหาราชินี [วิทยานิพนธ์]. <http://thesis-ir.su.ac.th/dspace/handle/123456789/3938>
- สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา. (2551). พระราชบัญญัติเครื่องมือแพทย์ พ.ศ. 2551. ราชกิจจานุเบกษา, 125(43 ก).
- สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา. (2562). พระราชบัญญัติเครื่องมือแพทย์ (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2562. ราชกิจจานุเบกษา, 136(56 ก).
- Alharthi, H., Yunas, N., & Rahman, R. (2020). Cloud-based data collection for public health using Google Forms. *International Journal of Health Informatics*, 9(2), 45–52.
- Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., Joseph, A. D., Katz, R., Konwinski, A., Lee, G., Patterson, D., Rabkin, A., Stoica, I., & Zaharia, M. (2010). A view of cloud computing. *Communications of the ACM*, 53(4), 50–58. <https://doi.org/10.1145/1721654.1721672>
- Kijsanayotin, B. (2021). eHealth/Digital health and health information systems in Thailand: An update and the next steps. https://www.rama.mahidol.ac.th/ceb/sites/default/files/public/pdf/ACADEMIC/2021/Epi/RACE624/eHealth-DigitalHealth-HIS-InThailand-Update_NextSteps-20210811.pdf
- Mell, P., & Grance, T. (2011). The NIST definition of cloud computing (Special Publication 800-145). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-145>
- Son, P. N. (2024). Using Appsheet and Apps Script to develop management and implementation applications for university education programs. *VNU Journal of Science: Education Research*, 40(1), 104–114.
- World Health Organization. (2020). Global strategy on digital health 2020–2027. <https://www.who.int/health-topics/digital-health>



พลวัตเชิงเวลาของการรับรู้รสหวาน: การเปรียบเทียบซูโครสและซูคราโลสด้วยวิธี Time-Intensity

Temporal Dynamics of Sweet Taste Perception: A Time-Intensity Comparison of Sucrose and Sucralose

อรวรรณ ภูมิอะไซ¹ และรัชพงศ์ ชูศรี¹

Orawan Pumeeako¹ and Touchpong Choosri¹

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบพลวัตการรับรู้รสหวานของซูโครสและซูคราโลสโดยใช้วิธี Time-Intensity (TI) ผู้เข้าร่วมทดสอบจำนวน 8 คน อายุ 20–35 ปี จากภาควิชาเทคโนโลยีอาหารได้รับตัวอย่างสารละลายซูโครส 10% (w/w) และสารละลายซูคราโลสที่มีระดับความหวานเทียบเท่า โดยบันทึกข้อมูลความเข้มข้นรสหวานแบบ real-time ผ่านระบบ Arduino UNO R3 และ pressure sensor MPXV7002DP ด้วย sampling rate 1 μ s ข้อมูลที่ได้ผ่านการ pre-processing, smoothing (Savitzky-Golay), normalization และสกัดพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ maximum intensity (I_{max}), time to maximum (T_{max}), duration, area under the curve (AUC), และ slope of onset/offset ผลการวิเคราะห์พบว่า ซูคราโลสมี I_{max} , T_{max} , AUC, T_{end} และ Duration สูงกว่าซูโครสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่ T_{onset} ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าซูคราโลสให้รสหวานที่เข้มข้นกว่าและคงตัวนานกว่า แม้เริ่มรับรู้รสหวานได้ในเวลาใกล้เคียงกัน การค้นพบนี้มีนัยสำคัญต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มลดน้ำตาล โดยสามารถใช้ซูคราโลสเพื่อให้รสหวานเพียงพอและยาวนานโดยไม่เพิ่มพลังงาน ผลการศึกษานี้ยังสนับสนุนการประยุกต์ใช้ TI profiling ในการวิเคราะห์พลวัตรสชาติของสารให้ความหวานชนิดต่าง ๆ

คำสำคัญ : ซูโครส ซูคราโลส ความเข้มข้นตามระยะเวลา พลวัตรสหวาน การวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัส

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.



Abstract

This study aimed to compare the temporal dynamics of sweetness perception between sucrose and sucralose using the Time-Intensity (TI) method. Eight trained panelists aged 20–35 years from the Department of Food Technology participated in the sensory evaluation. Sucrose solutions (10% w/w) and sucralose solutions with equivalent sweetness were prepared. Sweetness intensity was recorded in real-time using an Arduino UNO R3 microcontroller coupled with a MPXV7002DP pressure sensor at a sampling rate of 1 μ s. Raw data were pre-processed, smoothed using the Savitzky-Golay filter, and normalized. Key TI parameters were extracted, including maximum intensity (I_{max}), time to maximum (T_{max}), duration, area under the curve (AUC), and slope of onset/offset. Results indicated that sucralose exhibited significantly higher I_{max} , T_{max} , AUC, T_{end} , and duration than sucrose ($p < 0.05$), while T_{onset} did not differ significantly. These findings suggest that sucralose provides stronger and longer-lasting sweetness despite a similar onset time. The results have practical implications for reduced-sugar food and beverage development, allowing the use of sucralose to achieve sustained sweetness without additional calories. Furthermore, this study highlights the utility of TI profiling for assessing temporal sweetness patterns of different sweeteners.

Keyword : Sucrose, Sucralose, Time-Intensity, Sweetness dynamics, Sensory analysis

บทนำ

ความหวานเป็นหนึ่งในคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่สำคัญที่สุดซึ่งมีผลต่อการยอมรับและความพึงพอใจของผู้บริโภคในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม โดยทั่วไปน้ำตาลซูโครสถือเป็นมาตรฐานสำหรับการให้ความหวานในอุตสาหกรรมอาหาร อย่างไรก็ตาม ด้วยความตระหนักด้านสุขภาพและแนวโน้มการลดการบริโภคน้ำตาล (Stanner & Spiro, 2020) การใช้สารให้ความหวานทดแทน (non-nutritive sweeteners) ทำให้มีการใช้สารให้ความหวานทดแทน เช่น ซูคราโลส แอสปาร์แตม และสตีวียอลไกลโคไซด์ ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถให้ความหวานเทียบเท่าหรือต่ำกว่าแคลอรีน้ำตาล (สงศิริ & กิจเจริญธร, 2020) แต่ลักษณะการรับรู้ความหวานของสารเหล่านี้อาจแตกต่างจากน้ำตาลในแง่ของพลวัตการรับรู้รสหวาน (temporal profile of sweetness perception) (DuBois, 2016) การศึกษาพลวัตของความหวานสามารถทำได้โดยใช้เทคนิค Time-Intensity (TI) ซึ่งวัดความเข้มของรสชาติในช่วงเวลาที่กำหนด ทำให้สามารถสกัดพารามิเตอร์สำคัญ เช่น เวลาเริ่มรับรู้รสหวาน (onset) ความเข้มสูงสุด (maximum intensity) เวลาที่ความเข้มสูงสุดเกิดขึ้น (time to maximum) ระยะเวลาที่รับรู้ความหวานได้ (duration) และพื้นที่ใต้กราฟ (area under the



curve; AUC) ข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญต่อการออกแบบผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนให้มีลักษณะรสชาติใกล้เคียงน้ำตาลมากที่สุด (Guinard et al., 2007) งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาพฤติกรรมการรับรู้รสหวานของสารละลายน้ำตาลซูโครส 10% เปรียบเทียบกับ ซูคราโลส ผ่านการวิเคราะห์ Time-Intensity ของความหวาน โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกอบรมและเครื่องมืออุปกรณ์บันทึกข้อมูลแบบ real-time ผลลัพธ์จากการศึกษานี้จะช่วยให้เข้าใจความแตกต่างของพฤติกรรมการรับรู้รสหวานระหว่างสารให้ความหวานธรรมชาติและสังเคราะห์ และให้แนวทางในการเลือกใช้สารให้ความหวานทดแทนในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มลดน้ำตาลได้อย่างเหมาะสม

วัตถุประสงค์

เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับรู้รสหวานระหว่างซูโครสและซูคราโลส โดยใช้วิธี Time-Intensity analysis

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมสารละลายซูโครสที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (10% w/w) โดยละลายในน้ำกลั่น จากนั้นเตรียมสารละลายซูคราโลสให้มีระดับความหวานเทียบเท่ากัน โดยคำนวณความเข้มข้นในหน่วย ppm โดยอ้างอิงจากค่าความหวานสัมพัทธ์ของซูคราโลสเมื่อเทียบกับซูโครส ที่มีความหวานมากกว่าประมาณ 600 เท่า (Grotz & Munro, 2009; Kroger et al., 2006) เพื่อให้สารละลายทั้งสองมีความเข้มข้นความหวานใกล้เคียงกันก่อนนำไปใช้ในการทดสอบทางประสาทสัมผัส

2. เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์สำหรับการเก็บบันทึกข้อมูลแบบ Time-Intensity (TI) ดังแสดงในรูปภาพที่ 1 ประกอบด้วยระบบตรวจวัดสัญญาณแรงบีบที่พัฒนาโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino Uno R3 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก โดยรับสัญญาณความดันจากเซนเซอร์วัดความดันรุ่น MPXV7002DP ซึ่งเชื่อมต่อกับลูกยางสำหรับบีบที่ผู้ทดสอบใช้เป็นอุปกรณ์ป้อนสัญญาณ ค่าความดันที่ตรวจวัดได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณเชิงปริมาณแทนค่าความเข้มของการรับรู้รสหวาน (intensity) ตามช่วงเวลา ระบบมี sampling rate ประมาณ 1 μ s ทำให้สามารถบันทึกการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้อย่างละเอียดและต่อเนื่อง ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ (PC) เพื่อทำการแสดงผลและบันทึกข้อมูลแบบเวลาจริง (real-time) ระบบซอฟต์แวร์สำหรับรับและบันทึกข้อมูลได้รับการพัฒนาขึ้นเฉพาะสำหรับงานวิจัยนี้ โดยใช้ภาษา Python เพื่อรองรับการแสดงผลสัญญาณ Time-Intensity และจัดเก็บข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป



3. ผู้ทดสอบ (Panelists)

การทดลองนี้มีผู้เข้าร่วมทดสอบแบบ trained panelists ที่มีประสบการณ์ด้านการประเมินรสหวานเพื่อควบคุมความแปรปรวนในการรับรู้รสหวาน ผู้ทดสอบจะได้รับคำแนะนำให้งดอาหารและเครื่องดื่ม (ยกเว้นน้ำเปล่า) อย่างน้อย 1 ชั่วโมงก่อนการทดสอบ ซึ่งดำเนินการในห้องควบคุมแสงและอุณหภูมิ ช่วงเวลา 09:00 – 12:00 น. เพื่อควบคุมความเหนื่อยล้าและการรบกวนของปัจจัยภายนอก ตัวอย่างจะถูกสุ่มและเข้ารหัสแบบ blind เพื่อลดอคติ มีการฝึกอบรมการใช้ระบบ Time-Intensity (TI) เพื่อให้การประเมินมีความสม่ำเสมอ พร้อมจัดเตรียมน้ำและขนมปังไม่มีรสสำหรับล้างปากระหว่างตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อให้ข้อมูลที่ได้อ่านการรับรู้รสหวานอย่างแท้จริงและมีความน่าเชื่อถือสูง

4. วิธีการทดลอง (Experimental Procedure)

การทดลองดำเนินการโดยการจัดเสิร์ฟตัวอย่างให้ผู้เข้าร่วมทดสอบแต่ละคน ปริมาตร 15 มล. ใส่ในภาชนะพลาสติกแบบเดี่ยวสำหรับแต่ละตัวอย่างโดยเสิร์ฟ ครั้งละ 1 ตัวอย่าง เพื่อป้องกันการรบกวนของรสชาติข้ามตัวอย่างผู้ทดสอบทำการประเมินรสหวานแบบ Time-Intensity (TI) โดยใช้อุปกรณ์และโปรแกรมเฉพาะที่พัฒนาขึ้น สำหรับการบันทึกค่าความเข้มและเวลาแบบ real-time เมื่อผู้ทดสอบได้รับตัวอย่างจะเริ่มการทดสอบทันทีที่พร้อม โดยชิมตัวอย่างพร้อมกับเริ่มต้นบันทึกค่าความเข้มรสหวาน การประเมินจะดำเนินไปเป็นเวลา 60 วินาทีต่อตัวอย่าง โดยโปรแกรมจะบันทึกข้อมูลความเข้มรสหวาน (intensity) และเวลา (time) อัตโนมัติสำหรับการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป โดยระหว่างตัวอย่าง ผู้ทดสอบจะได้รับการบ้วนปากด้วยน้ำสะอาด และรับประทานขนมปังไม่มีรส เพื่อลดผลกระทบของรสชาติที่เหลืออยู่จากตัวอย่างก่อนหน้า ทั้งนี้การจัดลำดับตัวอย่างใช้ การสุ่มแบบ randomized และบันทึกแบบ blind เพื่อหลีกเลี่ยงอคติในการประเมิน

5. การวิเคราะห์ข้อมูล Time-Intensity (Time-Intensity Data Analysis)

การวิเคราะห์ข้อมูล Time-Intensity (TI) ดำเนินการโดยใช้กราฟที่มี แกน x แสดงเวลา (วินาที, 0–60 วินาที) และ แกน y แสดงความเข้มของรสหวาน (intensity) ข้อมูลความเข้มรสหวาน $I(t)$ ที่บันทึกได้จะผ่านขั้นตอน pre-processing ดังนี้

5.1 การกรองสัญญาณ (Smoothing and Noise Reduction) ใช้วิธี Savitzky-Golay filter เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน (noise) และทำให้แนวโน้มหลักของการเปลี่ยนแปลงความเข้มรสหวานชัดเจนขึ้น

5.2 การประมาณค่าเชิงเส้น (Interpolation) เนื่องจากจุดข้อมูลของเวลาที่ได้จากการบันทึกไม่ต่อเนื่อง จึงใช้การ linear interpolation เพื่อสร้างข้อมูลความเข้มรสหวานที่มีความต่อเนื่อง

5.3 การปรับค่าข้อมูล (Normalization) ข้อมูลที่ได้จะถูกทำ normalization เพื่อให้ค่าความเข้มรสหวานอยู่ในช่วงเดียวกัน (0–1) ซึ่งช่วยให้สามารถเปรียบเทียบรูปแบบการรับรู้ระหว่างตัวอย่างและผู้ทดสอบได้

หลังจากการ pre-processing ข้อมูล Time-Intensity จะถูกใช้ในการ สกัดพารามิเตอร์เชิงสถิติและเชิงพฤติกรรมของรสหวาน เพื่อการวิเคราะห์ผล ประกอบด้วย



- Maximum intensity (I_{max}) คือ ค่าความเข้มข้นรสหวานสูงสุดที่ผู้ทดสอบรายงานระหว่างช่วงเวลาการประเมิน แสดงถึง ความเข้มข้นรสสูงสุดที่รับรู้ได้ (peak sweetness intensity)
- Time to maximum (T_{max}) คือ เวลาที่เกิด I_{max} นับจากเริ่มต้นการทดสอบ (วินาที) ใช้บ่งชี้ความเร็วในการรับรู้รสหวาน (onset of peak sweetness)
- Duration (D) คือ ระยะเวลาที่ผู้ทดสอบรับรู้รสหวานอยู่นเหนือ ค่าพื้นฐาน (baseline) หรือเกณฑ์ที่กำหนด แสดงถึง ระยะเวลาการรับรู้รสหวาน (sweetness persistence)
- Area under the curve (AUC) คือ พื้นที่ใต้กราฟ Time-Intensity ซึ่งคำนวณจากการอินทิเกรตค่า $I(t)$ ตามเวลาสะท้อน ปริมาณรวมของความเข้มข้นรสหวานที่ผู้ทดสอบรับรู้ตลอดช่วงเวลา
- Slope of onset/offset คือ ความชันของกราฟในช่วง onset (เริ่มรับรู้จนถึง peak) และ offset (จาก peak จนกลับสู่ baseline) แสดงถึง อัตราการเพิ่มและลดของความเข้มข้นรสหวาน ช่วยบ่งบอกถึงความรวดเร็วและความคงตัวของรสหวาน

โดยพารามิเตอร์เหล่านี้ใช้เป็นตัวชี้วัดในการเปรียบเทียบพลวัตของรสหวานระหว่างซูโครสและซูคราโลส ซึ่งจะวิเคราะห์ความแตกต่างของรูปแบบการรับรู้รสหวานในเชิงปริมาณ

6. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ (Statistical Analysis)

พารามิเตอร์ที่สกัดได้จากข้อมูล Time-Intensity (TI) ของสารให้ความหวานทั้ง ซูโครสและซูคราโลส ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อทดสอบความแตกต่างทางสถิติ โดยใช้ Paired Sample t-test เพื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ระหว่างสองชนิดของสารให้ความหวาน เนื่องจากข้อมูลมาจากผู้ทดสอบชุดเดียวกัน ระดับนัยสำคัญทางสถิติถูกกำหนดที่ $p < 0.05$ (ความเชื่อมั่น 95%) การวิเคราะห์ทั้งหมดดำเนินการโดยใช้โปรแกรม R (R Core Team, 2023) พร้อมตรวจสอบสมมติฐานของ ความเป็นปกติ (normality) ของข้อมูลและความเท่าเทียมของความแปรปรวน (homogeneity of variance) ก่อนทำการทดสอบ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ผลลัพธ์จากการทดสอบนี้ถูกใช้เพื่อสรุปความแตกต่างเชิงปริมาณของ พลวัตการรับรู้รสหวาน (Time-Intensity Profiles) ระหว่างซูโครสและซูคราโลส

ผลและวิจารณ์

กราฟ Time-Intensity (TI) แสดงให้เห็นความแตกต่างของรูปแบบการรับรู้รสหวานระหว่างซูโครสและซูคราโลสอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปภาพที่ 2 โดยจุดข้อมูลแต่ละจุดผ่านการ pre-processing รวมถึงการกรองสัญญาณ (Savitzky-Golay smoothing) และ normalization เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบพลวัตการรับรู้รสหวานระหว่างตัวอย่างได้ ช่วงเวลา TI คือ 0–60 วินาที โดยเส้นกราฟแสดงแนวโน้มค่าเฉลี่ยของความเข้ม



รสหวาน และแถบสีรอบเส้นกราฟแสดงถึงความแปรปรวนระหว่างผู้ทดสอบจำนวน 8 คน ซึ่งความแตกต่างของรูปแบบ TI ระหว่างชูโครลาโลสและชูโครสสะท้อน ความเข้มข้นสูงสุด (I_{max}) เวลาเกิดสูงสุด (T_{max}) ระยะเวลา (Duration) และพื้นที่ใต้กราฟ (AUC) ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งชูโครสมีลักษณะการรับรู้รสหวานเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (rapid onset) โดยค่าความเข้มข้นสูงสุดจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาไม่กี่วินาทีแรก และลดลงอย่างรวดเร็วใน 20 วินาที ในทางตรงกันข้ามชูโครลาโลสแสดงค่าความเข้มข้นสูงสุดสูงกว่าและคงความหวานได้นานกว่า โดยมีการลดลงของความเข้มข้นอย่างช้า ๆ และสามารถรับรู้รสหวานต่อเนื่องได้จนถึง 60 วินาที ซึ่งเป็นรูปแบบของสารให้ความหวานสังเคราะห์ที่จะมี temporal profile ที่ยาวกว่าและมี aftertaste มากกว่า (DuBois & Prakash, 2012)

ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ Time-Intensity (TI) ของชูโครสและชูโครลาโลสแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในหลายพารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 1 ผู้ทดสอบรับรู้ความเข้มข้นสูงสุด (I_{max}) ของชูโครลาโลสสูงกว่าชูโครสอย่างมีนัยสำคัญ (0.562 ± 0.291 เทียบกับ 0.294 ± 0.358 , $p < 0.05$) เช่นเดียวกับพื้นที่ใต้กราฟ (AUC) ซึ่งชูโครลาโลสมีค่า 8.522 ± 4.938 สูงกว่าชูโครส 2.281 ± 3.410 ($p < 0.05$) แสดงว่าความหวานของชูโครลาโลสมีทั้งความเข้มข้นและปริมาณรวมสูงกว่า แม้ค่า onset time (T_{onset}) จะไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างสองสารให้ความหวาน (1.125 ± 0.789 วินาที สำหรับ ชูโครลาโลส และ 0.875 ± 0.483 วินาที สำหรับชูโครส) แต่ชูโครลาโลสมีเวลาที่เกิดความเข้มข้นสูงสุด (T_{max}) และเวลาสิ้นสุดรสหวาน (T_{end}) ยาวกว่าชูโครสอย่างมีนัยสำคัญ (4.075 ± 1.607 วินาที และ 36.313 ± 12.892 วินาที เทียบกับ 2.313 ± 1.689 วินาที และ 18.775 ± 15.474 วินาที ตามลำดับ) ทำให้ระยะเวลาการรับรู้รสหวาน (Duration) ของชูโครลาโลสยาวกว่าชูโครสเกือบสองเท่า (35.188 ± 13.068 วินาที เทียบกับ 17.900 ± 15.203 วินาที $p < 0.05$) ลักษณะดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ชูโครลาโลสให้รสหวาน เข้มกว่า คงตัวนานกว่า และมีปริมาณรวมของความหวานมากกว่า แม้เริ่มรับรู้ความหวานได้ในเวลาใกล้เคียงกัน (Zhao & Tepper, 2007) ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับคุณสมบัติทางเคมีและความคงตัวของชูโครลาโลส ซึ่งมีความเสถียรต่อการย่อยสลายและน้ำลาย ส่งผลให้เกิดพลวัตการรับรู้รสหวานแบบ Time-Intensity ที่แตกต่างจากชูโครสอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่พบว่าชูโครลาโลสมีลักษณะเด่นคือความหวานตกค้างยาวนาน แม้หลังจากกลืนตัวอย่างแล้ว (Zhao & Tepper, 2007) ในทางตรงกันข้าม ชูโครสมีลักษณะของความหวานที่หวานเร็วและหายเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของการวิเคราะห์เชิงเวลาในประสาทสัมผัส ที่ระบุว่าความแตกต่างของสารให้ความหวานไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเพียงอย่างเดียว แต่รวมถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของความหวานตามเวลาด้วย (Liu et al., 2026) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ทำให้ผู้บริโภครับรู้ว่าเป็นความหวานธรรมชาติ และไม่มี aftertaste รบกวน (Tan et al., 2019)

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าชูโครลาโลสมีพลวัตการรับรู้รสหวานที่แตกต่างจากชูโครสอย่างชัดเจน โดยมีความเข้มข้นสูงสุด (I_{max}) และพื้นที่ใต้กราฟ (AUC) สูงกว่าระยะเวลาและเวลาสิ้นสุดของรสหวานยาวนานกว่า แม้ค่า onset time จะใกล้เคียงกัน ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้ที่ระบุว่าชูโครลาโลสมี sweetness



persistence สูงและ onset ของรสหวานค่อนข้างช้า แต่คงตัวได้นาน (Schiffman et al., 2007) ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้จาก โครงสร้างเคมีและความเสถียรต่อการย่อยสลายของซูคราโลส ซึ่งไม่ถูกย่อยสลายโดยน้ำลายและทนต่ออุณหภูมิและ pH ต่าง ๆ ทำให้ความหวานคงตัวนานและมีปริมาณรวมของความเข้มข้น นอกจากนี้ความแตกต่างใน AUC และ Duration มีนัยสำคัญต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม เพราะรสหวานที่คงตัวและมีปริมาณรวมสูงอาจช่วยลดปริมาณการใช้สารให้ความหวานเพิ่มความพึงพอใจของผู้บริโภคโดยไม่เพิ่มแคลอรีมาก การรับรู้รสหวานที่ยาวนานของซูคราโลสยังสามารถปรับปรุง profile ทางรสชาติของผลิตภัณฑ์ลดน้ำตาล และสนับสนุนการออกแบบอาหารที่เน้นสุขภาพ โดยให้ความหวานเพียงพอแต่ลดผลกระทบด้านพลังงาน อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้จำกัดขนาดตัวอย่าง ($n = 8$) และใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกอบรม ซึ่งอาจแตกต่างจากการรับรู้รสหวานของผู้บริโภคทั่วไปในเชิง population-level การศึกษาต่อไปจึงควรขยายกลุ่มตัวอย่างและรวม consumer panel เพื่อประเมินความแตกต่างทางพลวัตของรสหวานในบริบทการบริโภคจริง

สรุป

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าซูคราโลสมีพลวัตการรับรู้รสหวานที่แตกต่างจากซูโครสอย่างชัดเจน โดยผู้ทดสอบรับรู้ความหวานของซูคราโลส เข้มกว่า คงตัวนานกว่า และมีปริมาณรวมของความหวานสูงกว่า แม้ว่า การเริ่มรับรู้รสหวาน (onset) จะใกล้เคียงกับซูโครส ข้อมูล Time-Intensity (TI) แสดงให้เห็นว่า ซูคราโลสมี maximum intensity, area under the curve, duration และเวลาสิ้นสุดของรสหวาน สูงกว่าซูโครสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลลัพธ์เหล่านี้สะท้อนคุณสมบัติทางเคมีและความเสถียรต่อการย่อยสลายของซูคราโลส การค้นพบนี้มีความสำคัญต่อการออกแบบผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มลดน้ำตาล เนื่องจากซูคราโลสสามารถให้รสหวานที่ยาวนานและเพียงพอ โดยไม่เพิ่มพลังงานมาก นอกจากนี้ข้อมูล TI ที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับโปรไฟล์ของรสชาติ (sensory profile) เพื่อเพิ่มความพึงพอใจของผู้บริโภค ในอนาคตการวิจัยควรขยายกลุ่มผู้ทดสอบเพื่อประเมินความแตกต่างในระดับผู้บริโภคทั่วไป และศึกษาปัจจัยอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารให้ความหวาน และ matrix ของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้สามารถประยุกต์ผลได้ในบริบทการบริโภคจริง

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษา และขอพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาที่อำนวยความสะดวกทั้งเครื่องมือสำหรับงานวิจัยและคอยให้คำปรึกษา คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

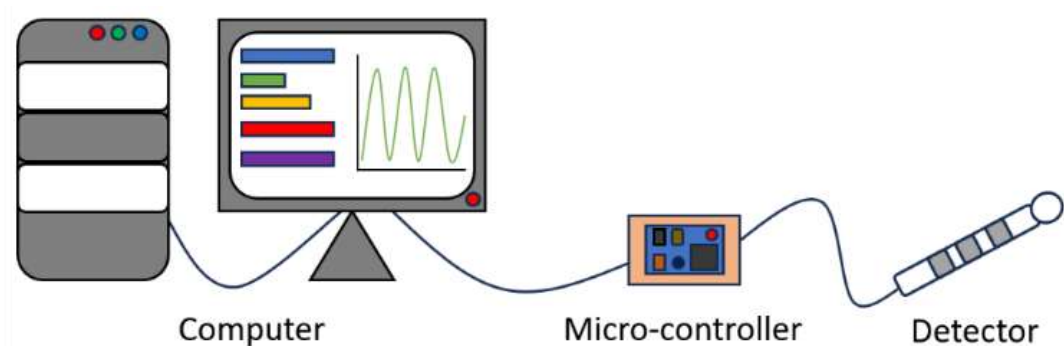


เอกสารอ้างอิง

- DuBois, G. E. (2016). Molecular mechanism of sweetness sensation. *Physiology & Behavior*, 164, 453-463. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2016.03.015>
- DuBois, G. E., & Prakash, I. (2012). Non-caloric sweeteners, sweetness modulators, and sweetener enhancers. *Annu Rev Food Sci Technol*, 3, 353-380. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101236>
- Grotz, V. L., & Munro, I. C. (2009). An overview of the safety of sucralose. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 55(1), 1-5. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2009.05.011>
- Guinard, J.-X., Hong, D., & Budwig, C. (2007). Time-intensity properties of sweet and bitter stimuli: Implications for sweet and bitter taste chemoreception. *Journal of Sensory Studies*, 10, 45-71. <https://doi.org/10.1111/j.1745-459X.1995.tb00004.x>
- Kroger, M., Meister, K., & Kava, R. (2006). Low-calorie Sweeteners and Other Sugar Substitutes: A Review of the Safety Issues. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 5(2), 35-47. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2006.tb00081.x>
- Liu, J., Niu, Y., Zhu, J., Zhou, R., Guo, Z., Miao, Z., Lu, Q., Yu, Y., Zhang, J., Xiao, Z., & Xiao, Q. (2026). Sweetness enhancement and mechanism by sweet aroma compounds in the sucrose solution using sensory, electronic tongue, molecular docking, and molecular dynamics simulation. *Food Chemistry: X*, 35, 103753. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fochx.2026.103753>
- Schiffman, S. S., Sattely-Miller, E. A., & Bishay, I. E. (2007). Time to maximum sweetness intensity of binary and ternary blends of sweeteners. *Food Quality and Preference*, 18(2), 405-415. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2006.04.007>
- Stanner, S., & Spiro, A. (2020). Public health rationale for reducing sugar: Strategies and challenges. *Nutrition Bulletin*, 45, 253-270. <https://doi.org/10.1111/nbu.12460>
- Tan, V. W. K., Wee, M. S. M., Tomic, O., & Forde, C. G. (2019). Temporal sweetness and side tastes profiles of 16 sweeteners using temporal check-all-that-apply (TCATA). *Food Research International*, 121, 39-47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.03.019>
- Zhao, L., & Tepper, B. J. (2007). Perception and acceptance of selected high-intensity sweeteners and blends in model soft drinks by propylthiouracil (PROP) non-tasters and super-tasters. *Food Quality and Preference*, 18(3), 531-540. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2006.07.004>
- สงศิริ, ป., & กิจเจริญธร, น. (2020). ความรู้ในการบริโภคน้ำตาล. *Thai JPEN วารสารโภชนาบำบัด*, 25(3), 9-13. <https://he02.tci-thaijo.org/index.php/ThaiJPEN/article/view/244225>

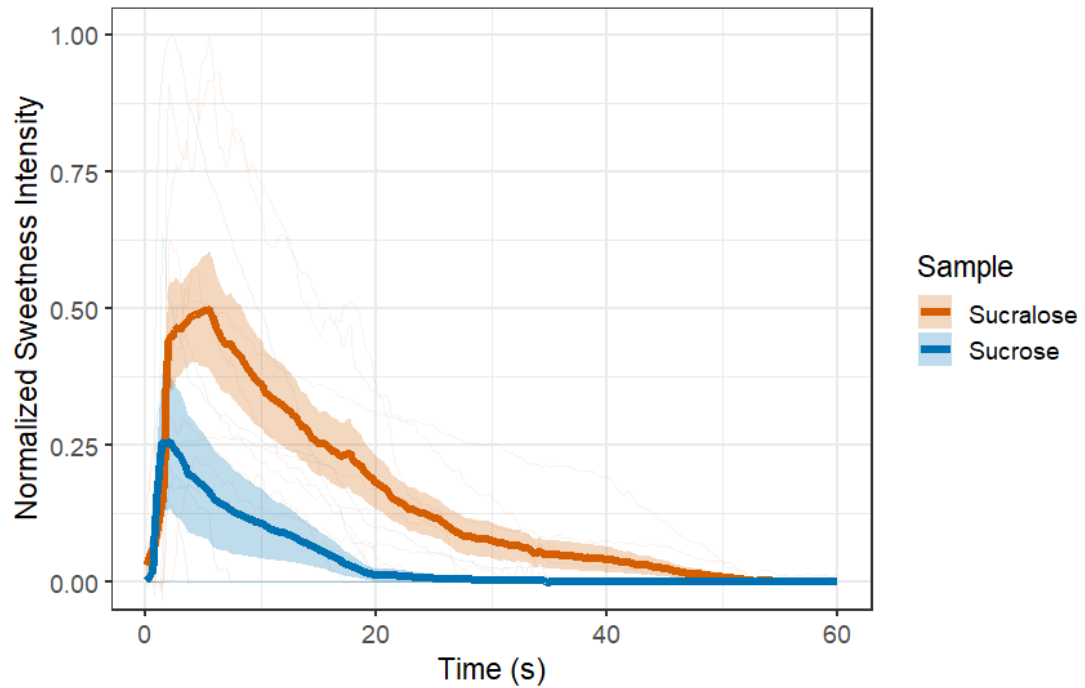
ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพารามิเตอร์ Time-Intensity (TI) ของชูโครสและชูคราโลส ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n = 8$) โดย $I_{\max}$ = ความเข้มสูงสุดของรสหวาน, $T_{\max}$ = เวลาเกิดความเข้มสูงสุด (วินาที), AUC = พื้นที่ใต้กราฟ TI; T_{onset} = เวลาเริ่มรับรู้ความหวาน (วินาที), T_{end} = เวลาไม่สามารถรับรู้ความหวานได้อีกต่อไป (วินาที), Duration = ระยะเวลาการรับรู้ความหวานทั้งหมด (วินาที) ตัวอักษรยกตัว a, b ในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชูโครสและชูคราโลสที่ระดับ $p < 0.05$ (ทดสอบ Paired Sample t-test)

ตัวอย่าง	$I_{\max}$	$T_{\max}$ (s)	AUC	T_{onset} (s)	T_{end} (s)	Duration (s)
ชูโครส	0.29378 $\pm$	2.31250 $\pm$ 1.	2.28051 $\pm$	0.87500 $\pm$	18.77500 $\pm$ 1	17.90000 $\pm$ 1
	0.35779 ^b	68899 ^b	3.41037 ^b	0.48329 ^a	5.4742 ^b	5.20282 ^b
ชูคราโลส	0.56175 $\pm$	4.07500 $\pm$ 1.	8.52202 $\pm$	1.12500 $\pm$	36.31250 $\pm$ 1	35.18750 $\pm$ 1
	0.29053 ^a	6069 ^a	4.93784 ^a	0.78876 ^a	2.89168 ^a	3.06778 ^a



รูปภาพ 1 แผนภาพการจับอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการบันทึกข้อมูล Time-Intensity (TI) ของความหวาน

Time–Intensity Profiles of Sweetness



รูปภาพ 2 โปรไฟล์ Time-Intensity (TI) ของความหวานสำหรับซูโครสและซูคราโลส แสดงค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นหวาน (mean intensity) ตามเวลา (s) และ แถบแสดงความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ($\pm$ SE, error band)

อิทธิพลของความเข้มแสงและระยะเวลาเก็บน้ำต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและการอุดตันของเมมเบรนในระบบ Photo-MBR ที่ใช้ฟล็อกสาหร่าย-แบคทีเรีย

(Influence of Light Intensity and Hydraulic Retention Time on Wastewater Treatment Performance and Membrane Fouling in a Photo-MBR System Using Microalgal-Bacterial Flocs)

ยลมนณี ขุนพรม¹, เบญจวรรณ ฮั่นบุญศรี¹, ธัญกมล ใจดำรงศรี¹, พจนารถ คงสุวรรณ¹, วิชญา รงค์สยามานนท์²,
วรรณวิภา ไชยชาญ³, ไชยวัฒน์ รงค์สยามานนท์¹

Yonmanee Khunprom^{1*}, Benjawan Hanbunsri¹, Tunyakamon Jaidumrong¹, Podjanad Kongsuwan¹,
Witchaya Rongsayamanont², Wanvipa Chaichan³, Chaiwat Rongsayamanont¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของความเข้มแสงและระยะเวลาเก็บน้ำ (HRT) ต่อสมรรถนะการบำบัดน้ำเสียและการอุดตันของเมมเบรนในระบบ Photo-MBR ชนิดจุลินทรีย์ผสมสาหร่ายและแบคทีเรีย ภายใต้ 3 สภาวะ ได้แก่ R1 (230 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, HRT 2 วัน) R2 (180 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, HRT 2 วัน) และ R3 (230 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, HRT 1.3 วัน)

ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถกำจัดซีโอดี (COD) ได้มากกว่าร้อยละ 94 ในทุกสภาวะ สภาวะ R2 เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD และไนโตรเจนละลายรวม (TDN) สูงสุดร้อยละ 97.5 และ 87.8 ตามลำดับ พร้อมรักษาสมดุลมวลชีวภาพและลดการสะสมชั้นตะกอน (Cake layer) ทำให้อัตราการอุดตันต่ำที่สุดที่ 3.69 kPa/day ในขณะที่สภาวะ R1 ความเข้มแสงระดับสูงทำให้ปริมาณมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นและเร่งให้อัตราการอุดตันเพิ่มเป็น 5.60 kPa/day

สำหรับการลด HRT ในสภาวะ R3 ก่อให้เกิดสภาวะช็อกของภาวะสารอินทรีย์และปรากฏการณ์ชะล้างจุลินทรีย์ โครงสร้างฟล็อกเกิดการแยกตัว (Deflocculation) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด TDN ลดลงเหลือร้อยละ 81.5 อีกทั้งยังกระตุ้นการหลั่งสารพอลิเมอร์ชีวภาพ (Extracellular Polymeric Substance: EPS) เข้าปิดกั้นรูพรุนเมมเบรน (Pore blocking) ทำให้อัตราการอุดตันพุ่งสูงสุดที่ 5.71 kPa/day สรุปได้ว่าการควบคุมความเข้มแสงและ HRT อย่างเหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญต่อการรักษาสมรรถนะและยืดอายุการใช้งานเมมเบรนในระบบ Photo-MBR

¹ คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

² คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

³ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

E-mail: 6510920025@email.psu.ac.th



คำสำคัญ: ถังปฏิกรณ์เมมเบรนชีวภาพแบบให้แสง (Photo-MBR), กลุ่มจุลินทรีย์ผสมสำหรับและแบคทีเรีย, ความเข้มแสง, ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ (HRT), การอุดตันของเมมเบรน

Abstract

This research investigated the influence of light intensity and hydraulic retention time (HRT) on wastewater treatment performance and membrane fouling in a microalgal-bacterial membrane photobioreactor (Photo-MBR). The experiment was conducted under three conditions: R1 (230 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 2-day HRT), R2 (180 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 2-day HRT), and R3 (230 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 1.3-day HRT).

The results revealed that the system achieved over 94% chemical oxygen demand (COD) removal across all conditions. Condition R2 emerged as the optimal operation, yielding the highest COD and total dissolved nitrogen (TDN) removal efficiencies of 97.5% and 87.8%, respectively. By maintaining biomass balance and minimizing cake layer accumulation, R2 exhibited the lowest membrane fouling rate of 3.69 kPa/day. Conversely, the high light intensity in R1 increased biomass concentration and viscosity, accelerating the fouling rate to 5.60 kPa/day.

Furthermore, decreasing the HRT in R3 induced an organic shock load and a severe washout effect. This led to sludge deflocculation, which deteriorated the TDN removal efficiency to 81.5%. The condition also stimulated the secretion of extracellular polymeric substances (EPS), causing severe pore blocking and driving the fouling rate to a peak of 5.71 kPa/day. In conclusion, optimizing light intensity and HRT is a crucial factor for sustaining treatment performance and extending the membrane lifespan in Photo-MBR systems

Keywords: Membrane photobioreactor (Photo-MBR), Microalgal-bacterial consortium, Light intensity, Hydraulic retention time (HRT), Membrane fouling

บทนำ (Introduction)

ปัจจุบัน น้ำเสียชุมชนประสบปัญหาการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และสารประกอบไนโตรเจนในปริมาณสูง หากถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัด สารประกอบไนโตรเจนจะเป็นสาเหตุหลักที่กระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งทำลายสมดุลของระบบนิเวศทางน้ำ การประเมินคุณภาพน้ำจึงให้ความสำคัญกับค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand: COD) เพื่อบ่งชี้ระดับการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ และปริมาณไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Nitrogen: TDN) เพื่อสะท้อนระดับการปนเปื้อนของธาตุอาหาร

เทคโนโลยีถังปฏิกรณ์เมมเบรนชีวภาพ (Membrane Bioreactor: MBR) มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูง แต่มีข้อจำกัดด้านความต้องการพลังงานไฟฟ้าปริมาณมากในกระบวนการเติมอากาศ เพื่อลดข้อจำกัด



ดังกล่าว จึงมีการพัฒนาถังปฏิกรณ์เมมเบรนชีวภาพแบบให้แสง (Microalgal-Bacterial Membrane Photobioreactor: Photo-MBR) ซึ่งใช้กลุ่มจุลินทรีย์ผสมแบบพึ่งพาอาศัยระหว่างสาหร่ายขนาดเล็กและแบคทีเรีย กลไกหลักของระบบคือสาหร่ายผลิตออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO) ผ่านการสังเคราะห์แสง เพื่อให้แบคทีเรียใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งช่วยลดการพึ่งพาระบบเติมอากาศเชิงกล

ในระบบ Photo-MBR การลดลงของค่า COD สัมพันธ์กับกิจกรรมการย่อยสลายของแบคทีเรียและการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($\text{\$CO}_2\text{\$}$) สำหรับกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย (Muñoz and Guieysse, 2006; Malla et al., 2021) ขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัด TDN สะท้อนขีดความสามารถของกลไกพึ่งพาอาศัยในการดูดซึมและเปลี่ยนรูปธาตุอาหารเพื่อบรรเทาปัญหาการเกิดยูโทรฟิเคชัน (Su et al., 2011; Rada-Ariza et al., 2017) อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญของการเดินระบบ Photo-MBR คือการอุดตันของเมมเบรน (Membrane fouling) ซึ่งส่งผลให้ความดันข้ามเมมเบรน (Transmembrane Pressure: TMP) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด COD และ TDN ควบคู่กับการประเมินลักษณะการอุดตันของเมมเบรน เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมในการควบคุมเสถียรภาพและชะลอการอุดตันสำหรับการเดินระบบในระยะยาว

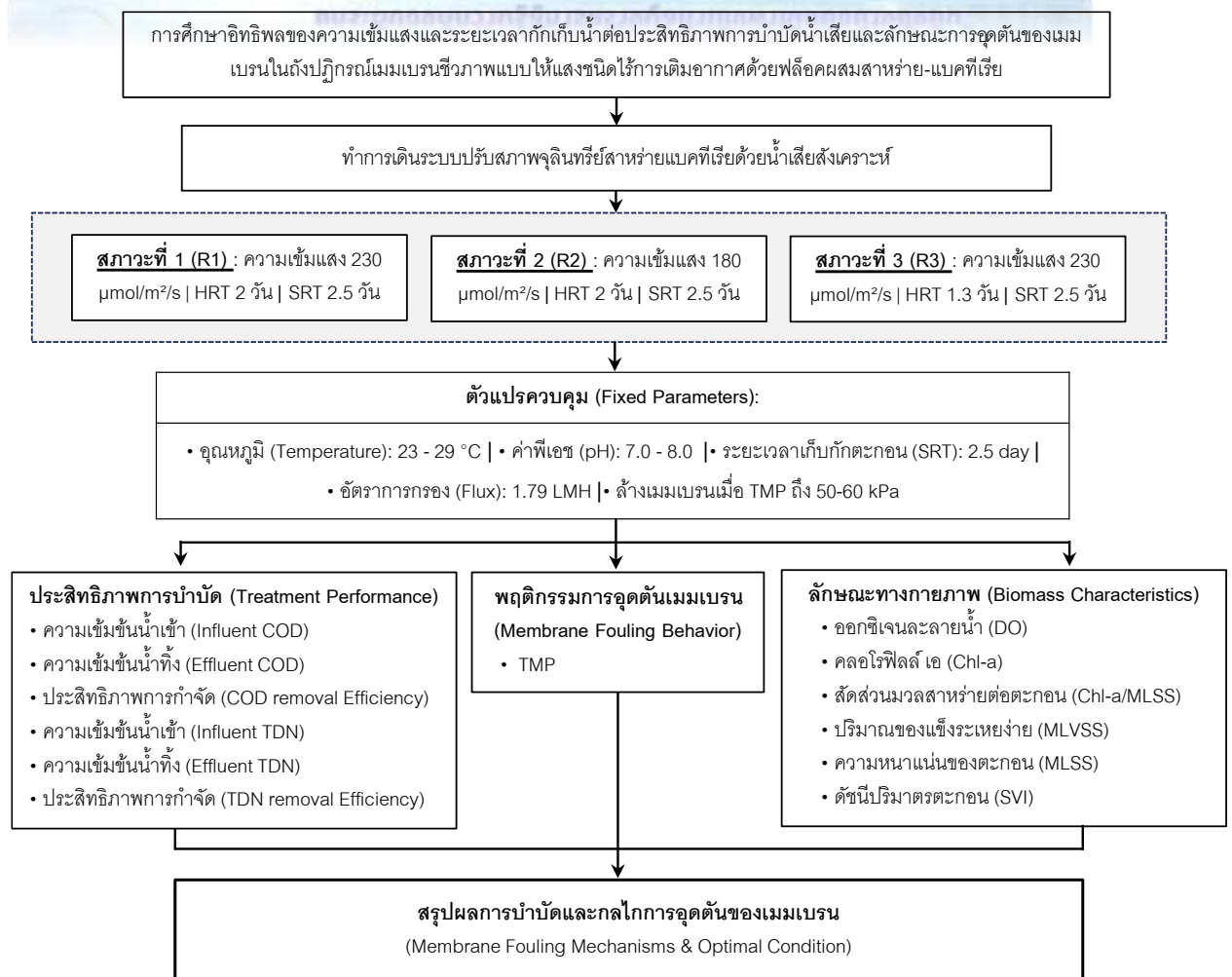
วัตถุประสงค์การวิจัย (Objectives)

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มแสงและระยะเวลาเก็บน้ำ (HRT) ต่อสมรรถนะการกำจัดสารอินทรีย์ (COD) และไนโตรเจนละลายรวม (TDN) ในระบบ Photo-MBR
2. เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางชีวภาพและอัตราการเกิดการอุดตันของเมมเบรน (dTMP/dt) ภายใต้สภาวะปฏิบัติการที่แตกต่างกัน

อุปกรณ์และวิธีการ

กรอบการทดลอง

การศึกษานี้กำหนดระยะเวลาเก็บกักตะกอน (SRT) 2.5 วัน เพื่อควบคุมมวลชีวภาพ (MLSS) และลดการสะสมสารละลายจุลินทรีย์ (Soluble Microbial Products: SMP) รวมถึงเศษเซลล์ที่ก่อให้เกิดการอุดตัน ความเข้มแสงกำหนดที่ $180 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสม (Optimal PAR) ต่อการสังเคราะห์แสง เปรียบเทียบกับ $230 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ ซึ่งเกินจุดอิ่มตัวของแสง ทำให้เกิดภาวะยับยั้งการสังเคราะห์แสง (Photoinhibition) (Carvalho et al., 2011; Praveen and Loh, 2016) และกระตุ้นการหลั่งสารพอลิเมอร์ชีวภาพนอกเซลล์ (Extracellular Polymeric Substances: EPS) ที่เร่งการเกิดชั้นเค้กบนเมมเบรน (Wang et al., 2009; Sheng et al., 2010) ส่วนระยะเวลาเก็บกักเซลล์ (HRT) กำหนดที่ 2 วัน เพื่อให้จุลินทรีย์มีเวลาทำปฏิกิริยาเพียงพอ และปรับลดเหลือ 1.3 วัน เพื่อเปรียบเทียบความทนทานต่อการสะสมสารอินทรีย์สูง และปรากฏการณ์ชะล้างจุลินทรีย์ (Washout effect)



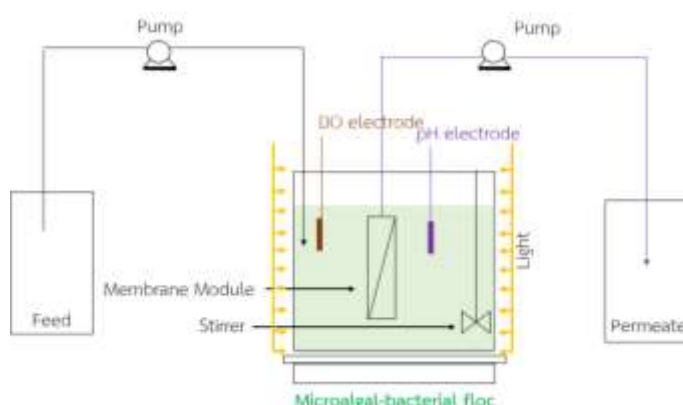
ภาพที่ 1 กรอบการทดลอง

วิธีการดำเนินงานวิจัย (Experimental Procedures)

การเดินระบบ Photo-MBR ดำเนินการในถังปฏิกรณ์แบบโปร่งใสแบบต่อเนื่อง ปริมาตรใช้งานเท่ากับ 4 ลิตร ติดตั้ง Overhead Stirrer ในถังปฏิกรณ์ น้ำเสียเข้าและออกระบบโดยใช้ปั๊ม Peristaltic สูบน้ำเข้า-ออก ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (23 - 29 °C) และพีเอชในถังปฏิกรณ์ระหว่าง 6.5 - 7.5 เมมเบรนที่ใช้เป็นแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber) (ZW-1, GE Water And Power, Canada) ขนาดรูพรุนของเมมเบรน (Pore Size) เท่ากับ 0.04 ไมโครเมตร ชนิดของเมมเบรนที่ใช้ คือ Polyvinylidene Fluoride (PVDF) เมมเบรนถูกติดตั้งแบบจมตัวในถังปฏิกรณ์ (Submerged Membrane) ชีดจำกัดของสภาวะที่ใช้ในการทดลองของเมมเบรนชีวภาพ โดยเริ่มจากการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ผสมและปรับสภาพระบบ (Acclimatization) ตั้งแต่วันที่ 0 ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ จากนั้นจึงทำการปรับเปลี่ยนสภาวะการทดลอง (Operating conditions) อย่างต่อเนื่องตามลำดับช่วงเวลา เพื่อประเมินอิทธิพลของความเข้มแสงและระยะเวลาเก็บน้ำ (HRT) โดยแบ่งออกเป็น 3 สภาวะหลัก แสดงดังตารางที่ 1 และภาพที่ 2

ตารางที่ 1 สภาวะการเดินระบบของถังปฏิกรณ์ Photo-MBR ตลอดระยะเวลาการทดลอง

สภาวะการทดลอง	ความเข้มแสง ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	ระยะเวลาเก็บน้ำ; HRT (วัน)	ระยะเวลาเก็บตะกอน, SRT (วัน)
R1 (วันที่ 0-19)	230	2	2.5
R2 (วันที่ 0-22)	180	2	2.5
R3 (วันที่ 0-22)	230	1.3	2.5



ภาพที่ 2 แผนภาพจำลองระบบ Photo-MBR สองถังคู่ขนาน แสดงตำแหน่งของเยื่อเมมเบรนและแหล่งกำเนิดแสงสำหรับการทดลองควบคุมระดับความเข้มแสง

กระบวนการวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ (Analytical Methods)

1.พารามิเตอร์ทางชีวภาพและสิ่งแวดล้อม: วิเคราะห์หิมวลชีวภาพ (MLSS, MLVSS) ตามมาตรฐาน APHA (Method 2540 D และ 2540 E) และปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (Chl-a) ด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี (APHA Method 10200 H) โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น BioDrop DUO, ยี่ห้อ BioDrop ควบคู่กับการตรวจวัดค่า DO, pH และอุณหภูมิด้วยชุดหัววัดแบบพกพา (Multi-parameter probes) รุ่น pH 150 จากยี่ห้อ Thermo Scientific Eutech

2.ประสิทธิภาพการบำบัด: วิเคราะห์คุณภาพน้ำเข้าเปรียบเทียบกับน้ำทิ้ง โดยวัดค่า COD ด้วยวิธี Closed reflux colorimetric (APHA Method 5220 D) ผ่านเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น BioDrop DUO, ยี่ห้อ BioDrop และเตาย่อยทำอุณหภูมิ รุ่น SX -700 ยี่ห้อ Tomy และวัดค่า TDN ด้วยการย่อยด้วยวิธี Persulfate Digestion เพื่อเปลี่ยนไนโตรเจนทั้งหมดให้เป็นไนเตรต (Nitrate) และวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น BioDrop DUO, ยี่ห้อ BioDrop

3.การประเมินการอุดตันทางชลศาสตร์: บันทึกค่าความดันข้ามเมมเบรน (TMP) ด้วยมาตรวัดความดันดิจิทัล และคำนวณอัตราการเกิดการอุดตันวิกฤต ($dTMP/dt$) จากความชัน (Slope) ระหว่างจุดความดันเริ่มต้นและจุดความดันสูงสุดในแต่ละรอบการกรอง (Meng et al., 2009)

4.การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (Statistical Analysis): ผลการทดลองนำมาวิเคราะห์และแสดงค่าในรูปของค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean $\pm$ SD) รวมทั้งทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสภาวะการปฏิบัติการ (Operational conditions) ด้วยสถิติ One-way ANOVA และ t-test โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ $p < 0.05$

ผลการวิจัยและอภิปรายผล (Results and Discussion)

ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์และธาตุอาหาร

ผลการประเมินสมรรถนะของระบบ Photo-MBR ในด้านการเจริญเติบโตของมวลชีวภาพ ประสิทธิภาพการย่อยสลายมลพิษ และสภาวะแวดล้อมภายในถังปฏิกรณ์ ภายใต้สภาวะสมดุล (Steady state) ของการเดินระบบทั้ง 3 สภาวะ ได้ถูกรวบรวมและนำมาแสดงผลเปรียบเทียบดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดบำบัดสารอินทรีย์และธาตุอาหาร ในการเดินระบบ Photo-MBR ภายใต้สภาวะการเดินระบบ R1- R3 ในช่วงสภาวะสมดุล (Steady State)

พารามิเตอร์ (Parameters)	ผลการวิเคราะห์สภาวะสมดุล (Steady state)		
	R1 (n = 8)	R2 (n = 9)	R3 (n = 10)
	Light 230, HRT 2d	Light 180, HRT 2d	Light 230, HRT 1.3d
ปริมาณของแข็งแขวนลอยรวม, MLSS (mg/L)	538.3 $\pm$ 46.3	395.6 $\pm$ 58.6	420.0 $\pm$ 185.6
ปริมาณของแข็งระเหยง่าย, MLVSS (mg/L)	479.2 $\pm$ 54.9	296.0 $\pm$ 87.1	394.0 $\pm$ 137.8
คลอโรฟิลล์ เอ, Chl-a (mg/L)	1.20 $\pm$ 0.45	0.80 $\pm$ 0.16	0.30 $\pm$ 0.08
สัดส่วน มวลสาหร่ายต่อตะกอน, Chl-a/MLSS (mg/gSS)	2.30 $\pm$ 0.78	2.20 $\pm$ 0.10	0.50 $\pm$ 0.15
ความเข้มข้นน้ำเข้า, Influent COD (mg/L)	994.1 $\pm$ 44.1	952.3 $\pm$ 33.4	977.9 $\pm$ 21.4
ความเข้มข้นน้ำทิ้ง, Effluent COD (mg/L)	51.2 $\pm$ 5.7	24.3 $\pm$ 8.3	43.5 $\pm$ 21.4
ประสิทธิภาพการกำจัด, Removal Efficiency (%)	94.8 $\pm$ 0.7	97.5 $\pm$ 0.8	95.6 $\pm$ 2.2
ความเข้มข้นน้ำเข้า, Influent TDN (mg/L)	73.9 $\pm$ 2.5	73.0 $\pm$ 1.9	74.3 $\pm$ 1.1
ความเข้มข้นน้ำทิ้ง, Effluent TDN (mg/L)	11.7 $\pm$ 3.4	9.0 $\pm$ 1.7	13.8 $\pm$ 3.1
ประสิทธิภาพการกำจัด, Removal Efficiency (%)	85.0 $\pm$ 4.9	87.8 $\pm$ 2.1	81.5 $\pm$ 4.12
ออกซิเจนละลายน้ำ, DO (mg/L)	7.6 $\pm$ 1.0	6.8 $\pm$ 0.9	8.5 $\pm$ 3.7
ความเป็นกรด-ด่าง, pH	7.8 $\pm$ 0.3	7.6 $\pm$ 0.2	8.2 $\pm$ 0.7
อุณหภูมิ, Temperature ($^{\circ}$ C)	27.0 $\pm$ 0.2	25.9 $\pm$ 0.2	26.5 $\pm$ 0.7

หมายเหตุ: ในแต่ละสภาวะจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำและวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล (Steady state) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นตัวแทนของสภาวะนั้น ๆ

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 2 พบว่า ระบบมีความสามารถในการรับอัตราภาระสารอินทรีย์ (Organic loading rate) ในระดับสูง ทั้ง 3 สภาวะ (R1, R2 และ R3) มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี (COD) ร้อยละ 94.8 $\pm$ 0.7 ถึง 97.5 $\pm$ 0.8 และประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน (TDN) ร้อยละ 78.8 $\pm$ 7.1-87.8 $\pm$ 2.1

ทั้งนี้ เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกลไกการตอบสนองของระบบต่อปัจจัยแวดล้อม สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้:

อิทธิพลของการลดความเข้มแสง (สภาวะ R1 เปรียบเทียบกับ R2): ภายใต้ระยะเวลาเก็บกักเซลล์ศาสตร์ (HRT) 2 วัน เมื่อลดความเข้มแสงจาก $230 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ (สภาวะ R1) เป็น $180 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ (สภาวะ R2) พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากร้อยละ 94.8 เป็น 97.5 ($p < 0.05$) (ความเข้มข้น COD น้ำเข้าและน้ำออกของสภาวะ R1 เท่ากับ 994.1 และ 51.2 mg/L ส่วนสภาวะ R2 เท่ากับ 952.3 และ 24.3 mg/L ตามลำดับ) ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัด TDN มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 85.0 เป็น 87.8 แต่ผลการทดสอบทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ความเข้มข้น TDN น้ำเข้าและน้ำออกของสภาวะ R1 เท่ากับ 73.9 และ 11.7 mg/L ส่วนสภาวะ R2 เท่ากับ 73.0 และ 9.0 mg/L ตามลำดับ)

ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ (COD) ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในสภาวะ R2 เป็นผลจากการลดปรากฏการณ์การบดบังแสงระหว่างเซลล์ (Self-shading effect) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของแข็งแขวนลอยรวม (MLSS) ในสภาวะ R1 (538.3 mg/L) ที่มีค่าสูงกว่าสภาวะ R2 (395.6 mg/L) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ปริมาณมวลชีวภาพที่หนาแน่นในสภาวะ R1 กีดขวางการส่องผ่านของแสง ทำให้สาหร่ายในระบบได้รับแสงไม่ทั่วถึงและตอบสนองต่อแสงได้น้อยลง การลดความเข้มแสงลง $50 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ จึงช่วยรักษาสสมดุลของมวลชีวภาพและลดการบดบังแสง อย่างไรก็ตาม หากใช้ความเข้มแสงในระดับที่ต่ำจนเกินไป อาจส่งผลให้พลังงานไม่เพียงพอต่อการส่งเสริมการเจริญเติบโตของสาหร่ายในระบบได้เช่นกัน

อิทธิพลของการลดระยะเวลาเก็บกักเซลล์ศาสตร์ (สภาวะ R1 เปรียบเทียบกับ R3):

ภายใต้ความเข้มแสง $230 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ การลดระยะเวลาเก็บกักเซลล์ศาสตร์ (HRT) จาก 2 วัน (สภาวะ R1) ลงเหลือ 1.3 วัน (สภาวะ R3) ซึ่งทำให้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate: OLR) เพิ่มขึ้น พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD และ TDN ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยประสิทธิภาพการกำจัด COD ของสภาวะ R1 และ R3 อยู่ที่ร้อยละ 94.8 และ 95.6 (ความเข้มข้นน้ำออก 51.2 และ 43.5 mg/L ตามลำดับ) ส่วนประสิทธิภาพการกำจัด TDN อยู่ที่ร้อยละ 85.0 และ 81.5 (ความเข้มข้นน้ำออก 11.7 และ 13.8 mg/L ตามลำดับ)

การที่ระบบสามารถรักษาประสิทธิภาพการบำบัดไว้ได้โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติเป็นผลจากความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยที่สมดุล สำหรับการกำจัด COD แบบที่เรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟยังคงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ตามปกติ เนื่องจากได้รับออกซิเจนละลายน้ำ (DO) เพียงพอจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ซึ่งอาศัยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่แบคทีเรียปล่อยออกมาเป็นสารตั้งต้น

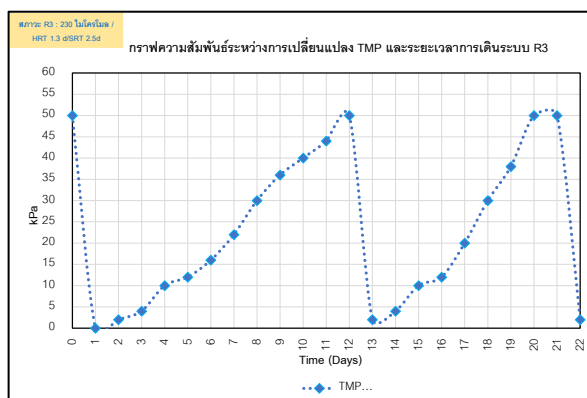
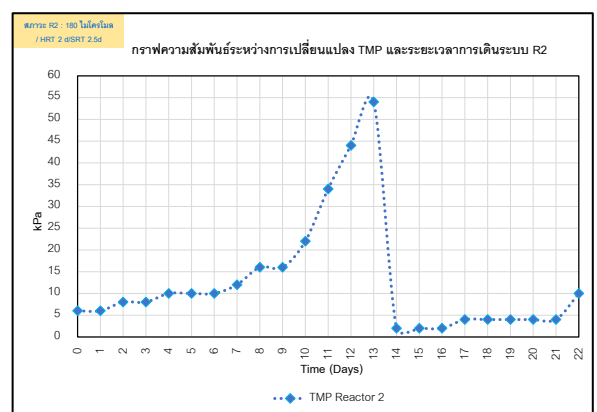
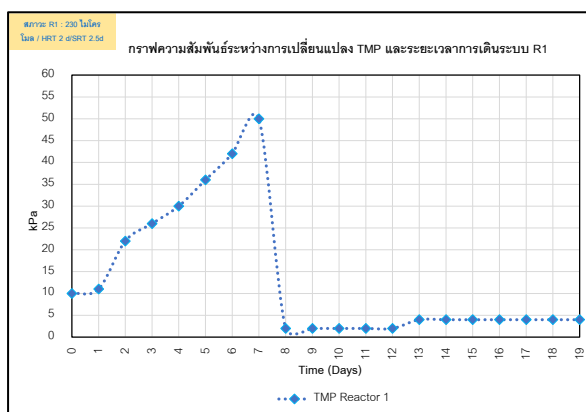
ในส่วนของการกำจัด TDN ระบบอาศัยกระบวนการดูดซึมธาตุอาหารโดยสาหร่าย (Algal assimilation) เพื่อนำไปสร้างเซลล์เป็นกลไกหลัก ประกอบกับกระบวนการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนโดยแบคทีเรียกลุ่มไนโตริไฟอิงซึ่งมีจลนพลศาสตร์ (Kinetics) การเจริญเติบโตที่ช้ากว่ากลุ่มย่อยสลายสารอินทรีย์ แม้ระยะเวลากักเก็บน้ำจะลดลง แต่การที่สาหร่ายยังคงได้รับ CO_2 จากกิจกรรมของแบคทีเรียอย่างต่อเนื่อง ทำให้กระบวนการสังเคราะห์แสงและการดูดซึมสารประกอบไนโตรเจนยังคงดำเนินไปได้ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดมลพิษทั้งสารอินทรีย์และธาตุอาหารโดยรวมยังคงมีเสถียรภาพ และไม่ได้รับผลกระทบทางสถิติแม้ภายใต้สภาวะที่มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงขึ้น

การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางชีวภาพและพลวัตการอุดตันของเมมเบรน

พฤติกรรมทางพลศาสตร์และพลวัตการเกิดการอุดตันวิกฤต (Critical fouling rate) ของเมมเบรนตลอดระยะเวลาการเดินระบบแต่ละสภาวะ สามารถพิจารณาได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันข้ามเมมเบรนต่อเวลา (dTMP/dt) รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3 และภาพที่ 3

ตารางที่ 3 อัตราการเกิดการอุดตันของเมมเบรนแบบจุดสูงสุด (dTMP/dt)

สภาวะการทดลอง (Condition)	รอบการกรอง (Filtration Cycle)	วันที่เริ่มต้น → วันที่เกิดจุดยอด (Start → Peak Day)	ช่วงความดันที่จุดยอด (Start → Peak TMP, kPa)	อัตราการอุดตัน (kPa/day)	อัตราการอุดตันเฉลี่ย (Average, kPa/day)
R1 (Light 230, HRT 2d)	รอบที่ 1	0 → 7 (7 วัน)	22 → 50	5.6	5.6
R2 (Light 180, HRT 2d)	รอบที่ 1	0 → 13 (13 วัน)	6 → 54	3.69	3.69
R3 (Light 230, HRT 1.3d)	รอบที่ 1	0 → 12 (12 วัน)	0 → 50	4.55	5.71
	รอบที่ 2	13 → 20 (7 วัน)	2 → 50	6.86	



ภาพที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง TMP และระยะเวลาการเดินระบบ R1-R3

การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางชีวภาพมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพฤติกรรมการอุดตันของเมมเบรน (Membrane fouling) ดังรายละเอียดต่อไปนี้:

เสถียรภาพของระบบภายใต้สภาวะการลดความเข้มข้น (สภาวะ R1 เปรียบเทียบกับ R2): ภายใต้ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์และระยะเวลาเก็บน้ำ (HRT) 2 วันที่เท่ากัน การลดความเข้มข้นจาก $230 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (สภาวะ R1) เป็น $180 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (สภาวะ R2) ทำให้อัตราการอุดตันของเมมเบรนเฉลี่ยลดลงจาก $5.60 \text{ kPa}/\text{day}$ เป็น $3.69 \text{ kPa}/\text{day}$ สาเหตุเนื่องจากความเข้มข้นระดับ $230 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ในสภาวะ R1 ส่งเสริมการเจริญเติบโตของสาหร่ายและกลุ่มจุลินทรีย์ ทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยรวม (MLSS) และคลอโรฟิลล์ เอ (Chl-a) มีค่า $538.3 \pm 46.3 \text{ mg}/\text{L}$ และ $1.20 \pm 0.45 \text{ mg}/\text{L}$ ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าสภาวะ R2 (MLSS $395.6 \pm 58.6 \text{ mg}/\text{L}$) ปริมาณ MLSS ที่สูงขึ้นในสภาวะ R1 ทำให้ของเหลวผสม (Mixed liquor) มีความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของแรงเฉือน (Shear force) จากการขัดล้างด้วยฟองอากาศ (Air scouring) บริเวณผิวหน้าเมมเบรนลดลง ประกอบกับมีอนุภาคแขวนลอยและเซลล์จุลินทรีย์จำนวนมาก จึงเร่งการก่อตัวของชั้นเค้ก (Cake layer) บนเมมเบรน เป็นสาเหตุให้อัตราการอุดตันของเมมเบรนในสภาวะ R1 จึงมีค่า $5.60 \text{ kPa}/\text{day}$ โดยใช้เวลาการกรองในรอบแรก 7 วัน ก่อนที่ความดันข้ามเมมเบรนจะถึงค่าสูงสุด (Peak TMP 50 kPa) ในขณะที่สภาวะ R2 สามารถควบคุมปริมาณมวลชีวภาพให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกว่า ทำให้อัตราการอุดตันเฉลี่ยลดลงเหลือ $3.69 \text{ kPa}/\text{day}$ และสามารถยืดระยะเวลาของรอบการกรองออกไปได้ถึง 13 วัน

อิทธิพลของการลดระยะเวลาเก็บกักกลศาสตร์ต่อลักษณะทางชีวภาพและการอุดตันของเมมเบรน (สภาวะ R1 เปรียบเทียบกับ R3): ภายใต้ความเข้มข้น $230 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ เมื่อลดระยะเวลาเก็บกักกลศาสตร์ (HRT) จาก 2 วัน (สภาวะ R1) เหลือ 1.3 วัน (สภาวะ R3) พบว่าอัตราการอุดตันของเมมเบรนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 5.60 เป็น $5.71 \text{ kPa}/\text{day}$ มีสาเหตุหลักมาจากการลด HRT ทำให้เกิดปรากฏการณ์ชะล้างจุลินทรีย์ (Washout effect) โดยเฉพาะกลุ่มสาหร่าย ส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (Chl-a) ลดลงจาก $1.20 \pm 0.45 \text{ mg}/\text{L}$ เหลือ $0.30 \pm 0.08 \text{ mg}/\text{L}$ และสัดส่วนมวลสาหร่ายต่อตะกอนจุลินทรีย์ (Chl-a/MLSS) ลดลงจาก 2.30 เหลือ $0.50 \text{ mg}/\text{gSS}$ การลดลงของสาหร่ายส่งผลให้โครงสร้างกลุ่มตะกอนจุลินทรีย์ (Algal-bacterial flocs) ขาดความคงตัวและเกิดการแตกสลาย (Deflocculation) แม้ว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยรวม (MLSS) ในสภาวะ R3 จะลดลงเหลือ $420.0 \pm 185.6 \text{ mg}/\text{L}$ ซึ่งต่ำกว่าสภาวะ R1 ($538.3 \pm 46.3 \text{ mg}/\text{L}$) แต่อัตราการอุดตันกลับสูงขึ้น เนื่องจากระบบได้รับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate: OLR) เพิ่มขึ้นจากการลด HRT ทำให้เกิดสภาวะช็อก (Shock load) จุลินทรีย์จึงตอบสนองด้วยการหลั่งสารพอลิเมอร์ชีวภาพนอกเซลล์ (Extracellular Polymeric Substance: EPS) และสารอินทรีย์ละลายน้ำ (Soluble Microbial Products: SMP) เพิ่มขึ้น สารเหล่านี้ร่วมกับเศษเซลล์ (Cell debris) จากการแตกสลายของตะกอน เข้าไปอุดตันรูพรุนของเมมเบรน (Pore blocking) ทำให้อัตราการอุดตันเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะในรอบการกรองที่ 2 ของสภาวะ R3 ซึ่งมีอัตราการอุดตันถึง $6.86 \text{ kPa}/\text{day}$



สรุปผลการทดลอง (Conclusions)

จากการศึกษาอิทธิพลของความเข้มแสงและระยะเวลาเก็บกักเซลล์ศาสตร์ (HRT) ต่อระบบ Photo-MBR สรุปได้ว่า สภาวะ R2 ($180 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, HRT 2 วัน) เป็นสภาวะปฏิบัติการที่เหมาะสมที่สุด โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD และ TDN สูงสุดที่ร้อยละ 97.5 และ 87.8 ตามลำดับ และมีอัตราการดูดซับของเมมเบรนต่ำที่สุด ($3.69 \text{ kPa}/\text{day}$) ในทางกลับกัน การใช้ความเข้มแสงระดับสูง (สภาวะ R1: $230 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) จะไปกระตุ้นมวลชีวภาพให้หนาแน่นจนเร่งอัตราการดูดซับให้สูงขึ้น ($5.60 \text{ kPa}/\text{day}$) นอกจากนี้ การปรับลด HRT ลงเหลือ 1.3 วัน (สภาวะ R3) ก่อให้เกิดสภาวะช็อกทางภาระสารอินทรีย์และปรากฏการณ์ชะล้างจุลินทรีย์ (Washout effect) ซึ่งลดทอนประสิทธิภาพการกำจัด TDN ลงเหลือร้อยละ 81.5 และทำให้เมมเบรนเกิดการอุดตันอย่างรุนแรงและรวดเร็วขึ้น ($5.71 \text{ kPa}/\text{day}$)

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgment)

งานวิจัยได้รับงบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปี งบประมาณ พ.ศ. 2568 จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



เอกสารอ้างอิง (References)

- APHA, AWWA, WEF. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, Washington, DC.
- Carvalho, A. P., Silva, S. O., Baptista, J. M., & Malcata, F. X. (2011). Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects. *Environmental Chemistry Letters*, 89(5), 1275-1288.
- Malla, F. A., et al. (2021). Microalgal-bacterial consortia for wastewater treatment and biomass production: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(1), 535-552.
- Meng, F., Chae, S. R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H. S., & Yang, F. (2009). Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material. *Water Research*, 43(6), 1489-1512.
- Muñoz, R., & Guieysse, B. (2006). Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. *Water Research*, 40(15), 2799-2815.
- Praveen, P., & Loh, K. C. (2016). Nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater using microalgae-bacterial symbiosis in a photobioreactor: Effect of light intensity and HRT. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 113, 137-145.
- Rada-Ariza, A. M., et al. (2017). Microalgal-bacterial consortia for the treatment of high-strength nitrogen wastewaters: A review. *Algal Research*, 28, 11-20.
- Sheng, G. P., Yu, H. Q., & Li, X. Y. (2010). Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: A review. *Biotechnology Advances*, 28(6), 882-894.
- Su, Y., et al. (2011). Wastewater treatment using microalgae: how realistic a contribution might it be to significant urban wastewater treatment. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 92(3), 555-568.
- Wang, Z., Wu, Z., & Tang, S. (2009). Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Water Research*, 43(9), 2504-2512.



การพัฒนาหลักเกณฑ์การประกันคุณภาพหลักสูตรการฝึกอบรมของกรมสุขภาพจิต Development of Quality Evaluation Criteria for Training Programs of the Department of Mental Health

นิชาภา รัตนจันทร์¹ เกศกาญจน์ เกศวายุทธ² และ ปริญวิทย์ นูราช³

Nichapha Rattanajan¹, Kasekarn Kasevayuth², & Pariyawit Nurash³

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) พัฒนาเกณฑ์การประกันคุณภาพหลักสูตรฝึกอบรมของกรมสุขภาพจิต และ (2) ตรวจสอบความเหมาะสมของเกณฑ์ที่พัฒนา กลุ่มตัวอย่างคือผู้เชี่ยวชาญการพัฒนาหลักสูตรและการจัดฝึกอบรม จำนวน 28 คน เลือกแบบเจาะจงและการสุ่มแบบสนับทึบ เครื่องมือที่ใช้คือแบบสอบถามปลายเปิดและปลายปิดและแบบมาตราประมาณค่า 5 ระดับ เก็บรวบรวมข้อมูลด้วยเทคนิคเดลฟายแบบปรับปรุง จำนวน 3 รอบ วิเคราะห์ข้อมูลด้วย ความถี่ ร้อยละ ค่ามัธยฐาน ค่าพิสัยระหว่างควอไทล์ (IQR) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายในชั้น (ICC) และทดสอบค่าที (t-test) เพื่อเปรียบเทียบความคิดเห็นระหว่างกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ ผลการวิจัยพบว่า หลักเกณฑ์การประกันคุณภาพหลักสูตรฝึกอบรมของกรมสุขภาพจิต 7 ด้าน 60 ข้อแบ่งที่ ประกอบด้วย (1) ด้านความสอดคล้องกับวิสัยทัศน์ พันธกิจ ยุทธศาสตร์องค์กร (2) ด้านหลักสูตร/หัวข้อการฝึกอบรม (3) ด้านคุณภาพของเจ้าหน้าที่ฝึกอบรม (4) ด้านการประเมินผลและการติดตามปรับปรุงหลักสูตร (5) ด้านการบริหารจัดการ (6) ด้านผู้เข้าร่วมอบรม/ กลุ่มเป้าหมาย และ (7) ด้านคุณธรรม/ จริยธรรม ข้อบ่งชี้ส่วนใหญ่มีค่ามัธยฐานอยู่ในระดับสูง (5.00) ค่าพิสัยระหว่างควอไทล์อยู่ในช่วงต่ำแสดงถึงความเห็นพ้องที่ดีและมีค่าร้อยละของคะแนนระดับ 4 - 5 อยู่ในระดับสูง นอกจากนี้ การทดสอบค่าทีพบว่า ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญทั้งสองกลุ่มไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทุกข้อบ่งชี้ และค่า ICC แสดงถึงความสอดคล้องของผู้เชี่ยวชาญในระดับดีมาก (ICC = 0.940)

คำสำคัญ: การประกันคุณภาพ การพัฒนาหลักสูตรฝึกอบรม เทคนิคเดลฟาย กรมสุขภาพจิต

¹ สาขาวิชาการศึกษาวชิราวุธสุขภาพ คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อีเมล: nan.rattanajan@gmail.com
Master of Science Program in Health Professions Education Faculty of Medicine, Chulalongkorn University

² คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Faculty of Dentistry, Chulalongkorn University

³ มูลนิธิทันตนวัตกรรมในพระบรมราชูปถัมภ์หน่วยทันตกรรมพระราชทานในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว
Dental innovation foundation under royal patronage



Abstract

The objectives of this research were: (1) to develop quality assurance criteria for training programs of the Department of Mental Health, and (2) to examine the appropriateness of the criteria. The participants included 28 experts in curriculum development and training management, selected through purposive and snowball sampling. A three-round modified Delphi technique was employed. Research instruments comprised open-ended and closed-ended questionnaires, and a 5-point Likert scale. Data were analyzed using frequency, percentage, median, interquartile range (IQR), Intraclass Correlation Coefficient (ICC), and independent samples t-test. The results revealed that the quality assurance criteria consisted of 7 domains and 60 indicators: (1) Strategic alignment, (2) Curriculum topics, (3) Personnel quality, (4) Evaluation, (5) Management, (6) Trainee groups, and (7) Ethics. Most indicators showed high median scores (5.00) and low IQR, signifying strong consensus. High agreement at levels 4–5 reflected the criteria's appropriateness. The t-test showed no significant differences in opinions between expert groups across all indicators, while the ICC confirmed excellent inter-rater agreement (0.940).

Keywords: quality assurance, training programs, Delphi technique, Department of Mental Health

บทนำ (Introduction)

กรมสุขภาพจิตเป็นองค์กรหลักด้านสุขภาพจิตของประเทศ เพื่อประชาชนมีสุขภาพจิตดีสูงสุดและเศรษฐกิจมูลค่าสูง สนับสนุนการพัฒนาระบบสุขภาพจิตครอบคลุมทุกมิติในทุกระดับของบริการสุขภาพ พัฒนาศักยภาพและนวัตกรรม งานวิชาการ และงานวิจัย โดยศึกษา วิจัย และพัฒนาศักยภาพรวมถึงนวัตกรรมด้านสุขภาพจิต เพื่อยกระดับการบริการและพัฒนาบุคลากร ส่งเสริมและสนับสนุนการพัฒนาศักยภาพของบุคลากรด้านสุขภาพจิตให้มีคุณภาพและเพียงพอต่อความต้องการในการรับบริการของประชาชน หนึ่งในบทบาทการดำเนินงานดังกล่าวจึงมีความเกี่ยวข้องกับการสร้างหลักสูตรการฝึกอบรมขึ้นเพื่อพัฒนาบุคลากรทางสุขภาพจิตให้มีคุณภาพและประสิทธิภาพสำหรับการดูแลสุขภาพจิตและจิตเวชของประชาชน (กรมสุขภาพจิต, 2568) หลักสูตรการฝึกอบรมของกรมสุขภาพจิตสามารถแบ่งประเภทตามกลุ่มเป้าหมาย คือ 1) หลักสูตรการฝึกอบรมสำหรับบุคลากรทางการแพทย์และสาธารณสุขและ 2) หลักสูตรการฝึกอบรมสำหรับประชาชนทั่วไป

หลักสูตรการฝึกอบรมเป็นแผนการจัดการการเรียนรู้ที่มีโครงสร้างและมีระบบชัดเจน ประกอบด้วยวัตถุประสงค์ เนื้อหา วิธีการหรือกิจกรรมการเรียนรู้ ทรัพยากรที่ใช้ และกระบวนการประเมิน ไม่ได้เป็นกิจกรรมทั่วไปที่เกิดขึ้นโดยไม่มีจุดประสงค์แต่จะต้องเป็นกระบวนการที่มีการออกแบบอย่างเป็นระบบ (McGehee & Thayer, 2004) โดยออกแบบมาเพื่อพัฒนาความรู้ ทักษะ และสมรรถนะเฉพาะด้านของผู้เข้ารับการฝึกอบรมให้สอดคล้องกับความต้องการจำเป็น (Training Needs) และเป้าหมายขององค์กร



หรือหน่วยงาน สามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในบริบทการทำงาน เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการทำงานไปในทิศทางเชิงบวกและคุณภาพตามที่ต้องการ (McWilliam & Singh, 2002; Pfund et al., 2013)

การประกันคุณภาพหลักสูตรการฝึกอบรมเป็นระบบที่มีกระบวนการปฏิบัติอย่างต่อเนื่องที่จะทำให้มั่นใจได้ว่าหลักสูตรการฝึกอบรมที่พัฒนาขึ้นมีคุณภาพตามเกณฑ์ที่กำหนด โดยมีวัตถุประสงค์เฉพาะเจาะจง และมีระยะเวลากำกับเพื่อให้มั่นใจว่าหลักสูตรมีมาตรฐานตามที่กำหนด สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียอย่างมีประสิทธิภาพ การประเมินเพื่อประกันคุณภาพที่ดีควรมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาคุณภาพ (Improvement) มากกว่าการพิสูจน์ (Prove) (Stufflebeam, 2003) คุณลักษณะของหลักเกณฑ์การประกันคุณภาพหลักสูตรการฝึกอบรม ต้องมีความชัดเจน เข้าใจง่าย วัดได้ ไม่คลุมเครือ สอดคล้องเชื่อมโยงต่อวัตถุประสงค์บริบทองค์กร มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริงตามบริบทของหน่วยงานและความเหมาะสมกับทรัพยากรที่มีอยู่ และอยู่บนข้อมูลเชิงประจักษ์ (ศิริชัย กาญจนวาสี, 2550) การสร้างเกณฑ์การประกันคุณภาพหลักสูตรการฝึกอบรม ประกอบด้วย 2 หลักการสำคัญ ได้แก่ 1. การสร้างเกณฑ์ที่ยึดตามวัตถุประสงค์ของหลักสูตร (Tyler & Hlebowitsh, 2013) เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการตรวจสอบว่าผู้เข้ารับการอบรมได้บรรลุผลลัพธ์ตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ซึ่งต้องมีการกำหนดวัตถุประสงค์ที่มีความเฉพาะเจาะจงและวัดผลได้ในเชิงประจักษ์ (Doran, 1981) 2. สร้างตามรูปแบบการประเมินที่เป็นมาตรฐานและเป็นที่ยอมรับในระดับสากลเพื่อกำหนดกรอบแนวทางในการบริหารจัดการหลักสูตรให้มีความเป็นระบบและชัดเจน (สำนักงานคณะกรรมการข้าราชการพลเรือน, 2567) ซึ่งการมีเกณฑ์ประกันคุณภาพที่ชัดเจนนี้จะช่วยยกระดับมาตรฐานคุณภาพของหลักสูตรให้เป็นไปตามมาตรฐานการจัดการศึกษายุคใหม่ (Nguyen et al., 2021) เป็นการส่งเสริมการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ดำเนินการวิเคราะห์หลักสูตรได้อย่างเป็นรูปธรรมและนำข้อมูลที่ได้จากการประเมินมาใช้วิเคราะห์จุดแข็งจุดอ่อนของหลักสูตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Kirkpatrick & Kirkpatrick, 2016). อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมความโปร่งใสและการตรวจสอบได้สะท้อนถึงแนวคิดการบริหารตามหลักธรรมาภิบาล ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบประกันคุณภาพที่มุ่งเน้นความรับผิดชอบต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสียและการมีระบบข้อมูลที่ตรวจสอบย้อนกลับ (ASEAN University Network, 2018) รวมถึงข้อมูลจากการประเมินยังเป็นเครื่องมือสำคัญในการสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหารหรือผู้อำนวยการหลักสูตรในประเด็นสำคัญต่างๆ ได้อย่างเป็นรูปธรรม (Fitzpatrick et al., 2012) ดังนั้นองค์กรที่มีบทบาทหน้าที่ในกาจัดทำหลักสูตรฝึกอบรมจึงจำเป็นต้องพัฒนาหลักเกณฑ์เพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพซึ่งเปรียบเสมือนเครื่องมือมาตรฐานหรือแนวทางปฏิบัติที่ถูกกำหนดขึ้น (ทองอุไร และ สุคนธ์ทรัพย์, 2533) สำหรับใช้ในการวัด ตรวจสอบ และตัดสินคุณภาพผลลัพธ์ของหลักสูตรให้เป็นไปตามเป้าหมาย (บุญเดิม ชัยชนะ, 2543)

จากหนึ่งในบทบาทหน้าที่ของกรมสุขภาพจิต ที่ได้มีพันธะสัญญาในการดำเนินงานเกี่ยวกับการพัฒนาศักยภาพบุคลากรที่ดำเนินงานด้านการดูแลสุขภาพจิตของประชาชน เพื่อสร้างบุคลากรที่มีคุณภาพให้ได้ตามหลักเกณฑ์การประกันคุณภาพสภานั้น ผู้วิจัยจึงต้องการค้นหาคำตอบสำคัญสำหรับการพัฒนาหลักเกณฑ์การประกันคุณภาพหลักสูตรการฝึกอบรมของกรมสุขภาพจิตจากผู้เชี่ยวชาญ

วัตถุประสงค์ (Objective)

1. เพื่อพัฒนาเกณฑ์การประกันคุณภาพหลักสูตรฝึกอบรมของกรมสุขภาพจิต
2. เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของเกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นจากผู้เชี่ยวชาญ



อุปกรณ์และวิธีการ (Materials and Method)

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงพัฒนาที่ประยุกต์ใช้เทคนิคเดลฟายแบบปรับปรุง เพื่อพัฒนาและตรวจสอบความเหมาะสมของหลักเกณฑ์การประกันคุณภาพหลักสูตรฝึกอบรมของกรมสุขภาพจิต โดยการรวบรวมความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ผู้เชี่ยวชาญด้านการพัฒนาหลักสูตร และกลุ่มที่ 2 ผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดฝึกอบรมที่มีประสบการณ์อย่างน้อย 3 ปี จำนวน 28 คน ทั้งนี้ การดำเนินการวิจัยยังคงยึดมั่นในหลักการพื้นฐานของเทคนิคเดลฟาย ได้แก่ การเก็บข้อมูลซ้ำเป็นรอบ (Iterative Rounds) การรักษาความเป็นนิรนาม (Anonymity) ของผู้เชี่ยวชาญ และการให้ข้อมูลป้อนกลับอย่างเป็นระบบ (Controlled Feedback) ในแต่ละรอบการสำรวจ ดำเนินการทั้งสิ้น 3 รอบ ดังนี้

รอบที่ 1 ผู้วิจัยดำเนินการนำแบบสอบถามชุดที่ 1 ซึ่งเป็นแบบสอบถามปลายเปิดและปลายปิดที่ทำการสร้างขึ้นจากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ศึกษาและสังเคราะห์ขึ้นเป็นแบบสอบถามหลักเกณฑ์การประกันคุณภาพหลักสูตรการฝึกอบรมของกรมสุขภาพจิต ดำเนินการตรวจสอบเครื่องมือโดยผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 คน และนำเสนอให้ผู้เชี่ยวชาญทั้งสิ้น 30 คน เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญพิจารณาเกี่ยวกับเกณฑ์ในแต่ละข้อบ่งชี้ที่นำเสนอ พร้อมทั้งเปิดโอกาสให้ผู้เชี่ยวชาญแสดงความคิดเห็นเพิ่มเติมผ่านคำถามปลายเปิด จากนั้นผู้วิจัยรับแบบสอบถามกลับ ซึ่งมีผู้เชี่ยวชาญส่งแบบสอบถามกลับทั้งสิ้น 28 คน ผู้วิจัยทำการตรวจสอบความถูกต้องครบถ้วน รวบรวมความคิดเห็นวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนาพื้นฐาน ได้แก่ ค่าความถี่ ค่าร้อยละ โดยเกณฑ์ที่ได้รับความเห็นชอบให้นำไปใช้ในรอบที่ 2 คือ รายการเกณฑ์ที่ผู้เชี่ยวชาญเห็นพ้องกันเกินร้อยละ 80 นำผลการวิเคราะห์จัดสร้างแบบสอบถามในรอบที่ 2

รอบที่ 2 ผู้วิจัยส่งแบบสอบถามชุดที่ 2 ซึ่งเป็นแบบสอบถามปลายปิด แบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ได้แก่ มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย น้อยที่สุด เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญให้คะแนนน้ำหนักของระดับความเหมาะสมของข้อบ่งชี้ที่เป็นข้อมูลจากการปรับแก้ไขจากความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญในรอบที่ 1 ซึ่งมีเกณฑ์จำนวน 65 ข้อ จากนั้นผู้วิจัยทำการเก็บแบบสอบถาม นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้ ค่ามัธยฐาน ค่าพิสัยระหว่างควอไทล์ และ ค่าร้อยละของคะแนนระดับ 4 - 5 ของข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูล คำนวณค่าทางสถิติ และปรับแก้เพื่อใช้ในรอบที่ 3

รอบที่ 3 เป็นรอบการยืนยันอันดับตามมติ ผู้วิจัยใช้ข้อบ่งชี้จำนวน 60 ข้อเพื่อใช้ในแบบสอบถามชุดที่ 3 ซึ่งเป็นแบบสอบถามปลายปิด แบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ พร้อมรายงานผลค่าสถิติของการวิเคราะห์ผลครั้งที่ 2 คือ ค่ามัธยฐาน ค่าพิสัยระหว่างควอไทล์ ของคำถามแต่ละข้อและตำแหน่งที่ผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่านให้ไว้ในแบบสอบถามรอบที่ 2 เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญพิจารณาปรับเปลี่ยนหรือยืนยันคำตอบ ผู้วิจัยนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าสถิติ ใช้ค่ามัธยฐาน (Median) ค่าพิสัยระหว่างควอไทล์ (IQR) ค่าร้อยละของคะแนนระดับ 4 - 5 ประเมินผลความเห็นพ้องกันระหว่างผู้ประเมิน (Inter - rater Reliability) โดยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายในชั้น (Intraclass Correlation Coefficient: ICC) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละองค์ประกอบของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญทั้งสองกลุ่มด้วยการทดสอบค่าทีแบบสองกลุ่มอิสระ (Independent Samples T-Test)

ผลและวิจารณ์ (Result and Discussion)

จากการดำเนินการวิจัยเพื่อพัฒนาหลักเกณฑ์การประกันคุณภาพหลักสูตรฝึกการอบรมของ
กรมสุขภาพจิต สามารถนำเสนอผลการวิจัยได้ ดังตารางที่ 1 ดังนี้
ตารางที่ 1 แสดงผลความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญตามข้อบ่งชี้

ข้อที่	Mdn	IQR	%Agree ment (4–5)	M1	SD1	M2	SD2	t	p	ผลการพิจารณา
ด้านที่ 1 ด้านความสอดคล้องกับวิสัยทัศน์ พันธกิจ ยุทธศาสตร์องค์กร										
1.1	5.0	1.00	100.0%	4.79	0.43	4.64	0.50	0.816	.422	ผ่านฉันทามติ
1.2	5.0	1.00	100.0%	4.57	0.51	4.71	0.47	-0.769	.449	ผ่านฉันทามติ
ด้านที่ 2 ด้านหลักสูตร/ หัวข้อการฝึกอบรม										
2.1 ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง										
2.1.1	5.0	1.00	100.0%	4.57	0.51	4.64	0.50	-0.374	.712	ผ่านฉันทามติ
2.1.2	5.0	1.00	96.4%	4.57	0.65	4.57	0.51	0.000	1.000	ผ่านฉันทามติ
2.1.3	4.0	1.00	100.0%	4.50	0.52	4.36	0.50	0.744	.464	ผ่านฉันทามติ
2.1.4	4.0	1.00	96.4%	4.29	0.61	4.50	0.52	-1.000	.327	ผ่านฉันทามติ
2.1.5	5.0	0.00	100.0%	4.93	0.27	4.86	0.36	0.593	.559	ผ่านฉันทามติ
2.1.6	5.0	0.00	100.0%	5.00	0.00	5.00	0.00			ผ่านฉันทามติ
2.2 โครงสร้างและเนื้อหา										
2.2.1	5.0	0.00	100.0%	4.93	0.27	5.00	0.00	-1.000	.336	ผ่านฉันทามติ
2.2.2	5.0	0.00	100.0%	5.00	0.00	5.00	0.00			ผ่านฉันทามติ
2.2.3	5.0	1.00	96.4%	4.57	0.65	4.50	0.52	0.322	.750	ผ่านฉันทามติ
2.2.4	5.0	1.00	100.0%	4.71	0.47	4.71	0.47	0.000	1.000	ผ่านฉันทามติ
2.2.5	5.0	1.00	100.0%	4.57	0.51	4.57	0.51	0.000	1.000	ผ่านฉันทามติ
2.2.6	5.0	0.00	100.0%	5.00	0.00	4.93	0.27	1.000	.336	ผ่านฉันทามติ
2.2.7	5.0	0.00	100.0%	5.00	0.00	5.00	0.00			ผ่านฉันทามติ
2.2.8	5.0	1.00	92.9%	4.57	0.65	4.71	0.61	-0.601	.553	ผ่านฉันทามติ
2.2.9	5.0	0.30	100.0%	4.86	0.36	4.64	0.50	1.302	.205	ผ่านฉันทามติ
2.3 วิธีการเรียนการสอน										
2.3.1	5.0	0.00	100.0%	5.00	0.00	4.86	0.36	1.472	.165	ผ่านฉันทามติ
2.3.2	5.0	0.30	100.0%	4.71	0.47	4.79	0.43	-0.422	.677	ผ่านฉันทามติ
2.3.3	5.0	1.00	100.0%	4.64	0.50	4.71	0.47	-0.391	.699	ผ่านฉันทามติ
2.3.4	5.0	0.30	100.0%	4.79	0.43	4.71	0.47	0.422	.677	ผ่านฉันทามติ
2.3.5	5.0	1.00	100.0%	4.36	0.50	4.71	0.47	-1.955	.061	ผ่านฉันทามติ



ข้อที่	Mdn	IQR	%Agreement (4-5)	M1	SD1	M2	SD2	t	p	ผลการพิจารณา
2.3.6	5.0	0.00	100.0%	4.93	0.27	4.86	0.36	0.593	.559	ผ่านฉันทามติ
ด้านที่ 3 ด้านคุณภาพของเจ้าหน้าที่ฝึกอบรม										
3.1 วิทยากร										
3.1.1	5.0	1.00	100.0%	4.71	0.47	4.64	0.50	0.391	.699	ผ่านฉันทามติ
3.1.2	5.0	1.00	100.0%	4.64	0.50	4.57	0.51	0.374	.712	ผ่านฉันทามติ
3.1.3	5.0	1.00	100.0%	4.79	0.43	4.50	0.52	1.593	.124	ผ่านฉันทามติ
3.1.4	5.0	0.00	100.0%	5.00	0.00	5.00	0.00			ผ่านฉันทามติ
3.2 บุคลากรสนับสนุน										
3.2.1	5.0	1.00	100.0%	4.71	0.47	4.43	0.51	1.537	.136	ผ่านฉันทามติ
3.2.2	4.5	1.00	96.4%	4.43	0.65	4.50	0.52	-0.322	.750	ผ่านฉันทามติ
3.2.3	5.0	1.00	96.4%	4.50	0.65	4.71	0.47	-1.000	.327	ผ่านฉันทามติ
ด้านที่ 4 ด้านการประเมินผลและการติดตามปรับปรุงหลักสูตร										
4.1 การประเมินผู้เข้าร่วมอบรม										
4.1.1	5.0	0.00	100.0%	5.00	0.00	4.93	0.27	1.000	.336	ผ่านฉันทามติ
4.1.2	5.0	1.00	100.0%	4.79	0.43	4.64	0.50	0.816	.422	ผ่านฉันทามติ
4.1.3	5.0	0.00	100.0%	5.00	0.00	5.00	0.00			ผ่านฉันทามติ
4.1.4	5.0	0.00	100.0%	5.00	0.00	5.00	0.00			ผ่านฉันทามติ
4.1.5	5.0	0.00	100.0%	5.00	0.00	5.00	0.00			ผ่านฉันทามติ
4.1.6	5.0	1.00	100.0%	4.79	0.43	4.64	0.50	0.816	.422	ผ่านฉันทามติ
4.1.7	5.0	0.30	100.0%	4.86	0.36	4.64	0.50	1.302	.205	ผ่านฉันทามติ
4.2 การประเมินหลักสูตร										
4.2.1	5.0	1.00	100.0%	4.79	0.43	4.64	0.50	0.816	.422	ผ่านฉันทามติ
4.2.2	5.0	0.00	96.4%	4.86	0.54	5.00	0.00	-1.000	.336	ผ่านฉันทามติ
4.2.3	5.0	1.00	100.0%	4.71	0.47	4.71	0.47	0.000	1.000	ผ่านฉันทามติ
4.2.4	5.0	1.00	100.0%	4.64	0.50	4.57	0.51	0.374	.712	ผ่านฉันทามติ
4.2.5	5.0	1.00	100.0%	4.71	0.47	4.50	0.52	1.147	.262	ผ่านฉันทามติ
4.2.6	5.0	1.00	100.0%	4.64	0.50	4.57	0.51	0.374	.712	ผ่านฉันทามติ
ด้านที่ 5 ด้านการบริหารจัดการ										
5.1 การวางแผนการฝึกอบรม										
5.1.1	5.0	1.00	100.0%	4.79	0.43	4.57	0.51	1.202	.241	ผ่านฉันทามติ

ข้อที่	Mdn	IQR	%Agreement (4–5)	M1	SD1	M2	SD2	t	p	ผลการพิจารณา
5.1.2	5.0	1.00	100.0%	4.71	0.47	4.71	0.47	0.000	1.000	ผ่านฉันทามติ
5.1.3	5.0	0.30	96.4%	5.00	0.00	5.00	0.00			ผ่านฉันทามติ
5.1.4	5.0	0.00	100.0%	5.00	0.00	5.00	0.00			ผ่านฉันทามติ
5.2 บริการสนับสนุนผู้เข้าร่วมอบรม										
5.2.1	5.0	0.00	100.0%	4.79	0.43	4.79	0.43	0.000	1.000	ผ่านฉันทามติ
5.2.2	5.0	0.00	100.0%	5.00	0.00	5.00	0.00			ผ่านฉันทามติ
5.2.3	5.0	1.00	100.0%	4.64	0.50	4.57	0.51	0.374	.712	ผ่านฉันทามติ
5.2.4	5.0	1.00	96.4%	4.71	0.47	4.57	0.65	0.670	.510	ผ่านฉันทามติ
5.3 สิ่งอำนวยความสะดวกและโครงสร้างพื้นฐาน										
5.3.1	5.0	1.00	96.4%	4.50	0.52	4.50	0.65	0.000	1.000	ผ่านฉันทามติ
5.3.2	5.0	1.00	100.0%	4.71	0.47	4.50	0.52	1.147	.262	ผ่านฉันทามติ
5.3.3	5.0	1.00	100.0%	4.57	0.51	4.64	0.50	-0.374	.712	ผ่านฉันทามติ
ด้านที่ 6 ด้านผู้เข้าร่วมอบรม/ กลุ่มเป้าหมาย										
6.1	5.0	0.00	100.0%	5.00	0.00	5.00	0.00			ผ่านฉันทามติ
6.2	5.0	0.00	100.0%	5.00	0.00	5.00	0.00			ผ่านฉันทามติ
6.3	5.0	0.00	100.0%	5.00	0.00	5.00	0.00			ผ่านฉันทามติ
6.4	5.0	1.00	100.0%	4.71	0.47	4.64	0.50	0.391	.699	ผ่านฉันทามติ
ด้านที่ 7 ด้านคุณธรรม/ จริยธรรม										
7.1	5.0	1.00	100.0%	4.71	0.47	4.71	0.47	0.000	1.000	ผ่านฉันทามติ
7.2	5.0	0.30	100.0%	4.86	0.36	4.64	0.50	1.302	.205	ผ่านฉันทามติ

จากตารางที่ 1 ผลการวิจัยเพื่อพัฒนาหลักเกณฑ์การประกันคุณภาพหลักสูตรฝึกอบรมของกรมสุขภาพจิต พบว่า ข้อบ่งชี้ทั้ง 7 ด้าน 60 ข้อบ่งชี้ ผ่านฉันทามติจากผู้เชี่ยวชาญในทุกรายการ โดยมีค่ามัธยฐาน อยู่ระหว่าง 4.0 ถึง 5.0 และค่าพิสัยระหว่างควอไทล์ไม่เกิน 1.0 ซึ่งแสดงถึงความสอดคล้องของความคิดเห็นในระดับสูง ด้านที่มีผลคะแนนความเห็นชอบเต็ม (100%) ในหลายข้อบ่งชี้คือ ด้านความสอดคล้องกับวิสัยทัศน์องค์กร ด้านการประเมินผล และด้านผู้เข้าร่วมอบรม สำหรับหัวข้อที่มีคะแนนเฉลี่ยสูงสุด (= 5.00) ได้แก่ การประเมินผู้เข้าร่วมอบรม และคุณสมบัติของกลุ่มเป้าหมาย ทั้งนี้ ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย พบว่า คะแนนในแต่ละรอบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สรุปได้ว่าหลักเกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสม ถูกต้อง และสามารถนำไปใช้เป็นมาตรฐานในการประกันคุณภาพหลักสูตรได้จริง

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความสอดคล้องของการให้คะแนนของผู้เชี่ยวชาญ (ICC)

Model	Type	ICC	95% Confidence Interval	Interpretation
Two-way mixed-effects	Absolute agreement (average measures)	0.940	0.903 – 0.967	Excellent

จากตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความสอดคล้องของการให้คะแนนของผู้เชี่ยวชาญ โดยใช้สถิติ Intraclass Correlation Coefficient (ICC) แบบ Two-way mixed-effects model ชนิด Absolute agreement (Average measures) พบว่า ค่า ICC เท่ากับ 0.940 (95% CI: 0.903–0.967) ซึ่งอยู่ในระดับดีมาก (Excellent) ตามเกณฑ์ของเทอร์รี เค. คู และ เมย์ ยี่ ลี (Koo and Li) (2016)⁽⁸²⁾ แสดงให้เห็นว่าผู้เชี่ยวชาญมีความสอดคล้องในการประเมินเกณฑ์ในระดับสูงมาก

ทั้งนี้การใช้เทคนิคเดลฟายแบบปรับปรุงที่มีการให้ข้อมูลย้อนกลับแก่ผู้เชี่ยวชาญ อาจส่งผลให้ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญมีแนวโน้มสอดคล้องกันมากขึ้นตามกระบวนการ Consensus convergence อีกทั้งการคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญในงานวิจัยนี้ อาจทำให้ผู้เชี่ยวชาญบางส่วนมีความเชื่อมโยงกันในเชิงเครือข่ายวิชาชีพหรือประสบการณ์การทำงานในบริบทใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อความคล้ายคลึงของมุมมองในการตอบแบบสอบถาม อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้ยังคงใช้กระบวนการคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญตามเกณฑ์คุณสมบัติที่กำหนดไว้อย่างชัดเจน และใช้สถิติหลายรูปแบบร่วมกันในการตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล จึงช่วยสนับสนุนความน่าเชื่อถือของผลการวิจัยในระดับที่เหมาะสม

บทสรุป (Conclusion)

การวิจัยครั้งนี้สามารถพัฒนาหลักเกณฑ์การประกันคุณภาพหลักสูตรฝึกการอบรมของกรมสุขภาพจิต โดยอาศัยเทคนิคเดลฟายแบบปรับปรุง จากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 28 คน ได้หลักเกณฑ์ทั้งสิ้น 7 ด้าน 60 ข้อบ่งชี้ ครอบคลุมมิติสำคัญของการจัดการฝึกอบรม ได้แก่ ด้านความสอดคล้องกับวิสัยทัศน์ พันธกิจ และยุทธศาสตร์องค์กร ด้านหลักสูตรและหัวข้อการฝึกอบรม ด้านคุณภาพของเจ้าหน้าที่ฝึกอบรม ด้านการประเมินผลและการติดตามปรับปรุงหลักสูตร ด้านการบริหารจัดการ ด้านผู้เข้าร่วมอบรมและกลุ่มเป้าหมาย และด้านคุณธรรมและจริยธรรม พบว่า หลักเกณฑ์การประกันคุณภาพหลักสูตรฝึกการอบรมของกรมสุขภาพจิต ประกอบด้วย 7 ด้าน 60 ข้อบ่งชี้ โดยผลการพิจารณาของผู้เชี่ยวชาญพบว่าทุกข้อบ่งชี้มีค่ามัธยฐาน (*Mdn*) ระหว่าง 4.00–5.00 และค่าพิสัยระหว่างควอไทล์ (*IQR*) อยู่ระหว่าง 0.00–1.00 ซึ่งผ่านเกณฑ์ความเป็นเอกฉันท์ในทุกรายการ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายในชั้น (*ICC*) เท่ากับ 0.940 แสดงถึงความสอดคล้องของความคิดเห็นในระดับดีมาก และผลการทดสอบค่าที (*t-test*) พบว่าความคิดเห็นระหว่างผู้เชี่ยวชาญทั้ง 2 กลุ่ม ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 หลักเกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสม มีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำไปใช้เป็นกรอบมาตรฐานในการประกันคุณภาพหลักสูตรฝึกการอบรมของกรมสุขภาพจิตได้จริง ทั้งในเชิงการควบคุมคุณภาพและการพัฒนาคุณภาพอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาหลักสูตรฝึกการอบรมในหน่วยงานด้านสุขภาพหรือองค์กรอื่นที่มีบริบทใกล้เคียงได้ในอนาคต



เอกสารอ้างอิง (Reference)

- กรมสุขภาพจิต. แผนยุทธศาสตร์กรมสุขภาพจิต พ.ศ. 2566-2570. In: กระทรวงสาธารณสุข ก, editor. กรุงเทพฯ: กรมสุขภาพจิต กระทรวงสาธารณสุข; 2568.
- กองทัพบก. (2566). คู่มือการประกันคุณภาพการฝึกอบรม พ.ศ. 2566–2570. กองทัพบก.
- ทองอุไร อุปถัมภ์ และ สุนทรทรัพย์ จันทระประทีน. (2533). คู่มือการประเมินโครงการฝึกอบรม. ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุญเต็ม, ชัชพล. (2543). การพัฒนาเกณฑ์การประเมินการจัดค่ายวิทยาศาสตร์สำหรับนักเรียนมัธยมศึกษาตอนปลาย(วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/30640>
- ศิริชัย กาญจนวาสี. (2550). ทฤษฎีการประเมิน (พิมพ์ครั้งที่ 5). โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานคณะกรรมการข้าราชการพลเรือน. (2567). แนวทางการพัฒนาทรัพยากรบุคคลภาครัฐ: การบริหารและการจัดการฝึกอบรม.
- ASEAN University Network. (2018). Guide to AUN-QA assessment at programme level: Version 4.0.
- Doran, G. T. (1981). There's a SMART way to write management's goals and objectives. Management Review, 70(11), 35–36.
- Fitzpatrick, J. L., Sanders, J. R., & Worthen, B. R. (2012). Program evaluation: Alternative approaches and practical guidelines (4th ed.). Pearson.
- Kirkpatrick, J. D., & Kirkpatrick, W. K. (2016). Kirkpatrick's four levels of training evaluation. Association for Talent Development.
- McGehee, W., & Thayer, P. W. (2004). Training in business and industry (4th ed.). Wiley.
- McWilliam, E., & Singh, P. (2002). Towards a research training curriculum: What, why, how, who? The Australian Educational Researcher, 29(3), 3–18.
- Nguyen, C. H., Marshall, S. J., & Evers, C. W. (2021). Higher education quality assurance and accreditation implementation in several countries across the world and lessons learned for Vietnam. Vietnam Journal of Education, 5(1), 11–17.
- Pfund, C., House, S., Spencer, K., Asquith, P., Carney, P., Masters, K. S., et al. (2013). A research mentor training curriculum for clinical and translational researchers. Clinical and Translational Science, 6(1), 26–3
- Stufflebeam, D. L. (2003, October 3). The CIPP model for evaluation: An update, a review of the model's development, a checklist to guide implementation [Paper presentation]. Annual Conference of the Oregon Program Evaluators Network (OPEN), Portland, OR, United States.



Tyler, R. W., & Hlebowitsh, P. S. (2013). Basic principles of curriculum and instruction. University of Chicago Press.

World Federation for Medical Education. (2020). WFME global standards for quality improvement: Basic medical education.



การพัฒนาระบบแจ้งเตือนอุบัติการณ์ความคลาดเคลื่อนทางยาผ่านแอปพลิเคชันไลน์ : กรณีศึกษางานเภสัชกรรมผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลสมุทรสาคร

Development of a Notification System for Medication Errors Incidents Using Line Application: A Case Study of Outpatient Pharmacy of Samut Sakhon Hospital

จุฑามาศ สุริวงค์¹, สรวง รุ่งประกายพรรณ¹
Juthamart Suriwong¹, Suang Rungpragayphan¹

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนา และศึกษาผลลัพธ์ของระบบการแจ้งเตือนอุบัติการณ์การเกิดความคลาดเคลื่อนทางยาแก่ผู้ปฏิบัติงานรายบุคคลด้วยเทคนิค *Application Line notify API* เพื่อแก้ปัญหาความล่าช้าและการส่งการแจ้งเตือนไม่ถึงผู้รับของระบบเก่า ใช้รูปแบบการวิจัยเชิงพัฒนาและการวิจัยปริมาณ กลุ่มตัวอย่างเป็นผู้ปฏิบัติงานห้องยาผู้ป่วยนอก กลุ่มงานเภสัชกรรมโรงพยาบาลสมุทรสาคร ได้แก่ เภสัชกร เจ้าหน้าที่งานเภสัชกรรม เจ้าหน้าที่ เป็น จำนวน 75 คน ใช้ข้อมูลรายงานอุบัติการณ์ความคลาดเคลื่อนทางยาจากโปรแกรมความเสี่ยงโรงพยาบาลสมุทรสาคร การพัฒนาระบบการแจ้งเตือนอุบัติการณ์การเกิดความคลาดเคลื่อนทางยาใช้เทคนิค *Water fall* อาศัยเครื่องมือ *Google sheet Google app script* และ *Line API framework* ประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน ทดสอบระบบด้วยข้อมูล 20 ชุด พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้จริง และนำระบบไปทดสอบใช้งานจริงเป็นระยะเวลา 2 เดือน เก็บข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบเก่าและระบบใหม่ที่พัฒนาขึ้น ในด้านความเร็ว ด้านการส่งถึงด้านการลดอัตราการเกิดความคลาดเคลื่อนทางยา พร้อมทั้งประเมินความพึงพอใจต่อระบบโดยผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้ระบบ 3 ด้าน ได้แก่ ด้านประสิทธิภาพ ด้านความยากง่ายต่อการใช้ระบบ และความปลอดภัยของข้อมูล ผลการวิจัยพบว่า ระบบการแจ้งเตือนอุบัติการณ์การเกิดความคลาดเคลื่อนทางยาด้วยเทคนิค *Application Line notify* มีความเร็วกว่าระบบเก่าเฉลี่ย 4 ชั่วโมง ซึ่งมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 มีอัตราการส่งถึงร้อยละ 100 สูงกว่าระบบเก้าร้อยละ 57.33 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พบอัตราการเกิดความคลาดเคลื่อนทางยาหลังใช้ระบบใหม่มีค่าน้อยกว่าช่วงที่ใช้ระบบเก่า 0.4 (ครั้ง/1000ใบ) แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้ระบบมีความพึงพอใจต่อระบบในเกณฑ์ระดับที่ดีถึงดีมาก สรุป ได้ว่าระบบการแจ้งเตือนอุบัติการณ์การเกิดความคลาดเคลื่อนทางยาแก่ผู้ปฏิบัติงานรายบุคคลด้วยเทคนิค *Application Line notify API* ที่พัฒนาขึ้นสามารถแก้ปัญหาของระบบเดิม นำไปใช้ได้จริง และผู้ใช้มีความพึงพอใจที่ดีต่อระบบ

¹ สาขาวิชาสุขภาพดิจิทัล คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000
Division of Digital pharmacy, Silpakorn University, Muang, Nakorn Pathom, 73000 THAILAND



คำสำคัญ

อุบัติการณ์ความคลาดเคลื่อนทางยา แอปพลิเคชันไลน์

Abstract

This study aimed to develop and evaluate the outcomes of an individual-level medication error incident notification system using the Line Notify API application to address delays and undelivered alerts in the previous system. A developmental and quantitative research design was employed. The sample comprised 75 outpatient pharmacy staff members from the Pharmacy Department of Samut Sakhon Hospital, including pharmacists, pharmacy technicians, and support staff. Data on medication error incidents were obtained from the hospital's risk management program. The system was developed using the waterfall model with tools such as Google Sheets, Google Apps Script, and the Line API framework. System quality was assessed by five experts, testing the system with 20 data sets revealed that the developed system is fully functional and the system was piloted for two months. Comparative data were collected between the old and newly developed systems regarding alert speed, delivery rate, and reduction of medication error rates. User satisfaction with the system was evaluated among both experts and end-users in three aspects: efficiency, ease of use, and data security. The results showed that the Line Notify API-based medication error incident notification system was on average, 4 hours significantly faster than the previous system ($p < 0.05$) and achieved a 100% delivery rate, which was significantly higher than the old system ($p < 0.05$). The medication error rate after implementation was lower than during the old system period 0.4 (per batch/1000 sheets), although the difference was not statistically significant ($p < 0.05$). Both experts and users rated their satisfaction with the system as good to very good. In conclusion, the developed individual-level medication error incident notification system using the Line Notify API effectively addressed the limitations of the previous system, was practical for real-world use, and achieved high user satisfaction.

Keyword

Medication Error Incidences, Line application

บทนำ

World Health Organization (WHO) ระบุว่า ความคลาดเคลื่อนทางยา หรือการปฏิบัติใช้ยาอย่างไม่ปลอดภัย และความผิดพลาดในการใช้ยา เป็นสาเหตุหลักของการบาดเจ็บและความเสียหายที่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในระบบการดูแลสุขภาพทั่วโลก โดยมีประเมินว่าความเสียหายที่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการใช้ยา มีมูลค่าประมาณ 42 พันล้านดอลลาร์สหรัฐต่อปี (1) ความผิดพลาดสามารถเกิดขึ้น



ได้ในขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการใช้ยา ซึ่งสามารถนำไปสู่ความเสียหายรุนแรง การทุพพลภาพ หรือแม้กระทั่งการเสียชีวิต จากข้อมูลของ Institute of Medicines (IOM) ระบุข้อมูลการศึกษาที่ยืนยันถึงความคลาดเคลื่อนทางการแพทย์ในอัตราที่สูงและพบว่าเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ที่ป้องกันได้ (preventable adverse events) เป็นสาเหตุการตายสูงสุดในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยในปี ค.ศ. 1997 ชาวสหรัฐอเมริกาปีละ 44,00-98,000 คน เสียชีวิตจากสาเหตุดังกล่าวในโรงพยาบาล ต่อมาในปี ค.ศ. 2011 IOM รายงานว่าความคลาดเคลื่อนทางยาเป็นความผิดพลาดที่พบได้บ่อยที่สุดของความคลาดเคลื่อนทางการแพทย์ก่อให้เกิดอันตรายต่อประชากรอย่างน้อย 1.5 ล้านคนต่อปี (2)

สำหรับในประเทศไทย มีรายงานความคลาดเคลื่อนทางยาในแผนกผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลสวรรค์ประชารักษ์ ในอัตรา 3.72 ครั้งต่อ 1000 ใบสั่งยา (3) ซึ่งสอดคล้องกับอุบัติการณ์ความคลาดเคลื่อนทางยาของโรงพยาบาลสมเด็จพระยุพราชสว่างแดนดิน ที่รายงานการเกิดความคลาดเคลื่อนทางยาในแผนกผู้ป่วยนอก 7.56 ต่อ 1,000 ใบสั่งยา (4) และจากการศึกษาวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางยาในขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการใช้ยาของ ยูพา วิชาสวัชโรยอิน และ มาศรินทร์ ธรรมสิทธิบูรณ์ ที่โรงพยาบาลชุมพรเขตอุดมศักดิ์ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการเฝ้าระวังและป้องกันความคลาดเคลื่อนทางยาในทุกขั้นตอนของการให้บริการทางการแพทย์ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ป่วยและลดความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น (5)

จากความสำคัญของการเกิดความคลาดเคลื่อนทางยา ที่อาจส่งผลให้ผู้ป่วยได้รับผลข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ สถาบันการพัฒนาระบบและรับรองคุณภาพโรงพยาบาล (องค์การมหาชน) และศูนย์สารสนเทศและวิจัยระบบยา (ศสวย.) ได้กำหนดให้ ความคลาดเคลื่อนทางยา เป็นหนึ่งในตัวชี้วัดที่สำคัญในการประเมินคุณภาพบริการทางการแพทย์ของโรงพยาบาล (6, 7) ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานการพัฒนาคูณภาพโรงพยาบาลของ Joint Commission International (JCI) โดยมีการพัฒนาระบบรายงานความคลาดเคลื่อนทางยาให้บุคลากรทางการแพทย์สามารถแจ้งปัญหาได้ง่ายและนำข้อมูลไปวิเคราะห์สาเหตุ เพื่อพัฒนาระบบการให้บริการ

จากการทบทวนวรรณกรรมยังไม่พบการศึกษาคำแนะนำระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติเพื่อลดความคลาดเคลื่อนทางยาโดยตรงในสาขางานเภสัชกรรม แต่พบว่ามีงานนำ Line notify API มาประยุกต์ใช้กับระบบสุขภาพโดยการจัดทำ แอปพลิเคชันส่งข้อความสำหรับผู้สูงอายุผ่าน ระบบ Line ของ วีระจักร ชลธงและคณะ (8) โดยใช้งานผ่านแอปพลิเคชัน IFTTT ทำงานร่วมกับ Line notify API เพื่อแจ้งเตือนผู้สูงอายุ นอกจากนี้ในสาขาอื่นที่มีการประยุกต์ใช้ เทคนิค Line notify API ในงานรูปแบบที่หลากหลาย จาก สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ (9) ได้ ทำการศึกษา การเพิ่มประสิทธิภาพระบบติดตามและประเมินผลความก้าวหน้าวิชาโครงการด้วยกลไกการแจ้ง เตือน ซึ่งเป็นการนำ Line notify API ประยุกต์ใช้ ภูเกิล แอป ออฟฟิศ (Google Apps for Education) พบว่าสามารถลดเวลาการทำงานได้ร้อยละ 3.7-9 และความพึงพอใจต่อประสิทธิภาพของระบบเฉลี่ยอยู่ที่ 4.67 อยู่ในระดับพอใจมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย สวาติรี วงษ์นุ่น (10) เรื่อง การประยุกต์รูปแบบ ICT แจ้งเตือนสารสนเทศด้วยเทคนิค Line notify API ในสถานการณ์ COVID-19 ที่มีผลการประเมินความพึงพอใจจาก ผู้ใช้งานภาพรวมอยู่ 4.51 ซึ่งอยู่ในระดับดีที่สุด

จากการรวบรวมข้อมูลความคลาดเคลื่อนทางยาของแผนกผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลสมุทรสาครพบว่า อัตราการเกิดความคลาดเคลื่อนทางยามีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งหน่วยงานได้มีพัฒนาวิธีการบริหารจัดการความ

ตลาดเคลื่อนทางยา เพื่อให้มีอัตราการเกิดลดลง และมีความปลอดภัยสูงสุดในการใช้ยาของผู้ป่วย โดยหนึ่งในกระบวนการบริหารจัดการคือ การแจ้งอุบัติการณ์การเกิดความคลาดเคลื่อนทางยาแก่ผู้ปฏิบัติงานรายบุคคล ทั้งเภสัชกร เจ้าพนักงานเภสัชกรรม และผู้ปฏิบัติงานห้องยา เพื่อสร้างความตระหนัก และการให้ความสำคัญต่ออันตรายที่อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนทางยา โดยระบบมีผังการทำงานดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการแจ้งอุบัติการณ์การเกิดความคลาดเคลื่อนทางยาระบบเดิม

อย่างไรก็ตาม ด้วยลักษณะการแจ้งข้อมูลความคลาดเคลื่อนรูปแบบปัจจุบันที่ใช้การส่งข้อมูลเป็นเอกสาร (กระดาษ) จึงพบปัญหาหลัก 2 ประเด็นได้แก่ 1) ความล่าช้าในการส่งข้อมูลเนื่องจากมีขั้นตอนที่ต้องรอผู้ปฏิบัติงานที่ได้รับมอบหมาย และ 2) การส่งข้อมูลไม่ถึงผู้ปฏิบัติงานเนื่องจากการส่งต่อผ่านหลายระดับ ส่งผลให้การสร้างความตระหนักในการป้องกันความคลาดเคลื่อนทางยา ยังได้ผลไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการพัฒนาระบบการแจ้งข้อมูลความคลาดเคลื่อนทางยารูปแบบใหม่ โดยในปัจจุบันมีรูปแบบการแจ้งเตือน หรือการจัดส่งข้อมูลที่หลากหลายได้แก่ E-Mail ข้อความโทรศัพท์มือถือ ระบบ line notification เป็นต้น แม้ว่า E-Mail เป็นช่องทางที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระดับองค์กร แต่ในกลุ่มงานเภสัชกรรมมีผู้ปฏิบัติงานที่มีความหลากหลายทางอายุและระดับการศึกษา ซึ่งผู้ปฏิบัติงานบางท่านไม่ได้ใช้อีเมล สำหรับข้อความโทรศัพท์มือถือ แม้ว่าผู้ปฏิบัติงานทุกคนจะใช้มือถือ แต่ข้อความโทรศัพท์มือถือมีข้อจำกัดในส่วนของการใช้จ่ายในการนำมาใช้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำระบบ line notification มาพัฒนาระบบการแจ้งข้อมูลความคลาดเคลื่อนทางยา เนื่องจาก line application เป็นทรัพยากรที่ผู้ปฏิบัติงานในห้องยามีใช้อยู่แล้ว และเป็นระบบที่ไม่ได้มีข้อจำกัดในเรื่องของปริมาณข้อมูลหรือค่าใช้จ่ายเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆ โดยระบบ line notification มีคุณสมบัติที่น่าสนใจคือ มีความรวดเร็วในการจัดส่งข้อมูล และสามารถจัดส่งถึงผู้รับได้โดยตรง โดยสามารถนำ line application มาเชื่อมต่อกับ Google Sheet และ Google Apps Script (11, 12) เพื่อสร้างระบบการส่งข้อมูลที่ตรงกับความต้องการในการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ได้



วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาระบบการแจ้งเตือนการแจ้งอุบัติเหตุการเกิดความปลอดภัยเคลื่อนทางยาแก่ผู้ปฏิบัติงานรายบุคคล ด้วยเทคนิค Application Line notify API
2. เพื่อศึกษาผลลัพธ์ของระบบการแจ้งเตือนการแจ้งอุบัติเหตุการเกิดความปลอดภัยเคลื่อนทางยาแก่ผู้ปฏิบัติงานรายบุคคล ด้วยเทคนิค Application Line notify API

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษานี้เป็นงานวิจัยเชิงพัฒนาและประเมินผล โดยกระบวนการดำเนินงานตามวัตถุประสงค์ที่ 1 คือ Prototype Development และ กระบวนการดำเนินงานตามวัตถุประสงค์ที่ 2 ในส่วนของการประเมินประสิทธิภาพระบบคือ การวิจัยกึ่งทดลอง (Quasi-Experimental Design) โดยเป็นการเปรียบเทียบผลระหว่างระบบเก่าและระบบใหม่ที่พัฒนาขึ้น และในส่วนของ การประเมินความพึงพอใจของระบบ คือการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey Research) การพัฒนาระบบแจ้งเตือนอุบัติเหตุการเกิดความปลอดภัยเคลื่อนทางยาผ่าน แอปพลิเคชันไลน์ แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การศึกษาปัญหาของระบบเดิม

ผู้วิจัยทำการสัมภาษณ์ผู้ปฏิบัติงาน 2 กลุ่ม ได้แก่ เกสเซอร์และเจ้าหน้าที่เภสัชกรรมผู้ดูแลระบบการแจ้งเตือนจำนวน 2 ท่าน และผู้ปฏิบัติงานในกลุ่มงานเภสัชกรรมที่ได้รับการแจ้งเตือนจำนวน 5 ท่าน รวบรวมข้อมูลและสรุปประเด็นปัญหาที่พบ

2. การพัฒนาระบบแจ้งเตือนโดยเทคนิค Waterfall

การพัฒนาระบบการแจ้งเตือนอุบัติเหตุการเกิดความปลอดภัยเคลื่อนทางยาผ่าน แอปพลิเคชันไลน์ ได้นำหลักการเทคนิค Waterfall ซึ่งเป็นกระบวนการพัฒนาโปรแกรมหรือระบบที่มีขั้นตอนในการดำเนินการที่ชัดเจนและเรียงลำดับตามลำดับเวลา โดยในแต่ละขั้นตอนจะต้องเสร็จสิ้นก่อนที่จะไปสู่อีกขั้นตอนถัดไป ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลักดังนี้

2.1 การวิเคราะห์ความต้องการ (Requirements Analysis)

โดยได้ดำเนินการควบคุมกับการศึกษาปัญหาระบบเดิมแล้วตามข้อ 1

2.2 การออกแบบระบบ (System Design)

สำหรับการออกแบบระบบประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ การออกแบบฐานข้อมูล และการออกแบบระบบการแจ้งเตือน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การออกแบบฐานข้อมูล

โดยการเรียงรายงานจากโปรแกรมความเสี่ยงของโรงพยาบาล และการออกแบบฐานข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเก็บข้อมูล ได้แก่ ระดับความเสี่ยง ประเภทความเสี่ยง/Error ชนิดความเสี่ยง/Error ผู้ทำerror1 ผู้ทำerror2 ผู้ทำerror3 ผู้ทำerror4 ผู้พบerror ยาที่เคลื่อนย้าย กลุ่มยาที่เกิดError ยาที่ถูกต้องและ รายละเอียดเหตุการณ์ เป็นต้น และการเชื่อมต่อกับระบบการแจ้งเตือนผ่าน แอปพลิเคชันไลน์ โดยใช้โปรแกรม Google sheets



ภาพที่ 1 แสดงการใช้โปรแกรม Google sheets ในการจัดการฐานข้อมูล

2.การออกแบบระบบการแจ้งเตือน

การออกแบบระบบการแจ้งเตือนความคลาดเคลื่อนทางยาผ่านแอปพลิเคชันไลน์ โดยใช้ Flowchart เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเชื่อมโยงการทำงานขององค์ประกอบต่างๆของระบบได้แก่ ระบบโปรแกรมความเสี่ยงของโรงพยาบาลสมุทรสาคร ฐานข้อมูล Google sheets ระบบแอปพลิเคชันไลน์ และ ผู้รับการแจ้งเตือน เป็นต้น



ภาพที่ 2 แสดง Flowchart การออกแบบเชื่อมโยงการทำงานของระบบการแจ้งเตือน

2.3การพัฒนาารระบบ (Implementation)

การพัฒนาารระบบสำหรับการแจ้งเตือนความคลาดเคลื่อนทางยาผ่าน แอปพลิเคชันไลน์ ใช้หลักการเชื่อมต่อบรรยากาศ ฐานข้อมูล Google sheets และ Line Notify API โดยใช้ Google Apps Script ซึ่งเป็นภาษา โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างและปรับแต่งแอปพลิเคชันต่าง ๆ ในบริการของ Google เช่น Google Sheets, Google Docs, Google Forms, Gmail, Google Drive และอื่น ๆ โดยใช้ JavaScript เป็นภาษาหลักในการเขียนโค้ด เพื่อเชื่อมต่อกับ Line Notify API ผ่าน Token ซึ่งเป็นหน่วยพื้นฐานของภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้ระบุ Line ของแต่ละบุคคล



ภาพที่ 3 แสดงหน้าจอการใช้ Google Apps Script โดยใช้ภาษา JavaScript

2.4 การทดสอบระบบ (Testing)

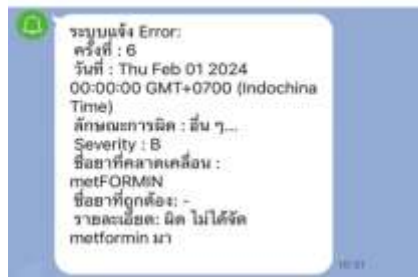
ทำการทดสอบระบบแจ้งเตือนที่พัฒนาขึ้น กับข้อมูลทั้งหมด 20 ชุดข้อมูล และตรวจสอบผลการทำงานของระบบทางด้านความถูกต้องของข้อมูล การส่งถึง และหน้าจอการแสดงผล

2.5 การติดตั้งระบบ (Deployment)

นำระบบแจ้งเตือนความคลาดเคลื่อนทางยาผ่าน แอปพลิเคชันไลน์ ที่ได้รับการทดสอบความถูกต้องแล้ว เชื่อมต่อระบบกับแอปพลิเคชันไลน์บนโทรศัพท์ของผู้ปฏิบัติงาน โดยเชื่อมต่อกับ Token ของผู้ปฏิบัติงาน



ภาพที่ 4 แสดงการสร้าง Token เพื่อใช้เชื่อมต่อระบบแจ้งเตือนความคลาดเคลื่อนทางยา



ภาพที่ 5 แสดงหน้าจอระบบการแจ้งเตือนความคลาดเคลื่อนทางยาผ่านระบบ Line notification

2.6 การบำรุงรักษาระบบ (Maintenance)

3. การทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของระบบแจ้งเตือน

3.1 การประเมินประสิทธิภาพของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ

การทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของระบบแจ้งเตือน โดยเภสัชกรผู้เชี่ยวชาญด้านความคลาดเคลื่อนทางยา ที่มีประสบการณ์การทำงานมาอย่างน้อย 1 ปี จำนวน 5 ท่าน ทำการประเมินทั้งหมด 3 ด้าน คือ ด้านความมีประสิทธิภาพ (Efficiency) ด้านความมีประสิทธิภาพ (Effectiveness) และด้านความปลอดภัยของข้อมูล (Safety) การวัดผลด้านต่างๆ ใช้แบบสอบถามในรูปแบบ Likert Scale ซึ่งเป็นเครื่องมือในการวัดเชิงคุณภาพโดยวัดเป็นระดับต่างๆ จากสูงถึงต่ำ ซึ่งในการวิจัยนี้จะใช้ 5 ระดับและกำหนดคะแนนเป็น 1 – 5 คะแนน โดยแบบประเมินนี้ผ่านการประเมินความตรงต่อเนื้อหาโดยผู้เชี่ยวชาญแล้ว และให้ผู้เชี่ยวชาญให้คำแนะนำเพิ่มเติมเพื่อนำไปปรับปรุงระบบก่อนนำไปทดสอบใช้จริง

โดย ความหมายของทั้ง 3 ด้าน ดังนี้

ความมีประสิทธิภาพ คือ ความมีประสิทธิภาพ (Efficiency) หมายถึงการที่แอปพลิเคชันทำงานได้โดยใช้ทรัพยากรน้อยที่สุด แต่ได้ผลลัพธ์สูงสุด เช่น ความรวดเร็ว ความเสถียรในการได้รับข้อความ เป็นต้น

ความมีประสิทธิภาพ คือ การที่แอปพลิเคชันสามารถตอบโจทย์การใช้งาน หรือแก้ไขปัญหาของผู้ใช้ได้ อย่างถูกต้องและครบถ้วน เช่น ความเหมาะสมของปริมาณข้อความ และ ความยากง่ายต่อการใช้งานระบบ เป็นต้น

ความปลอดภัยของข้อความ คือ กระบวนการและเทคนิคที่ทำให้แน่ใจว่า ข้อมูลของผู้ใช้จะไม่ถูกโจรกรรม ปลอมแปลง หรือเข้าถึงโดยไม่ได้รับอนุญาต

3.2 การประเมินประสิทธิภาพของระบบจากการใช้งานจริง

ผู้วิจัยนำระบบแจ้งเตือนความคลาดเคลื่อนทางยามาทดลองใช้งานจริงในงานกลุ่มงานเภสัชกรรมของโรงพยาบาลสมุทรสาคร เป็นระยะเวลา 2 เดือน มีบุคลากรผู้ใช้งานทั้งสิ้นจำนวน 75 ท่าน โดยเชื่อมต่อระบบกับแอปพลิเคชันไลน์ผ่านระบบ Token บนโทรศัพท์ของผู้ปฏิบัติงานแต่ละคน และประเมินประสิทธิภาพ (เปรียบเทียบ ก่อน-หลังนำระบบมาใช้) ในด้านต่าง ๆ ดังนี้



3.2.1 ประสิทธิภาพระบบด้านความเร็ว

ประสิทธิภาพด้านความเร็ว หมายถึง ระยะเวลาตั้งแต่มีการดึงข้อมูลรายงานความคลาดเคลื่อนทางยาจากโปรแกรมความเสี่ยง จนถึงเวลาที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับการรายงานความคลาดเคลื่อน โดยการเก็บข้อมูลผลลัพธ์จะแบ่งเป็น ช่วงก่อน และช่วงหลังนำระบบมาใช้ บันทึกข้อมูลหน่วยเวลาเป็น ชั่วโมง และเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 2 เดือน

3.2.2 ประสิทธิภาพระบบด้านการส่งถึง

ประสิทธิภาพด้านการส่งถึง หมายถึง การที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับการรายงานความคลาดเคลื่อนทางยา โดยการเก็บข้อมูลผลลัพธ์จะแบ่งเป็น ช่วงก่อน และ ช่วงหลังนำระบบมาใช้ ช่วงก่อนนำระบบมาใช้ บันทึกข้อมูลเป็น 0 (ส่งไม่ถึง) กับ 1 (ส่งถึง) เก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 2 เดือน

3.2.3 ประสิทธิภาพด้านอัตราการเกิดความคลาดเคลื่อนทางยา

จำนวนการเกิดความคลาดเคลื่อนทางยา หมายถึงจำนวนเหตุการณ์ที่ผู้ปฏิบัติงานทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนทางยา เก็บข้อมูลผลลัพธ์จะแบ่งเป็น ช่วงก่อน และช่วงหลังนำระบบมาใช้ โดยการเรียกรายงานความคลาดเคลื่อนทางยาจากโปรแกรมความเสี่ยงของโรงพยาบาล เก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 2 เดือนในแต่ละช่วง เก็บข้อมูลในหน่วย ครั้ง/1000ใบสั่งยา

3.3 การประเมินความพึงพอใจการใช้ระบบแจ้งเตือนความคลาดเคลื่อนทางยาโดยผู้ปฏิบัติงานกลุ่มงานเภสัชกรรม

สำรวจความพึงพอใจและความคิดเห็นของผู้ปฏิบัติงานกลุ่มงานเภสัชกรรมจำนวน 75 ท่าน ที่ได้ทดลองใช้งานระบบแจ้งเตือนความคลาดเคลื่อนทางยาเป็นระยะเวลา 2 เดือน โดยอาศัยแบบประเมินความพึงพอใจการใช้ระบบแจ้งเตือนความคลาดเคลื่อนทางยาที่ผ่านการประเมินความตรงต่อเนื้อหาโดยผู้เชี่ยวชาญแล้ว

การวิเคราะห์ผล

ด้านความพึงพอใจ : สถิติที่ใช้ คือ ค่ามัธยฐานโดยใช้โปรแกรมคำนวณ Microsoft Excel version home and student 2019

ด้านความเร็ว : วิเคราะห์ข้อมูลจาก ค่าเฉลี่ยระยะเวลา สถิติที่ใช้ คือ Paired samples T test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel version home and student 2019 เนื่องจากเป็นการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่มที่มีความสัมพันธ์กัน

ด้านการส่งถึง : วิเคราะห์ข้อมูลจาก ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งข้อมูลถึงผู้ใช้งาน สถิติที่ใช้ คือ ไคสแควร์ (Chi-Square) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel version home and student 2019 เนื่องจากเป็นการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนของประชากร 2 กลุ่ม

ค่าอัตราการเกิดความคลาดเคลื่อนทางยา : สถิติที่ใช้ คือ ไคสแควร์ (Chi-Square) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel version home and student 2019 เนื่องจากเป็นการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนของประชากร 2 กลุ่ม



ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการสำรวจและวิเคราะห์ปัญหา ของระบบการแจ้งอุบัติเหตุการเกิดความปลอดภัยเคลื่อนทางยา แก่ผู้ปฏิบัติงานรายบุคคลแบบเดิม ที่ใช้อยู่ในฝ่ายเภสัชกรรม โรงพยาบาลสมุทรสงคราม พบปัญหาสำคัญ 2 ประการได้แก่ ความล่าช้าในการส่งข้อมูลเนื่องจากมีขั้นตอนที่ต้องรอผู้ปฏิบัติงานที่ได้รับมอบหมาย และการส่งข้อมูลไม่ถึงผู้ปฏิบัติงานเนื่องจากการส่งต่อผ่านหลายระดับ และมีข้อเสนอความต้องการของผู้ใช้งาน ได้แก่ ความมีประสิทธิภาพ (ถูกต้อง รวดเร็ว) มีความง่ายต่อการใช้งาน และมีความปลอดภัยของข้อมูล ซึ่งนำไปสู่การออกแบบระบบการแจ้งอุบัติเหตุการเกิดความปลอดภัยเคลื่อนทางยาแก่ผู้ปฏิบัติงานรายบุคคล ด้วยเทคนิค Application Line notify API เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

จากการสำรวจและสอบถามผู้ใช้งานระบบ ได้แก่ เจ้าหน้าที่ห้องยา เจ้าหน้าที่งานเภสัชกรรม และ เภสัชกร โดยสอบถามถึงปัญหาของระบบการแจ้งเตือนเก่า และความต้องการของระบบใหม่ มีรายละเอียดดัง ตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ตารางแสดง ปัญหาของระบบการแจ้งเตือนเก่า

หัวข้อ	รายละเอียด
1.ความล่าช้าในการส่งข้อมูล	- เนื่องจากระบบการแจ้งเตือนความปลอดภัยเคลื่อนทางยารูปแบบเดิมเป็นการรายงานแบบกระดาษที่ต้องมีกระบวนการในการจัดเตรียมเอกสาร โดยต้องดึงข้อมูลความปลอดภัยเคลื่อนทางยาของห้องยาผู้ป่วยนอกทั้งหมด นำมาแจกแจงออกเป็นแต่ละห้องยา และในแต่ละห้องยาแจกแจงตามรายชื่อผู้ปฏิบัติงาน แล้วป้อนจัดเตรียมเอกสารเพื่อส่งข้อมูลต่อให้เภสัชกรหัวหน้าห้องยาต่อไป - เนื่องจากระบบการแจ้งเตือนความปลอดภัยเคลื่อนทางยารูปแบบเดิมมีขั้นตอนการดำเนินงานที่ทำให้เกิดความล่าช้าถึง 4 ขั้นตอนได้แก่ 1) ขั้นตอนที่เภสัชกรเรียกรายงาน ความปลอดภัยเคลื่อนทางยาจากโปรแกรมลดความเสี่ยงโดยมีความถี่เตือนละ 1 ครั้ง

	2) ขั้นตอนที่เภสัชจัดเตรียมและป้อนรายงานความคลาดเคลื่อนทางยาประจำเดือนในรูปแบบกระดาษ 3) ขั้นตอนการส่งมอบให้กับหัวหน้างานแต่ละแผนก 4) ขั้นตอนที่หัวหน้างานแต่ละแผนกส่งต่อรายงานความคลาดเคลื่อนทางยา แก่ผู้ปฏิบัติงานในแผนก
2. ข้อมูลที่จัดส่งไม่ถึงผู้ปฏิบัติงาน	- เนื่องจากระบบการแจ้งเตือนความคลาดเคลื่อนทางยารูปแบบเดิมมีขั้นตอนในการส่งต่อข้อมูลหลายขั้นตอนตามรายละเอียดในข้อ 1 - เนื่องจากแต่ละห้องยามีผู้ปฏิบัติงานอยู่จำนวนมากและมีภาระงานที่หลากหลายทำให้เภสัชกรหัวหน้าห้องยาส่งต่อเอกสารข้อมูลให้กับ เภสัชกร เจ้าพนักงานเภสัชกรรม เจ้าหน้าที่ในห้องยาไม่ครบถ้วน ส่งผลให้อาจมีผู้ปฏิบัติงานบางส่วนไม่ได้รับข้อมูลดังกล่าวได้

จากการสำรวจและสอบถามผู้ใช้งานระบบถึงปัญหาของระบบการแจ้งเตือนเก่า พบว่าปัญหา 2 ประเด็น คือ

1. ความล่าช้าในการส่งข้อมูล : สาเหตุเกิดจาก รูปแบบการแจ้งเตือนระบบเก่าเป็นรูปแบบกระดาษ และมีขั้นตอนการดำเนินงานหลายขั้นตอน

2. ข้อมูลที่จัดส่งไม่ถึงผู้ปฏิบัติงาน : สาเหตุเกิดจาก รูปแบบการแจ้งเตือนระบบเก่ามีขั้นตอนการส่งต่อข้อมูลหลายขั้นตอน และแต่ละห้องยามีผู้ปฏิบัติงานอยู่จำนวนมากและมีภาระงานที่หลากหลาย



ตารางที่ 2 ตารางแสดง ความต้องการของระบบใหม่

หัวข้อ	รายละเอียด
1. ด้านความมีประสิทธิภาพ (Efficiency)	- ความรวดเร็วในการแจ้งเตือนข้อมูลความคลาดเคลื่อนทางยา - การส่งข้อความแจ้งเตือนถึงผู้รับ - รายละเอียดในการแจ้งเตือนข้อมูล ประกอบด้วย วันที่เกิดความคลาดเคลื่อน ลักษณะการผิด ระดับความรุนแรง(severity) ชื่อยาที่เกิดความคลาดเคลื่อน ชื่อยาที่ถูกต้อง และ รายละเอียดความคลาดเคลื่อน - ความถูกต้องในการแจ้งเตือนข้อมูลรายบุคคล
2.ด้านความมีประสิทธิภาพ (Effectiveness)	- ความง่ายต่อการใช้งานระบบ โดยไม่กระทบต่อการปฏิบัติงาน - ความเหมาะสมของความรู้ในการแจ้งเตือน - คำศัพท์ที่ใช้มีความคุ้นเคยและสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย - ปริมาณข้อมูลที่จัดส่งควรมีความกระชับ
3.ด้านความปลอดภัยของข้อมูล (Safety)	- การแจ้งเตือนควรเป็นลักษณะแจ้งเตือนเฉพาะรายบุคคลโดยตรง - ต้องการให้มีการกำหนดผู้ดูแลระบบโดยเฉพาะเพื่อจำกัดการเข้าถึงข้อมูลส่วนบุคคล



ผลการวิเคราะห์ความต้องการเพื่อทำการพัฒนาระบบการแจ้งเตือน สามารถสรุปได้ว่าความต้องการของระบบแจ้งเตือนอุบัติการณ์ความคลาดเคลื่อนทางยาแก่ผู้ปฏิบัติงานรายบุคคลด้วยเทคนิค Application Line notify API ต้องมี แบ่งเป็น 3 ด้าน ดังนี้

1. ด้านความมีประสิทธิภาพ (Efficiency) ได้แก่ ด้านความเร็วในการแจ้งเตือน, ด้านการส่งข้อความถึงผู้รับ, ด้านความถูกต้องของเนื้อหาที่มีการแจ้งเตือน และด้านความถูกต้องการแจ้งเตือนรายบุคคล เป็นต้น
2. ด้านความมีประสิทธิภาพ (Effectiveness) ได้แก่ ความง่ายต่อการใช้งานระบบ, ความเหมาะสมความถี่ในการแจ้งเตือน, ความเหมาะสมของเนื้อหาที่มีการแจ้งเตือน เป็นต้น
3. ด้านความปลอดภัยของข้อมูล (Safety) ได้แก่ การจำกัดการเข้าถึงข้อมูลที่ทำให้การแจ้งเตือน เป็นต้น

ระบบการแจ้งอุบัติการณ์การเกิดความคลาดเคลื่อนทางยาแก่ผู้ปฏิบัติงานรายบุคคลด้วยเทคนิค Application Line notify API ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ถูกต้องและส่งข้อความได้จริงเมื่อทดสอบกับชุดข้อมูลทดลอง 20 ชุด และผ่านการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน โดยมีคะแนนประเมินด้านต่าง ๆ อยู่ในระดับดีขึ้นไป (≥ 4 จากคะแนนเต็ม 5) ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลประเมินการทำงานของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ (คะแนนเต็ม 5)

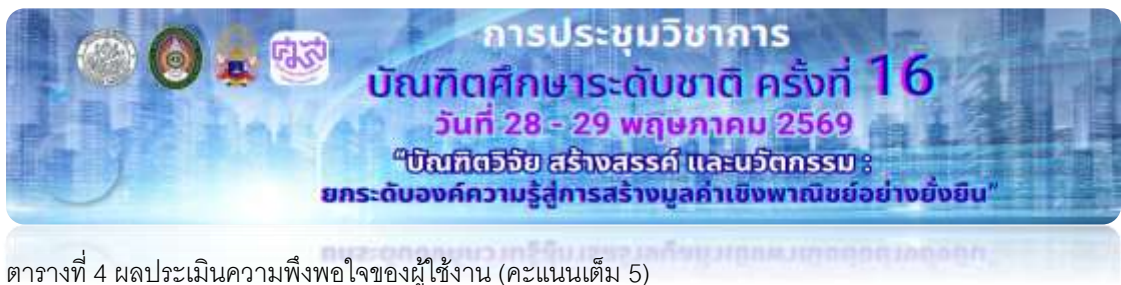
ประเด็นประเมิน	Mdn
ความมีประสิทธิภาพ	5.00
การได้รับการแจ้งเตือนจากระบบการแจ้งเตือน	5.00
ความรวดเร็วในการแจ้งเตือนจากระบบการแจ้งเตือน	5.00
ความถูกต้องของการส่งข้อความในการแจ้งเตือนจากระบบการแจ้งเตือน	5.00
ความครบถ้วนของข้อความในการแจ้งเตือนจากระบบการแจ้งเตือน	5.00

ความมีประสิทธิภาพ	4.00
ความเหมาะสมของ ปริมาณข้อความในการแจ้งเตือน	4.00
ความยากง่ายต่อการใช้งานระบบการแจ้งเตือนข้อมูล	4.00
ความเหมาะสมของ ความถี่ในการแจ้งเตือน	4.00
คำศัพท์ที่ใช้มีความคุ้นเคยและสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย	4.00
ความปลอดภัยของข้อความในการแจ้งเตือนจากระบบการแจ้งเตือน	5.00

หลังจากการนำระบบให้งานผู้ป่วยนอก กลุ่มงานเภสัชกรรม ทดลองใช้งานเป็นระยะเวลา 2 เดือน ทำการเก็บข้อมูล ด้านเวลาที่ใช้ในการส่งการแจ้งเตือน และความสำเร็จในการส่งการแจ้งเตือนถึงผู้รับ เพื่อเปรียบเทียบกับระบบเก่าพบว่า ระบบใหม่มีความเร็วในการแจ้งเตือนที่รวดเร็วกว่าระบบเก่าเฉลี่ยเท่ากับ 4 ชั่วโมง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($t=42.64877$, $df=74$) และระบบการแจ้งเตือนระบบใหม่มีอัตราการส่งถึงผู้รับร้อยละ 100 สูงกว่าระบบเก้าร้อยละ 57.33 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยมีค่า chi-square เท่ากับ 60.28 และค่า P-value เท่ากับ <0.001 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบแจ้งอุบัติการณ์การเกิดความปลอดภัยเคลื่อนทางยาแก่ผู้ปฏิบัติงานรายบุคคลด้วยเทคนิค Application Line notify API ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในการลดระยะเวลา และเพิ่มความสำเร็จในการส่งถึง

ในส่วนการประเมินประสิทธิภาพด้านอัตราการเกิดความปลอดภัยเคลื่อนทางยาพบว่า หลังจากการนำระบบการแจ้งเตือนใหม่มาใช้ มีอัตราการเกิดความปลอดภัยเคลื่อนทางยาน้อยกว่าระบบการแจ้งเตือนเก่า 0.4 (ครั้ง/1000ใบ) แต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

ผลการศึกษาด้านความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบจำนวน 75 คน ทั้ง 3 ด้านได้แก่ ด้านความมีประสิทธิภาพ (Efficiency) ด้านความมีประสิทธิภาพ (Effectiveness) ด้านความปลอดภัยของข้อมูล (Safety) พบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจอยู่ในเกณฑ์ระดับดีมาก ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 4



ตารางที่ 4 ผลประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน (คะแนนเต็ม 5)

ประเด็นประเมิน	$\bar{x} \pm S.D.$
ความมีประสิทธิภาพ	4.77 $\pm$ 0.30
การได้รับการแจ้งเตือนจากระบบการแจ้งเตือน	4.99 $\pm$ 0.12
ความรวดเร็วในการแจ้งเตือนจากระบบการแจ้งเตือน	4.96 $\pm$ 0.21
ความถูกต้องของการส่งข้อความในการแจ้งเตือนจากระบบการแจ้งเตือน	4.33 $\pm$ 0.47
ความครบถ้วนของข้อความในการแจ้งเตือนจากระบบการแจ้งเตือน	4.81 $\pm$ 0.39
ความมีประสิทธิภาพ	4.63 $\pm$ 0.45
ความเหมาะสมของ ปริมาณข้อความในการแจ้งเตือน	4.83 $\pm$ 0.45
ความยากง่ายต่อการใช้งานระบบการแจ้งเตือนข้อมูล	4.83 $\pm$ 0.38
ความเหมาะสมของ ความถี่ในการแจ้งเตือน	4.12 $\pm$ 0.53
คำศัพท์ที่ใช้มีความคุ้นเคยและสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย	4.75 $\pm$ 0.43
ความปลอดภัยของข้อความในการแจ้งเตือนจากระบบการแจ้งเตือน	4.94 $\pm$ 0.24

อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

จากการประเมินประสิทธิภาพระบบการแจ้งเตือนระบบใหม่ด้วยเทคนิค Application Line notify API ในด้านความเร็ว ด้านการส่งถึง พบว่า มีความเร็ว และอัตราการส่งถึงที่ดีกว่า ระบบเก่า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แต่สำหรับอัตราการเกิดความคลาดเคลื่อนทางยาแม้ว่าการแจ้งเตือนระบบใหม่มีค่าน้อยกว่าระบบการแจ้งเตือนเก่าแต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ อาจเนื่องจากช่วงเวลาที่น่าระบบใหม่มาใช้ มีการปรับปรุงห้องยาใหม่ ซึ่งส่งผลกระทบต่อตำแหน่งชั้นยาที่ปรับเปลี่ยนตามสถานที่ ทำให้เจ้าหน้าที่ห้องยาที่มีความสับสน และทำให้เกิดการจัดยาผิดได้ และเนื่องจากตัวระบบใหม่ใช้การแจ้งเตือนด้วยเทคนิค Application Line notify API ในช่วงเวลาปฏิบัติงานคือ 8.00-16.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ทั้ง เจ้าหน้าที่ห้องยา เจ้าหน้าที่เภสัชกรรม และเภสัชกร กำลังปฏิบัติงานที่ ทำให้อาจไม่สะดวกในการเปิดอ่านข้อความในขณะที่ได้รับการแจ้งเตือน จึงยังไม่เกิดผลด้านความตระหนักในทันที จึงควรศึกษาเพิ่มเติมโดยการเก็บข้อมูลการใช้งานในระยะยาว และผลการศึกษาด้านความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบจำนวน 75 คน ทั้ง 3 ด้านได้แก่ ด้านความมีประสิทธิภาพ



(Efficiency) ด้านความมีประสิทธิภาพ (Effectiveness) ด้านความปลอดภัยของข้อมูล (Safety) พบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจอยู่ในเกณฑ์ระดับดีมาก

แม้ว่าปัจจุบันยังไม่มีศึกษาถึงการนำระบบการแจ้งเตือนมาใช้เกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนทางยาในระบบงานเภสัชกรรมโดยตรง แต่ด้วยลักษณะระบบการแจ้งเตือนที่มีการพัฒนาสามารถส่งข้อมูลได้ผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต รวดเร็ว และข้อมูลที่เป็นปัจจุบัน จึงสอดคล้องกับการศึกษาของ Stephanie W Ong (13) และ Haley M Gonzales (14) ที่มีผลการศึกษาระบุว่า การนำระบบเทคโนโลยีการแจ้งเตือน การติดตามการใช้ยาของผู้ป่วย สามารถลดอัตราการเกิดความคลาดเคลื่อนได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นระบบการพัฒนาการแจ้งเตือนอุบัติการณ์การเกิดความคลาดเคลื่อนทางยาแก่ผู้ปฏิบัติงานรายบุคคลด้วยเทคนิค Application Line notify API สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้า ที่นำระบบการแจ้งเตือนมาช่วยในการพัฒนางานเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากยา และเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาของผู้ป่วยให้ดียิ่งขึ้น

จากระบบการแจ้งเตือนอุบัติการณ์การเกิดความคลาดเคลื่อนทางยาแก่ผู้ปฏิบัติงานรายบุคคลด้วยเทคนิค Application Line notify API ที่พัฒนาขึ้น และได้ประเมินประสิทธิภาพแล้ว สามารถนำไปเป็นแนวทางปรับใช้ในโรงพยาบาลอื่นๆต่อไปได้

ข้อจำกัดในงานวิจัย ได้แก่ หากสามารถเชื่อมโยงฐานระบบกับฐานข้อมูลของโรงพยาบาลจะช่วยลดขั้นตอนการทำงาน ระยะเวลา และกำลังคนในการดูแลจัดการในส่วนนี้ และ เนื่องจากทางบริษัท Line ของประเทศไทยได้มีประกาศสำหรับนักพัฒนาที่ใช้งาน Line notify ระบุว่า “ตั้งแต่วันที่ 31 มี.ค. 68 การใช้งาน Line notify ซึ่งเป็นบริการสำหรับนักพัฒนาจะปิดให้บริการ แต่จะให้สามารถใช้งานเป็น ระบบ LINE Messaging API ซึ่งมีฟีเจอร์ที่หลากหลายยิ่งขึ้นแทนได้ โดยจะมีค่าบริการตามแพ็คเกจ ข้อความบรอดแคสต์บน LINE OA” จากประกาศดังกล่าว อาจต้องมีการพัฒนาระบบแจ้งให้สอดคล้องกับระบบ LINE Messaging API นอกจากนี้ควรมีวางแผนถึงค่าใช้จ่ายที่อาจเกิดขึ้นจากระบบ LINE Messaging API

ข้อเสนอแนะในงานวิจัย ได้แก่ ควรมีการพัฒนาการแจ้งเตือนให้สามารถเชื่อมโยงกับฐานข้อมูลของโรงพยาบาลโดยตรง สามารถตั้งค่าแจ้งเตือนแบบอัตโนมัติได้เพื่อให้ทันต่อสถานการณ์ปัจจุบัน และจะสามารถลดขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลที่ต้องใช้ ทั้ง ทรัพยากร เวลา และกำลังคนในการดูแลงานส่วนนี้ ควรมีการปรับความถี่และช่วงเวลาในการแจ้งเตือนตามความเหมาะสม และความต้องการของผู้รับการแจ้งเตือน โดยอาจมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมถึงความถี่ในการแจ้งเตือนที่ต้องการ ปรับความถี่ตามข้อมูลที่ได้รับ และ ประเมินผลความพึงพอใจด้านความถี่ในการแจ้งเตือนอีกครั้ง เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้รับมากที่สุด และ ควรมีการเก็บผลลัพธ์ด้านอัตราความคลาดเคลื่อนใหม่อีกครั้ง โดยต้องมีการควบคุมปัจจัยด้านการปรับเปลี่ยนสถานที่ของห้องยา ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการปฏิบัติงานได้โดยตรง นอกจากนี้ควรมีการนำระบบมาใช้อย่างต่อเนื่อง 3-6 เดือน ก่อนการวัดผล เพื่อให้เห็นผลลัพธ์ที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น เป็นต้น



สรุปผล

ระบบแจ้งอุบัติการณ์การเกิดความคลาดเคลื่อนทางยาแก่ผู้ปฏิบัติงานรายบุคคลด้วยเทคนิค Application Line notify API ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในการลดระยะเวลา และเพิ่มความสำเร็จในการส่งถึง ซึ่งเป็นปัญหาของระบบเดิม แต่ควรมีการสื่อสารและรับฟังข้อคิดเห็นของผู้ปฏิบัติงานในประเด็นความถี่ พร้อมทั้งเก็บข้อมูลการใช้งานในระยะยาวเพื่อการประเมินที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น



เอกสารอ้างอิง

1. World Health Organization. (2016). Medication errors: Technical series on safer primary care. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241511643>
2. Institute of Medicine. (2007). Preventing medication errors. National Academies Press. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/11623/preventing-medication-errors>
3. อัญชลี อังศธรธรรมรัตน์, วรวิทย์ ตั้งวิไล, & พีรยศ ภมรศิลป์ธรรม. (2563). ผลของการคัดกรองคำสั่งใช้ยาและอุบัติการณ์การเกิดความคลาดเคลื่อนของการสั่งใช้ยาในผู้ป่วยนอก โรงพยาบาลสวรรค์ประชารักษ์. สงขลา นครินทร์เวชสาร, 38(2), 135–144.
4. สุกัญญา นุ่มชัยเทศพล, นุศราพร เกษสมบุญ, & วิโรจน์ วิโรจน์วัฒนะ. (2554). การประหยัดต้นทุน ต้นทุนที่เพิ่มขึ้น และต้นทุนที่หลีกเลี่ยงได้จากการแก้ไขความคลาดเคลื่อนทางยาในโรงพยาบาลสมเด็จพระยุพราชสว่างแดนดิน จังหวัดสกลนคร. วารสารวิจัยระบบสาธารณสุข, 5(3), 371–380.
5. ยุพา วิภาสวัชรโยธิน, & มาศรินทร์ ธรรมสิทธิบุญ. (2551). การศึกษาความคลาดเคลื่อนทางยาในโรงพยาบาลชุมพรเขตอุดมศักดิ์. เกษตรกรรมคลินิก, 15, 151–161.
6. สถาบันรับรองคุณภาพสถานพยาบาล. (2566). รายงานประจำปี 2566.
7. ศูนย์สารสนเทศและวิจัยระบบยา. (2550). อัตราความคลาดเคลื่อนทางยา.
8. วีระจักร ชลอม, บังอร โพธิ์มูล, และวรรณะศิริ เพชรชานาญ. (2561). การพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับการแจ้งเตือนการบริหารยา [ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยบูรพา]. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา.
9. สิทธิพงศ์ พรอุดมทรัพย์, วาสนา เสนาะ, รณกร รัตนธรรมมา, และนวิน ครุฑทวีร์. (2562). การพัฒนาแอปพลิเคชันข้อมูลข่าวสารและระบบส่งข้อความแจ้งเตือนแบบพุชบนสมาร์ตโฟนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี, 13(1), 45–55. สืบค้นจาก <https://so02.tcithaijo.org/index.php/journaldru/article/view/253633>
10. สาวิตรี วงษ์นุ่น. (2564). การประยุกต์รูปแบบ ICT แจ้งเตือนสารสนเทศด้วยเทคนิค Line notify API ในสถานการณ์ COVID-19. วารสารวิชาการ ปชมท., 9(3), 178–187.
11. LINE Corporation. (2020). Receive web service notifications on LINE. <https://notify-bot.line.me/en/>
12. หน่วยเทคโนโลยีสารสนเทศ, วิทยาลัยนานาชาตินวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (n.d.). การเชื่อม Google Sheet ให้แจ้งเตือนล่วงหน้าผ่าน Line Notify. <https://it.icdi.cmu.ac.th/Files/>
13. Ong, S. W., Jassal, S. V., Miller, J. A., Porter, E. C., Cafazzo, J. A., Seto, E., Thorpe, K. E., & Logan, A. G. (2016). Integrating a smartphone-based self-management system into usual care of advanced CKD. Clinical Journal of the American Society of Nephrology, 11(6), 1054–1062. <https://doi.org/10.2215/CJN.10681015>
Retrieved from PMC Article
14. Gonzales, H. M., Fleming, J. N., Gebregziabher, M., Posadas-Salas, M. A., Su, Z., McGillicuddy, J. W., & Taber, D. J. (2021). Pharmacist-led mobile health intervention and transplant medication



safety: A randomized controlled clinical trial. Clinical Journal of the American Society of Nephrology, 16(5), 776–784. <https://doi.org/10.2215/CJN.15911020>

Retrieved from PubMed Article



แนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร

กรณีศึกษา: โรงงานผลิตแกนกระดาษ

Guideline for Reducing Greenhouse Gas Emissions through the Assessment of Organizational Carbon Footprint, Case Study: A Paper Core Manufacturer

สกล ลักษณา¹, รศ.ดร. เสรีย์ ตู๊ประกาย¹, รศ.ดร.ปิยะรัตน์ ปรีย์มาโนช¹, อ.จตุพร สิงห์รัญ¹, ผศ.ดร.สิริวัลภ์ เรืองช่วยคู่ประกาย² และ ดร.อมรพล ช่างสุพรรณ³

Sakol Luksana¹, Assoc. Prof. Dr. Seree Tuprakay¹, Assoc. Prof. Dr. Piyarat Preemanoch¹, Jatuporn Singharan¹, Assoc. Prof. Dr. Sirawan Ruangchuay Tuprakay² and Dr. Amornpol Changsuphan³

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยเรื่องนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร กรณีศึกษา: โรงงานผลิตแกนกระดาษ ใช้หลักการวิเคราะห์แบบ SWOT Analysis ซึ่งมีระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2567 โดยคำนวณให้อยู่ในรูปของค่าตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (tCO_2e) ตามข้อกำหนดในการคำนวณและรายงานคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรของการบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) ซึ่งการรายงานผลจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทกิจกรรม คือ ประเภทที่ 1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรง ประเภทที่ 2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม ประเภทที่ 3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่น ๆ ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตแกนกระดาษเท่ากับ $5,275.21 tCO_2e$ ต่อปี และประเภทที่ 3 จากการซื้อวัตถุดิบและบริการ มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด คือ $4,901.78 tCO_2e$ คิดเป็นร้อยละ 85.76 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโรงงาน คือ ประเภทที่ 2 จากการใช้ไฟฟ้า เท่ากับ $224.63 tCO_2e$ /ปี และประเภทที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยที่สุด คือ ประเภทที่ 1 เท่ากับ $148.80 tCO_2e$ /ปี ดังนั้นแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมีมาตรการทั้งหมด 2 ด้าน คือ (1) มาตรการด้านส่งเสริม สนับสนุน การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเป็นมาตรการที่สามารถทำได้ทันที เป็นการรณรงค์ให้ปิดไฟในช่วงเวลาพักกลางวันทั้งในส่วนสำนักงาน พื้นที่การผลิตและคลังสินค้า (2) มาตรการด้านการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เป็นการเปลี่ยนจากรถยนต์สันดาปภายในและรถ

¹ สาขาวิศวกรรมความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร 10240 ประเทศไทย

Safety Occupational Health and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University, Bangkok 10240, Thailand.

² สาขานาอนามัยสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300 ประเทศไทย

Environmental Health and Disaster Management Program, Faculty of Science and Technology, Suan Dusit University, Bangkok 10300, Thailand.

³ ศูนย์ห้องปฏิบัติการอ้างอิงเคมี, กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย

Chemical Reference Laboratory Center, Department of Science Service, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Bangkok 10400, Thailand.



โฟลด์ลิฟท์สันดาปภายใน มาเป็นรถยนต์ไฟฟ้าและรถโฟลด์ลิฟท์ไฟฟ้า สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มาก เมื่อนำมามาตรการด้านการส่งเสริม สนับสนุน และมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก มาทำการสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 6 ท่าน ผลปรากฏว่าผู้ทรงคุณวุฒิทั้งหมดมีความเห็นสอดคล้องกันว่ามาตรการที่กำหนดขึ้น สามารถนำไปปฏิบัติได้จริงและมีความเหมาะสมกับธุรกิจของกรณีศึกษา

คำสำคัญ : คาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร, แกนกระดาษ, SWOT

Abstract

This research aimed to investigate approaches for reducing greenhouse gas emissions through the assessment of the organizational carbon footprint of a paper core manufacturing factory as a case study. The study employed SWOT analysis and was conducted over the period from January 1 to December 31, 2024. Greenhouse gas emissions were calculated and reported in terms of tons of carbon dioxide equivalent (tCO_2e) in accordance with the Carbon Footprint for Organization (CFO) calculation and reporting guidelines established by the Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization). The greenhouse gas emission reporting was categorized into three scopes of activities: Scope 1 direct greenhouse gas emissions, Scope 2 indirect greenhouse gas emissions from energy consumption, and Scope 3 other indirect greenhouse gas emissions.

The results indicated that the total greenhouse gas emissions from the paper core production process were 5,275.21 tCO_2e per year. Scope 3 emissions from purchased raw materials and services contributed the largest proportion, amounting to 4,901.78 tCO_2e or 85.76% of total emissions. This was followed by Scope 2 emissions from electricity consumption at 224.63 tCO_2e per year, while Scope 1 emissions were the lowest at 148.80 tCO_2e per year.

The proposed greenhouse gas reduction approaches consisted of two main measures. The first involved promotional and supportive actions that could be implemented immediately, such as campaigns encouraging employees to switch off lights during lunch breaks in office areas, production zones, and warehouses. The second measure focused on reducing greenhouse gas emissions by replacing internal combustion engine vehicles and forklifts with electric vehicles and electric forklifts, which could substantially decrease greenhouse gas emissions.

The proposed promotional/supportive measures and greenhouse gas reduction measures were further evaluated through in-depth interviews with six experts. The findings revealed unanimous agreement among all experts that the proposed measures were practical, feasible, and appropriate for implementation within the business operations of the case study factory.

Keyword : Organizational Carbon Footprint, Paper Core Manufacturing, SWOT Analysis



บทนำ

ในปี พ.ศ. 2567 โลกปล่อยก๊าซเรือนกระจกอยู่ในระดับสูงที่สุดเป็นประวัติการณ์ที่ 53,200 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (MtCO_2e) เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.3 จากปี พ.ศ. 2566 โดย 74.5% เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่เกิดจากอุตสาหกรรมพลังงานมากที่สุดประมาณ 30% และสาธารณรัฐประชาชนจีนเป็นผู้ปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด โดยมีปริมาณ $16,536 \text{ MtCO}_2\text{e}$ หรือคิดเป็นร้อยละ 29.2 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด ซึ่งต้นเหตุหลักมาจากการเติบโตทางเศรษฐกิจและกว่าร้อยละ 84.5 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดของสาธารณรัฐประชาชนจีน เกิดขึ้นจากภาคอุตสาหกรรมพลังงานเช่นกัน

ในกลุ่มประเทศอาเซียนมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวม $3,226 \text{ MtCO}_2\text{e}$ เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.7 จากปี พ.ศ. 2566 ซึ่งสูงกว่าการเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโลก และประเทศอินโดนีเซียเป็นประเทศที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุดและเป็นอันดับที่ 5 ของโลก รองลงมาคือประเทศเวียดนาม ขณะที่ประเทศบรูไนมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำที่สุด สำหรับประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นอันดับที่ 21 ของโลก ด้วยปริมาณ $422 \text{ MtCO}_2\text{e}$ เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.9 จากปี พ.ศ. 2566 โดยมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสัดส่วนหลักถึง 67.2% และแหล่งปล่อยสำคัญคือภาคอุตสาหกรรมพลังงานเช่นกัน (SET Note Volume 14/2568, โดย สุมิตรา ตั้งสมรพงษ์)

ประเทศไทยให้ความสำคัญอย่างยิ่งในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม ตามที่ได้มีการกำหนดยุทธศาสตร์ชาติด้านการสร้างความเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีเป้าหมายสำคัญคือการพัฒนาที่นำไปสู่การใช้ประโยชน์และสร้างการเติบโตบนฐานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมให้สมดุลภายในขีดความสามารถของระบบนิเวศ ซึ่งสอดคล้องกับแผนแม่บทภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติ ประเด็น (18) การเติบโตอย่างยั่งยืนบนสังคมเศรษฐกิจสีเขียว และแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 13 (พ.ศ.2566 - 2570) หมายความว่า 10 ไทยมีเศรษฐกิจหมุนเวียนและสังคมคาร์บอนต่ำ โดยมีเป้าหมายไปสู่การสร้างการเติบโตอย่างยั่งยืน มุ่งหมาย พัฒนาให้การบริโภคและการผลิตของประเทศมีความยั่งยืนสูง ขับเคลื่อนการพัฒนาอุตสาหกรรมภาคการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ สนับสนุนให้มีการลงทุนด้านการใช้พลังงานสะอาดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ ประเทศไทยยังได้มีการประกาศเจตนารมณ์ ที่จะยกระดับการแก้ไขปัญหาสภาพภูมิอากาศอย่างเต็มที่ เพื่อให้ประเทศไทยบรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี ค.ศ. 2050 และบรรลุเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Greenhouse Gas Emission) ภายในปี ค.ศ. 2065 ณ การประชุมรัฐภาคีกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (COP 26) อีกด้วย (รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการเตรียมพร้อมสถานประกอบการเพื่อเปลี่ยนผ่านภาคอุตสาหกรรมสู่การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions) ประจำปีงบประมาณ 2568 เสนอสำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดกาญจนบุรี, โดยสถาบันรับรองมาตรฐานไอเอสโอ อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ, หน้า 1-1)

จากเป้าหมายดังกล่าวข้างต้น กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการส่งเสริมและสนับสนุนให้โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในทุกกลุ่มอุตสาหกรรมร่วมประเมินปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในองค์กร เพื่อนำผลการ

ประเมินมากำหนดแผนงานการลดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภายในองค์กรให้ลดลง ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโรงงานผลิตแกนกระดาษแข็งหนึ่งในจังหวัดกาญจนบุรี เป็นกรณีศึกษา โดยเป็นโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตแกนกระดาษ สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ อุตสาหกรรมการผลิตฟิล์ม และอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ ตั้งแต่กระบวนการรับวัตถุดิบไปจนถึงการส่งมอบผลิตภัณฑ์ เพื่อนำผลการประเมินมาเป็นแนวทางในการกำหนดแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้เหมาะสมสำหรับองค์กรและนำเสนอต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการผลิตและส่งออกแกนกระดาษ ของโรงงานผลิตแกนกระดาษแห่งหนึ่งในช่วงระยะเวลา 1 ปี และให้อยู่ในรูปของตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (tCO₂e)
2. เพื่อนำเสนอมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กรให้เหมาะสมกับแหล่งกำเนิด
3. เพื่อประเมินความเชื่อมั่นต่อมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กร ด้วยเทคนิคการสัมภาษณ์เชิงลึกจากผู้ทรงคุณวุฒิ

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นเชิงปริมาณ (Quantitative research) และเชิงคุณภาพ (Quality research) เป็นการวิจัยที่ศึกษาการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรเพื่อหาแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกกรณีศึกษา: โรงงานผลิตแกนกระดาษ โดยที่

ระยะที่ 1 เชิงปริมาณ เป็นการเก็บข้อมูลปฐมภูมิและทุติยภูมิตามแนวทางในข้อกำหนดในการคำนวณและรายงานคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร โดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) และทำการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลเพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลที่ได้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ก่อนนำมาคำนวณหาค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ โดยนำมาคูณกับค่า Emission Factor ของแหล่งกำเนิดนั้นๆ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง แล้วรายงานผลการประเมินแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ประเภทที่ 1 (Scope 1) การปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกทางตรงขององค์กร ประเภทที่ 2 (Scope 2) การปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้พลังงาน ประเภทที่ 3 (Scope 3) การปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่น ๆ ซึ่งการรายงานจะต้องอยู่บนหลักพื้นฐานสำคัญ 5 ประการคือ ความตรงประเด็น ความสมบูรณ์ ความไม่ขัดแย้งกัน ความถูกต้อง และความโปร่งใส

ระยะที่ 2 เชิงคุณภาพ โดยผู้วิจัยนำเสนอแนวทางการลดการปลดปล่อยคาร์บอน ฟุตพริ้นท์ตามแนวคิด SWOT Analysis (คู่มือการวิเคราะห์สภาพแวดล้อม (SWOT Analysis), 2565, หน้า 12) โดยใช้หลักการ 7S Mckinsey ในการวิเคราะห์สภาพแวดล้อมภายใน (สุภนาถ โมฬีรัตตะกุล, 2557, หน้า 14) และใช้หลักการ PESTEL Analysis ในการวิเคราะห์สภาพแวดล้อมภายนอก (สภาวะแวดล้อมมหภาคของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ไทย ภายใต้ยุทธศาสตร์การพัฒนาอุตสาหกรรมไทย 4.0", โดย ภัทรเวช ธาธาเวชรักษ์ ทองแท่งทองลิ้ม. จาก วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2563, ฉบับที่ 8 เดือนสิงหาคม, 2563, หน้า 7) และใช้ทฤษฎี



การบำรุงรักษาเป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดแผนลดก๊าซเรือนกระจก (แนวทางการบำรุงรักษาระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ณ อาคาร 3 บก.พท.ศอพท, มปป, หน้า 14.)

ระยะที่ 3 เชิงคุณภาพ โดยใช้แบบสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 6 ท่าน ถึงความเชื่อมั่นต่อแผนลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กร โดยวิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ตามคุณสมบัติที่กำหนด ดังนี้ (1) ผู้บริหารโรงงานที่มีอำนาจในการตัดสินใจ มีประสบการณ์ในการบริหารงานไม่น้อยกว่า 10 ปี และไม่ต่ำกว่าระดับผู้จัดการ จำนวน 1 ท่าน (2) เจ้าหน้าที่จากสำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดกาญจนบุรี ตำแหน่งทางราชการประเภทวิชาการไม่ต่ำกว่าระดับชำนาญการ วุฒิการศึกษาระดับปริญญาโท จำนวน 2 ท่าน และ (3) ผู้เชี่ยวชาญและวิทยากรอิสระด้านการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์จาก บริษัท คาร์บอน โฟกัส คอนซัลแทนท์ จำกัด ที่มีประสบการณ์ในการตรวจสอบการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร ไม่น้อยกว่า 3 ปี และได้รับวุฒิบัตรสอบผ่านการอบรมหลักสูตรทวนสอบ จำนวน 3 ท่าน

ผลและวิจารณ์

ตารางที่ 1 การพิจารณาขอบเขตการรายงานผล

ขอบเขต	รายการ	สอดคล้อง	ไม่สอดคล้อง
Scope 1	CAT-1. การปล่อย GHG ทางตรงจากการเผาไหม้ที่อยู่กับที่ (Stationary combustion)		X
	CAT-2. การปล่อย GHG ทางตรงจากการเผาไหม้ที่มีการเคลื่อนที่ (Mobile combustion)	/	
	CAT-3. การปล่อย GHG ทางตรงจากการใช้เชื้อเพลิงในกระบวนการผลิต		X
	CAT-4. การปล่อย GHG ทางตรงจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการรั่วไหลและอื่นๆ (Fugitive emission)	/	
Scope 2	การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการใช้พลังงาน (Energy)	/	
Scope 3	CAT-1. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการซื้อวัตถุดิบและบริการ (Purchased goods and services)	/	
	CAT-2. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากสินค้าประเภททุน (Capital and Goods)		X
	CAT-3. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงและพลังงาน (Fuel- and energy related activities)	/	
	CAT-4. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการขนส่ง และการกระจายสินค้าต้นน้ำ (Upstream transportation and distribution)	/	
	CAT-5. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นจากการดำเนินกิจกรรม (Waste generated in operations)	/	
	CAT-6. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการเดินทางเพื่อธุรกิจ (Business travel)		X
	CAT-7. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการเดินทางของพนักงาน (Employee commuting)	/	
	CAT-8. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการใช้สินทรัพย์ที่เช่า (Upstream leased assets)		X
	CAT-9. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการขนส่ง และการกระจายสินค้า (Downstream transportation and distribution)		X
	CAT-10. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการแปรรูปสินค้าที่องค์กรจำหน่าย (Processing of sold products)		X
	CAT-11. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการใช้งานของผลิตภัณฑ์องค์กรจำหน่าย (Use of sold products)		X
	CAT-12. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการกำจัดซากผลิตภัณฑ์องค์กรจำหน่าย (End-of-life treatment of sold products)	/	
	CAT-13. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการปล่อยเช่าสินทรัพย์ขององค์กร (Downstream leased assets)		X
	CAT-14. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากแฟรนไชส์ (Franchises)		X
	CAT-15. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการลงทุน (Investments)		X

จากการพิจารณาขอบเขตการรายงานผลมี 9 หมวด (Categories) ที่เข้าข่ายที่ต้องทำการประเมินการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกและรายงานผล คือ

Scope 1 การปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกทางตรงขององค์กร CAT- 2 และ CAT-4

Scope 2 การปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้พลังงาน

Scope 3 การปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่นๆ CAT-1, CAT-3, CAT-4, CAT-5, CAT-7 และ CAT-12



ตารางที่ 2 ผลการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกทางตรงขององค์กร Scope 1

ขอบเขต	รายการ	LCI หน่วย	LCI ปริมาณ	Total (kgCO ₂ e/หน่วย)	Total GHG (tCO ₂ e)
Scope 1	CAT-2. การปล่อย GHG ทางตรงจากการเผาไหม้ที่มีการเคลื่อนที่ (Mobile combustion)				
	การเผาไหม้ที่มีการเคลื่อนที่ สำหรับยานพาหนะที่ไม่ได้ใช้งานบนถนน (Mobile combustion - Off road)				
	การเผาไหม้เชื้อเพลิงจาก forklift - เชื้อเพลิงไบโอดีเซล B7 ,off road	litre	3,543.28	2.9793	10.56
	การเผาไหม้เชื้อเพลิงจาก forklift - เชื้อเพลิงไบโอดีเซล B7 biogenic ,off road , CH4 and N2O	litre	266.70	0.0080	0.00
	การเผาไหม้ที่มีการเคลื่อนที่ สำหรับยานพาหนะที่ใช้ใช้งานบนถนน (Mobile combustion - On road)				
	การเผาไหม้จากรถยนต์ - ดีเซล B7 ,on road	litre	44,401.95	2.7406	121.69
	การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากรถยนต์ - เชื้อเพลิงไบโอดีเซล B7 biogenic ,on road, CH4 and N2O	litre	3,342.08	0.0080	0.03
	การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากรถยนต์ - เชื้อเพลิง Gasohol 91: E10, on road	litre	115.07	2.2719	0.26
	การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากรถยนต์ - เชื้อเพลิง Gasohol 96: E10, on road	litre	1,285.65	2.2719	2.92
	การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากรถยนต์ - Gasohol : เชื้อเพลิง Biogasoline (Ethanol) , on road , CH4 and N2O	litre	155.64	0.3829	0.06
	การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากรถยนต์ - เชื้อเพลิง LPG ,on road	litre	1,882.37	1.7306	3.26
	Scope 1 CAT-2				136.77
	CAT-4. การปล่อย GHG ทางตรงจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการรั่วไหลและอื่น ๆ (Fugitive emission)				
	ก๊าซเรือนกระจกจากน้ำเสีย (CH4 from wastewater treatment)	kgCH ₄	276.11	28.0000	7.79
	การรั่วไหลของสารทำความเย็น (Refrigerant Leakage)				
	การรั่วไหลของสารทำความเย็น (R-407c)	kg	0.12	1,624.2100	0.19
	การรั่วไหลของสารทำความเย็น (R-32)	kg	3.02	677.0000	2.05
	Scope 1 CAT-4				10.03
	Total Scope 1				146.80

10.03 tCO₂e

ตารางที่ 3 ผลการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้พลังงาน Scope 2

ขอบเขต	รายการ	LCI หน่วย	LCI ปริมาณ	Total (kgCO ₂ e/หน่วย)	Total GHG (tCO ₂ e)
Scope 2	การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการใช้พลังงาน (Energy)				
	การใช้พลังงานไฟฟ้า (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค)	kWh	449,349.00	0.4999	224.63
	การใช้พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	kWh	71,851.86		-
	Total Scope 2				224.63

ผลการประเมินการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้พลังงาน Scope 2 พบว่า มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงาน เท่ากับ 224.63 tCO₂e

ตารางที่ 4 ผลการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่น ๆ Scope 3

ขอบเขต	รายการ	LCI หน่วย	LCI ปริมาณ	Total (kgCO ₂ e/หน่วย)	Total GHG (tCO ₂ e)
Scope 3	CAT-1. การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการซื้อวัตถุดิบและบริการ (Purchased goods and services)				
	การใช้น้ำประปา-การประปาส่วนภูมิภาค	m ³	1,326.00	0.5410	0.72
	การซื้อ กาว แป้งมันสำปะหลัง Dextrin	kg	343,215.00	0.6940	203.87
	การซื้อ กาว แป้งมันสำปะหลัง PVAc	kg	82,231.80	1.0400	85.52
	การซื้อ กาว ลาเท็กซ์ EVA	kg	6,406.60	1.0400	6.66
	การซื้อ กระดาษคัลฟาท์	kg	2,675,078.00	1.6324	4,203.66
	การซื้อ กระดาษสี parchment	MT	7.80	1,339.3183	10.45
	การซื้อ ethanol	kg	840.00	1.2381	1.04
	การซื้อ สบู่ซักผ้า	kg	324.00	1.6665	0.54
	การซื้อ ฟอสฟอรัส	kg	6,115.20	2.9105	17.80
	การซื้อ ดินเผา	kg	7,416.40	3.1648	23.47
	การซื้อ กระดาษมันยอ	kg	2,000.00	1.1940	2.39
	การซื้อ ก้อนกระดาษยอ	kg	87,500.70	1.1940	104.48
	การซื้อ กระดาษเพื่อใช้ในสำนักงาน	kg	857.00	1.3393	1.15
	การเผาไหม้ LPG สำหรับการให้บริการซ่อมคันเพลิง	kg	15.00	3.1134	0.05
	การเผาไหม้ น้ำมันเบนซิน สำหรับการใช้บริการซ่อมคันเพลิง	litre	20.00	2.1894	0.04
	การใช้งานถังดับเพลิงชนิด CO2 ในการให้บริการซ่อมคันเพลิง	kg	60.00	1.0000	0.06
	Scope 3 CAT-1				4,661.79



CAT-3, การปล่อย GHG ทางอ้อมจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงและพลังงาน (Fuel- and energy related activities)				
การผลิตเชื้อเพลิงที่ใช้ใน การเผาไหม้จากรถยนต์ - ดีเซล B7	kg	43,125.62	0.3522	15.19
การผลิตเชื้อเพลิงที่ใช้ใน การเผาไหม้จากรถยนต์ - Gasohol 91 : E10	kg	94.75	0.4024	0.04
การผลิตเชื้อเพลิงที่ใช้ใน การเผาไหม้จากรถยนต์ - Gasohol 95 : E10	kg	1,075.95	0.4024	0.43
การผลิตเชื้อเพลิงที่ใช้ใน การเผาไหม้จากรถยนต์ - LPG	kg	1,016.48	0.8582	0.87
การได้มาของไฟฟ้า (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค) (Upstream)	kWh	449,349.00	0.0987	44.35
Scope 3 CAT-3				60.88
CAT-4, การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการขนส่ง และการกระจายสินค้าต้นน้ำ (Upstream transportation and distribution)				
การขนส่งสินค้าต้นน้ำโดย รถตู้บรรทุกทั้งหมด 18 คัน วิ่งปกติ 0% Loading	km	63,471.00	0.8215	52.14
การขนส่งสินค้าต้นน้ำโดย รถตู้บรรทุกทั้งหมด 18 คัน วิ่งปกติ 75% Loading	km	27,344.71	0.0577	1.58
การขนส่งสินค้าต้นน้ำโดย รถตู้บรรทุกทั้งหมด 18 คัน วิ่งปกติ 100% Loading	km	1,534,807.40	0.0449	68.91
การขนส่งสินค้าต้นน้ำโดย รถตู้บรรทุก 4 คัน ขนาดเล็ก วิ่งแบบปกติ 0% Loading	km	18,564.00	0.2415	4.48
การขนส่งสินค้าต้นน้ำโดย รถตู้บรรทุก 4 คัน ขนาดเล็ก วิ่งแบบปกติ 50% Loading	km	5,144.56	0.3805	1.96
การขนส่งสินค้าต้นน้ำโดย รถตู้บรรทุก 4 คัน ขนาดเล็ก วิ่งแบบปกติ 75% Loading	km	3,213.84	0.2706	0.87
การขนส่งสินค้าต้นน้ำโดย รถตู้บรรทุก 4 คัน ขนาดเล็ก วิ่งแบบปกติ 100% Loading	km	6,741.19	0.2154	1.45
การขนส่งสินค้าต้นน้ำโดย รถตู้บรรทุก 4 คัน วิ่งแบบปกติ 0% Loading	km	8,241.00	0.3345	2.76
การขนส่งสินค้าต้นน้ำโดย รถตู้บรรทุก 4 คัน วิ่งแบบปกติ 50% Loading	km	6,470.30	0.3401	2.20
การขนส่งสินค้าต้นน้ำโดย รถตู้บรรทุก 5 คัน ขนาดเล็ก วิ่งปกติ 0% Loading	km	20,324.95	0.4069	8.27
การขนส่งสินค้าต้นน้ำโดย รถตู้บรรทุก 5 คัน ขนาดเล็ก วิ่งปกติ 50% Loading	km	59,979.88	0.1198	7.19
การขนส่งสินค้าต้นน้ำโดย รถตู้บรรทุก 5 คัน ขนาดเล็ก วิ่งปกติ 75% Loading	km	8,559.00	0.0843	0.72
การขนส่งสินค้าต้นน้ำโดย รถตู้บรรทุก 10 คัน วิ่งปกติ 0% Loading	km	1,340.91	0.5747	0.77
การขนส่งสินค้าต้นน้ำโดย รถตู้บรรทุก 10 คัน วิ่งปกติ 50% Loading	km	172.00	0.0852	0.01
Scope 3 CAT-4				153.31

ตารางที่ 4 ผลการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่น ๆ Scope 3 (ต่อ)

ขอบเขต	รายการ	LCI หน่วย	LCI ปริมาณ	Total (kgCO ₂ e/หน่วย)	Total GHG (tCO ₂ e)
Scope 3	CAT-5, การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงาน (Waste generated in operations)				
	การกำจัด น้ำมันพืชเส้น	MT	-	6.4106	-
	การกำจัด ขยะมูลฝอย	MT	5.30	2.3208	0.01
	Scope 3 CAT-5				0.01
	CAT-7, การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการเดินทางของพนักงาน (Employee commuting)				
	การเดินทางไปกลับด้วย จักรยานยนต์ น้ำมันเบนซิน	litre	4,999.88	2.2719	11.36
	การเดินทางไปกลับด้วย รถยนต์ น้ำมันเบนซิน	litre	3,658.75	2.2719	8.31
	การเดินทางไปกลับด้วย รถยนต์ น้ำมันดีเซล	litre	1,483.97	2.7406	4.07
	การเดินทางไปกลับด้วย รถยนต์ LPG	litre	202.26	1.7308	0.35
	Scope 3 CAT-7				24.09
	CAT-12, การปล่อย GHG ทางอ้อมจากการกำจัดซากผลิตภัณฑ์ที่องค์การจำหน่าย (End-of-life treatment of sold products)				
	การกำจัดซากผลิตภัณฑ์ที่องค์การจำหน่าย	MT	576.04	2.9300	1.69
	Scope 3 CAT-12				1.69
	Total Scope 3				4,901.78
				Total Scope 1	148.80
				Total Scope 2	224.63
				Total Scope 3	4,901.78
				Grand Total Carbon Footprint	5,275.21

ผลการประเมินการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่น ๆ Scope 3 พบว่ามีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวม เท่ากับ 4901.78 tCO₂e โดย

CAT-1 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการซื้อวัตถุดิบและบริการ เท่ากับ 4661.79 tCO₂e

CAT-3 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงและพลังงาน เท่ากับ 60.88 tCO₂e

CAT-4 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการขนส่งและการกระจายสินค้าต้นน้ำ เท่ากับ 153.31 tCO₂e

CAT-5 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงาน เท่ากับ 0.01 tCO₂e

CAT-7 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการเดินทางของพนักงาน เท่ากับ 24.09 tCO₂e

CAT-12 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการกำจัดซากผลิตภัณฑ์ที่องค์การจำหน่าย เท่ากับ 1.69 tCO₂e

จากผลการประเมินพบว่าโรงงานผลิตแกนกระดาษแห่งนี้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมทั้งสิ้น 5,275.21 tCO₂e/ปี โดย Scope 3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่น ๆ มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด คือ 4,901.78 tCO₂e/ปี รองลงมาคือ Scope 2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมขององค์กรจากการใช้พลังงาน มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 224.63 tCO₂e/ปี และประเภทที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยที่สุดคือ Scope 1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรง มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 148.80 tCO₂e/ปี

ถึงแม้ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโรงงานผลิตแกนกระดาษมากที่สุดอยู่ที่ Scope 3 CAT-1 จากการซื้อวัตถุดิบและบริการ โดยกระดาษคราฟท์ที่มีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจก อยู่ที่ 4,203.56 tCO₂e/ปี (กระดาษคราฟท์ มีค่า Emission Factor = 1.6324 kgCO₂e/หน่วย อ้างอิง:CFP update July 2022 ลำดับที่ 560) ซึ่งกระดาษคราฟท์เป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตเมื่อโรงงานมีการใช้ปริมาณสูง ย่อมส่งผลให้การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการซื้อวัตถุดิบและบริการมีสัดส่วนที่สูงตามปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ผลิตภัณฑ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปภาวรินทร์ ทรงพัฒนาศิลป์ (2567) ที่ได้จากการศึกษาการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรและการลดก๊าซเรือนกระจก ภายใต้โครงการสนับสนุนกิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก:กรณีศึกษาโรงงานผลิตยางคอมพาวด์ พบว่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการซื้อวัตถุดิบและบริการมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด เนื่องจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้วัตถุดิบหลักที่องค์กรซื้อมาใช้ในกระบวนการผลิต เมื่อองค์กรมีการใช้สินค้าในปริมาณสูงก็จะส่งผลให้การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการซื้อวัตถุดิบและบริการมีสัดส่วนที่สูงตามปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ผลิตภัณฑ์ หรือ Emission Factor ด้วย

เมื่อนำผลการประเมินที่ได้ในแต่ละ Category มาจัดลำดับตามปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากมากไปหาน้อยจะทราบถึงลำดับแหล่งก่อกำเนิดปริมาณก๊าซเรือนกระจกดังนี้

1. Scope 3 CAT-1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการซื้อวัตถุดิบและบริการ เท่ากับ 4661.79 tCO₂e
2. Scope 2 พบว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงาน เท่ากับ 224.63 tCO₂e
3. Scope 3 CAT-4 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการขนส่งและการกระจายสินค้าต้นน้ำ เท่ากับ 153.31 tCO₂e
4. Scope 1 CAT-2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเผาไหม้ที่มีการเคลื่อนที่ เท่ากับ 138.77 tCO₂e
5. Scope 3 CAT-3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงและพลังงาน เท่ากับ 60.88 tCO₂e
6. Scope 3 CAT-7 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการเดินทางของพนักงาน เท่ากับ 24.09 tCO₂e
7. Scope 1 CAT-4 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการรั่วไหลอื่น ๆ เท่ากับ 10.03 tCO₂e
8. Scope 3 CAT-12 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการกำจัดซากผลิตภัณฑ์ที่องค์กรจำหน่าย เท่ากับ 1.69 tCO₂e
9. Scope 3 CAT-5 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นจากการดำเนินกิจกรรม เท่ากับ 0.01 tCO₂e



จากข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 9 Categories ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เฉพาะในประเด็น
บริบทภายในและภายนอก เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการจัดทำเป็นมาตรการลดก๊าซเรือนกระจก

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ปัจจัยภายในเพื่อค้นหาจุดแข็ง (Strength) และจุดอ่อน (Weakness) ขององค์กรโดยใช้
เทคนิค 7S McKinsey

7S McKinsey	จุดแข็ง (Strength)	จุดอ่อน (Weakness)
1. กลยุทธ์ (Strategy)	1. มีสายสัมพันธ์ที่ดีกับซัพพลายเออร์ ทั้งใน ด้านการจัดซื้อวัตถุดิบและบริการ การขอ ความร่วมมือในกิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก สามารถทำได้ทันที 2. ฝ่ายขายประชาสัมพันธ์ให้ลูกค้าทราบถึง ความมุ่งมั่นของผู้บริหารในด้านความ พยายามในการลดก๊าซเรือนกระจกของ องค์กรอย่างเป็นรูปธรรม	บริษัท ตั้งอยู่ในจังหวัดกาญจนบุรี นอกเขตอุตสาหกรรมมีระยะทางไกล จากซัพพลายเออร์ มีผลทำให้การ ปล่อยก๊าซเรือนกระจกใน Scope 3 CAT-4 มีปริมาณที่สูง
2. โครงสร้างของ องค์กร (Structure)	มีคณะทำงานด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม รับผิดชอบให้แผนงานการลดการปล่อย ก๊าซเรือนกระจกขององค์กรเป็นไปตาม เป้าหมาย	บุคลากรมีจำนวนน้อย ส่งผลให้ คณะทำงานรับผิดชอบงานด้านอื่นๆ ด้วย
3. ระบบปฏิบัติงาน (Systems)	บริษัทได้รับการรับรองการเป็นโรงงาน อุตสาหกรรมสีเขียวระดับ 3 จากกระทรวง อุตสาหกรรม และมีระบบบริหารจัดการ ด้านสิ่งแวดล้อม ISO14001:2018 อยู่แล้ว ทำให้การดำเนินการต่าง ๆ มีความ สอดคล้องกับแผนงานด้านการลดก๊าซเรือน กระจกได้โดยง่าย	บุคลากรมีจำนวนน้อย ส่งผลให้ คณะทำงานรับผิดชอบงานด้านอื่นๆ ด้วย
4. บุคลากร (Staff)	พนักงานระดับหัวหน้างานขั้นต้นขึ้นไปมี อัตราการลาออกต่ำมาก ทำให้การบริหาร จัดการด้านสิ่งแวดล้อมมีความต่อเนื่องและ ยั่งยืน	พนักงานฝ่ายผลิตเป็นคนต่างชาติ ประมาณ 50% จึงต้องใช้ความ พยายามในการสื่อสารและทำความเข้าใจด้านแผนการลดการเกิดก๊าซ เรือนกระจกมากกว่าบุคลากรทั่วไป
5. ทักษะ ความรู้ ความสามารถ (Skill)	พนักงานระดับหัวหน้างานขั้นต้นขึ้นไปมี อัตราการลาออกต่ำมาก ส่งผลให้องค์กรมี ความสามารถในการควบคุมกระบวนการ	ความรู้/ความเข้าใจเรื่องการปล่อย ก๊าซเรือนกระจกขององค์กรเป็นเรื่อง ใหม่และซับซ้อนสำหรับพนักงานกลุ่ม



	ผลิตให้มีประสิทธิภาพ และลดของเสีย ตั้งแต่ต้นกระบวนการผลิตได้ดี	ใหญ่ ทำให้การพัฒนาเป็นไปได้ด้วยความล่าช้า
6. รูปแบบการบริหารจัดการ (Style)	เนื่องจากเป็นองค์กรขนาดเล็ก ผู้บริหารสูงสุดสามารถกำหนด/ปรับเปลี่ยนทิศทางการดำเนินงานขององค์กรให้เป็นไปในทิศทางตามเป้าหมายที่กำหนดได้ทันที	งบประมาณการลงทุนในเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่จะช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่ค่อนข้างสูงและได้รับผลตอบแทนช้า ทำให้ต้องใช้เวลามากในการพิจารณาตัดสินใจลงทุนในแต่ละโครงการ
7. ค่านิยมร่วม (Shared Values)	การรักษาสิ่งแวดล้อมและการลดการการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เป็นนโยบายสำคัญของผู้บริหาร ทำให้โครงการได้รับการสนับสนุนในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างเต็มที่ จึงเกิดเป็นความร่วมมือในองค์กรและจะสามารถแปลเปลี่ยนเป็นค่านิยมองค์กรได้ในที่สุด	พนักงานส่วนใหญ่มีระดับการศึกษาต่ำกว่าชั้นมัธยม และเป็นคนต่างชาติ ประมาณ 50% ทำให้ต้องใช้เวลาในการสื่อสารและทำความเข้าใจเพื่อให้เกิดค่านิยมองค์กร

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ปัจจัยภายนอกเพื่อค้นหาโอกาส (Opportunities) และอุปสรรค (Threats) โดยใช้เทคนิค PESTEL Analysis

ด้าน (Factor)	โอกาส (Opportunities)	อุปสรรค (Threats)
การเมือง (Political)	ตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 13 (พ.ศ.2566-2570) หมายความว่า 10 ประเทศไทยมีเศรษฐกิจหมุนเวียนและสังคมคาร์บอนต่ำ กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการส่งเสริมสนับสนุนให้โรงงานอุตสาหกรรมในจังหวัดกาญจนบุรีร่วมประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ โดยการจัดอบรมให้ความรู้ และจัดหาทีมที่ปรึกษาในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร โดยไม่มีค่าใช้จ่ายใดใด	ภาครัฐไม่จัดสรรงบประมาณอย่างต่อเนื่อง ทำให้การดำเนินงานล่าช้าในบางช่วงเวลา
เศรษฐกิจ (Economic)	ในอุตสาหกรรมการผลิตแกลนครดาษ มีผู้ผลิตที่ให้ความสำคัญด้านการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและการลดก๊าซเรือนกระจกน้อยราย ทำให้องค์กรมีภาพลักษณ์โดดเด่น	แผนลดก๊าซเรือนกระจกบางโครงการ ต้องใช้งบประมาณในการทำสูง และมีผลตอบแทนต่ำ ทำให้เป็นภาระด้านการเงินขององค์กร



	เด่นในด้านการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ซึ่งจะส่งผลให้องค์กรมีความได้เปรียบในการแข่งขัน	
สังคมและวัฒนธรรม (Social cultural)	ค่านิยมด้านการปฏิบัติ หรือการใช้สินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการลดก๊าซเรือนกระจก มีกระแสที่ชัดเจนและเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง จะเป็นแรงผลักดันให้คู่ค้ามองหาผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมมากขึ้น องค์กรก็必将มีความมั่นคงยั่งยืนในทางธุรกิจมากขึ้นตามไปด้วยในระยะยาว	แผนการการสร้างวัฒนธรรมประเทศด้านการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากทางภาครัฐยังไม่สามารถเห็นได้อย่างเป็นรูปธรรม
เทคโนโลยี (Technological)	มีเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมใหม่ๆ ออกมาสู่ตลาดต่อเนื่องตลอดเวลา ทำให้องค์กรมีทางเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมเข้ามาใช้ได้มากขึ้น	เทคโนโลยีและวิธีการบำรุงรักษา ยังมีต้นทุนสูง
สิ่งแวดล้อม (Environment)	ผลิตภัณฑ์ขององค์กรสามารถนำไป Recycle ได้ 100% ทำให้ตัวผลิตภัณฑ์มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่นๆ จากการกำจัดซากผลิตภัณฑ์ (Scope 3 CAT-12) และการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นจากการดำเนินกิจกรรม (Scope 3 CAT-5) อยู่ในระดับต่ำ	ถึงแม้ว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการ จะอยู่ในระดับต่ำ แต่ในกระบวนการก็มีของเสียสูงกว่า 10% ทำให้องค์กรมีต้นทุนวัตถุดิบที่สูงตามไปด้วย
กฎหมาย (Law/Legal)	ยังไม่มีกฎหมายประกาศออกมาบังคับให้องค์กรต้องมีแผนงานการลดก๊าซเรือนกระจก จึงเป็นการแสดงให้เห็นถึงความมุ่งมั่นของผู้บริหารที่ให้ความสำคัญอย่างแท้จริง	บุคลากรที่ผ่านการรับรองวิทยฐานะทั้งการเป็นวิทยากรและผู้ทวนสอบด้านการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ยังมีไม่เพียงพอ



จากลำดับแหล่งก่อกำเนิดปริมาณก๊าซเรือนกระจก 9 Categories ผู้วิจัยพิจารณาไม่ทำแผนการลดก๊าซเรือนกระจกจาก 3 แหล่งก่อกำเนิดดังนี้

ลำดับที่ 6 (Scope 3 CAT-7) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการเดินทางของพนักงาน เท่ากับ 24.09 tCO₂e เนื่องจากเป็นกิจกรรมมีความไม่คงที่ของการเดินทางของพนักงาน มีการทำงานเป็นกะและมีการปรับเปลี่ยนเวลาการทำงานทุกๆ สัปดาห์ ทำให้ไม่สามารถกำหนดแผนงานลดก๊าซเรือนกระจกสำหรับการทำางานลักษณะแบบนี้ได้

ลำดับที่ 8 (Scope 3 CAT-12) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการกำจัดซากผลิตภัณฑ์ที่องค์กรจำหน่าย เท่ากับ 1.69 tCO₂e เนื่องจากเป็นแหล่งก่อกำเนิดก๊าซเรือนกระจกที่มีปริมาณต่ำ ไม่มีความคุ้มค่าที่จะดำเนินการใดใด ณ เวลาปัจจุบัน

ลำดับที่ 9 (Scope 3 CAT-5) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นจากการดำเนินกิจกรรม เท่ากับ 0.01 tCO₂e เนื่องจากเป็นแหล่งก่อกำเนิดก๊าซเรือนกระจกที่มีปริมาณต่ำมาก ไม่มีความคุ้มค่าที่จะดำเนินการใดใด ณ เวลาปัจจุบัน

จากลำดับแหล่งก่อกำเนิดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เหลืออีก 6 Categories ผู้วิจัยได้กำหนดมาตรการลดก๊าซเรือนกระจก โดยเรียงลำดับตามปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากมากไปหาน้อยดังนี้

มาตรการที่ 1 ส่งเสริม/สนับสนุน/จูงใจ คู่ค้ารายเก่าให้พิจารณาดำเนินกิจกรรมลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และเปิดโอกาสให้คู่ค้ารายใหม่ที่มีการดำเนินกิจกรรมลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเข้ามาเป็นคู่ค้าที่สำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปภาวรินทร์ ทรงพัฒนาศิลป์ (2567) ที่ได้จากการศึกษาการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรและการลดก๊าซเรือนกระจก ภายใต้โครงการสนับสนุนกิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก กรณีศึกษา : โรงงานผลิตยางคอมพาวด์ พบว่า ควรพิจารณาคัดเลือกการสั่งซื้อวัตถุดิบจากองค์กรที่มีมาตรการจัดการและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างชัดเจนและมีประสิทธิภาพ หากซัพพลายเออร์มีกระบวนการผลิตเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและลดการใช้พลังงาน สิ่งนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยรวม มาตรการนี้จะมีผลทำให้ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรม Scope 3 CAT-1 และ Scope 3 CAT-4 ลงได้

มาตรการที่ 2 การรณรงค์ ส่งเสริมให้ปิดไฟในช่วงเวลาพักกลางวันทั้งในส่วนสำนักงาน พื้นที่การผลิต และคลังสินค้า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชนม์บุญญ์ แยมมา, โสภา ชินเวชกิจวานิชย์ และภัทรศิริ พักแก้ว (2568) ที่ได้จากการศึกษาการปรับปรุงพฤติกรรมและส่งเสริมการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างยั่งยืนภายในภาคอุตสาหกรรมสุขาภิบาล คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล พบว่า การลดการใช้พลังงานไฟฟ้ายังนำไปสู่การลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก มาตรการนี้จะมีผลทำให้ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรม Scope 2 ลงได้

มาตรการที่ 3 กำหนดแผนงานเปลี่ยนหลอดไฟแสงสว่างในองค์กรให้เป็นหลอดไดโอดเปล่งแสงหรือที่เรียกว่าหลอดแอลอีดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศิวพร จำปา (2567) ที่ได้จากการศึกษาการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร กรณีศึกษาโรงงานผลิตเหล็ก ที่พบว่า การสนับสนุนพลังงานทางเลือกโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และมีการเปลี่ยนแปลงหลอดไฟแสงสว่างจากหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นหลอดหลอดไดโอดเปล่งแสง

หรือที่เรียกว่าหลอดแอลอีดี ส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ลดลง มาตรการนี้จะมีผลทำให้ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรม Scope 2 ลงได้

มาตรการที่ 4 กำหนดแผนงานในการเปลี่ยนรถยนต์และรถโฟล์คลิฟท์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็น รถยนต์และรถโฟล์คลิฟท์ระบบไฟฟ้าทดแทน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เขมณัญญ์ จันทรรักษ์ (2567) ที่ได้จากการศึกษาประสิทธิภาพในการลดก๊าซเรือนกระจกจากการเปลี่ยนยานพาหนะสันดาปภายในเป็นยานยนต์ไฟฟ้าในองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น พบว่า การจำลองกรณีเปลี่ยนรถยนต์และจักรยานยนต์สันดาปเป็นรถไฟฟ้าเป็นรูปแบบที่เหมาะสมและสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและค่าใช้จ่ายสำหรับเชื้อเพลิงมากที่สุด มาตรการนี้จะมีผลทำให้ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรม Scope 1 CAT-2 และ Scope 3 CAT-3 ลงได้

มาตรการที่ 5 การจัดฝึกอบรมเกี่ยวกับการบำรุงรักษารถยนต์และรถโฟล์คลิฟท์ไฟฟ้าชนิดใช้แบตเตอรี่ และการบำรุงรักษาระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พระวิศิษฎ์ ธีมมะรังสี (รัศมี) (2560) ที่ได้จากการศึกษาปัญหาและอุปสรรคในการบำรุงรักษาระบบโซลาร์เซลล์ ของโรงเรียนในเขตทุรกันดาร : โรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดนบ้านบิล็อคคี พบว่า ปัญหาและอุปสรรคที่เด่นชัดที่สุดน่าจะเกิดจาก 4 ส่วนด้วยกัน คือ ปัญหาที่เกิดจากอุปกรณ์เสียหายหรือเสื่อมสภาพ ปัจจัยสภาพอากาศ และฝุ่นละอองในพื้นที่บุคลากรส่วนใหญ่ขาดความรู้ และทักษะในการบำรุงรักษาระบบโซลาร์เซลล์ที่ดี และขาดความใส่ใจในความร่วมมือในการบำรุงรักษา มาตรการนี้จะมีผลทำให้ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรม Scope 1 CAT-2 ลงได้

มาตรการที่ 6 เปลี่ยนเครื่องปรับอากาศที่ใช้สารทำความเย็นที่มีค่า GWP ต่ำ เช่น R32 เป็นต้น เมื่อเครื่องปรับอากาศเดิมหมดอายุการใช้งาน มาตรการนี้จะมีผลทำให้ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรม Scope 1 CAT-4 ลงได้

จากการสัมภาษณ์เชิงลึกจากผู้ทรงคุณวุฒิ 6 ท่านถึงมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่กำหนดไว้ ผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 6 ท่านมีความเห็นสอดคล้องไปในทางเดียวกันว่ามาตรการที่กำหนดขึ้นมีความเหมาะสมและสามารถนำไปปฏิบัติได้จริงกับธุรกิจของกรณีศึกษา แต่ได้ตั้งข้อสังเกตไว้ว่าในมาตรการที่ 1 สามารถปฏิบัติได้แต่อาจจะไม่สามารถควบคุมประสิทธิภาพให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ เนื่องจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกิจกรรมนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการใช้วัตถุดิบซึ่งเป็นปัจจัยหลักของการผลิตสินค้า

สรุป

การนำผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรมาเป็นแนวทางในการกำหนดแผนงานลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแสดงให้เห็นว่าเป็นแนวทางที่มีความเหมาะสมและสอดคล้องกับแหล่งก่อกำเนิดจากการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ทำให้เห็นว่าโรงงานผลิตแกนกระดาษแห่งนี้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมเท่ากับ 5,275.21 tCO₂e ต่อปี กิจกรรมที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุดคือการซื้อกระดาษคราฟท์มาเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นแกนกระดาษ เท่ากับ 4,203.56 tCO₂e ต่อปี คิดเป็น 79.69% มีกิจกรรมที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด 9 กิจกรรม เมื่อพิจารณาจากข้อมูลที่ได้ 6 ใน 9 กิจกรรมสามารถนำมากำหนดเป็นแผนงาน



ลดก๊าซเรือนกระจกได้ 6 มาตรการ ส่วนอีก 3 กิจกรรมที่เหลือพิจารณาแล้วยังไม่มีความจำเป็นต้องดำเนินการใดใด เนื่องจากเป็นกิจกรรมที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณน้อย

คำขอบคุณ

ขอขอบพระคุณ ผู้บริหารสูงสุดบริษัทผลิตแกนกระดาษแห่งหนึ่ง ที่อำนวยความสะดวกในการเก็บรวบรวมข้อมูลการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่จากสำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดกาญจนบุรี และที่ปรึกษาจากบริษัท คาร์บอนโฟกัส คอนซัลแทนท์ จำกัด ที่สนับสนุน ให้คำปรึกษา และให้ข้อมูลเพื่อการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้



เอกสารอ้างอิง

เชมณัฐ จันทร์จรรย์. (2567). การศึกษาประสิทธิภาพในการลดก๊าซเรือนกระจกจากการเปลี่ยนยานพาหนะ
สันดาปภายในเป็นยานยนต์ไฟฟ้าในองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น. สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์.

คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยรังสิต. หน้า 43.

ชนม์บุญญ์ แยมมา, โสภา ชินเวชกิจวานิชย์ และภัทรศิริ พักแก้ว. (2568). การปรับปรุงกิจกรรมและส่งเสริมการ
ใช้

พลังงานไฟฟ้าอย่างยั่งยืนภายใน. การประชุมวิชาการระดับชาติ การพัฒนาอย่างยั่งยืน (ครั้งที่ 1).

คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. หน้า 8.

นิสาพีชา หะยิวาณะ. (2566). การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์และแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก
เพื่อ

ส่งเสริมความเป็นมหาวิทยาลัยสีเขียวของมหาวิทยาลัยราชภัฏกลุ่มภาคใต้ในประเทศไทย. สาขา

วิชาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา. หน้า 175.

ปภาวรินทร์ ทรงพัฒนาศิลป์. (2567). การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรและการลดก๊าซเรือนกระจก ภายใต้

โครงการสนับสนุนกิจกรรมลดก๊าซเรือนกระจก:กรณีศึกษาโรงงานผลิตยางคอมพาวด์. สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 87.

พระมหาพิสุทธิ สิริเมธี ภารัง. (2567). การศึกษาบทบาทผู้นำสู่การพัฒนาองค์กรที่ยั่งยืน. สำนักงาน

เลขานุการคณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 53.

พระวิศิษฎ์ ธมฺมรสี (รัศมี). (2560). การศึกษาปัญหาและอุปสรรคในการบำรุงรักษาระบบโซล่าเซลล์ ของ

โรงเรียนในเขตทุรกันดาร:โรงเรียนตำรวจตระเวนชายแดนบ้านปลื้มคี่. สาขาวิชาการพัฒนาสังคม

มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 92.

พิสิฐ ทางธนกุล. (2567). เรื่อง 6 แนวทางธุรกิจสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภค.

<https://www.pwc.com/th/en/pwc->

[thailand-blogs/blog-20240604.html](https://www.pwc.com/th/en/pwc-thailand-blogs/blog-20240604.html).

ภัทรเวช ธาธาเวชรักษ์ และทองแท่ง ทองดี. (2563). วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเรื่องสภาวะแวดล้อม

มหภาคของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ไทยภายใต้ยุทธศาสตร์การพัฒนอุตสาหกรรมไทย 4.0 ฉบับที่

8. หน้า 7.

รัชชานนท์ สุขสวัสดิ์. (2567). การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร:กรณีศึกษาโรงหล่อชิ้นส่วนสำเร็จรูปของ

บริษัท กาญจน์นก พร็อพเพอร์ตี้ จำกัด. สาขาวิชาวิศวกรรมและการบริหารการก่อสร้าง.

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. หน้า 78.

ศิวพร จำปา. (2567). การศึกษาการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร กรณีศึกษาโรงงานผลิตเหล็ก. สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมแผน กแบบ ก 2. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร. หน้า 47.

สถาบันรับรองมาตรฐานไอเอสโอ อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ. (2568). รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการ

เตรียมพร้อมสถานประกอบการเพื่อเปลี่ยนผ่านภาคอุตสาหกรรมสู่การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็น



ศูนย์ (Net Zero Emissions) ประจำปีงบประมาณ 2568 เสนอสำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัด กาญจนบุรี. หน้า 1-1.

สุภานถ โมฬีรัตตะกุล. (2557). การปรับโครงสร้างองค์การเพื่อรองรับการขยายธุรกิจสู่ภูมิภาคประชาคม เศรษฐกิจอาเซียน+3 ตามกรอบแนวคิดของ McKinsey ของธนาคารพาณิชย์แห่งหนึ่ง. คณะ พาณิชยศาสตร์และการบัญชี. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. หน้า 14.

สุมิตรา ตั้งสมรพงษ์. (2568). SET Note Volume 14/2568, ปี 2567 โลกปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุดเป็น ประวัติการณ์ที่ 53,200 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า. หน้า 1.



ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับจากยาต้านวัณโรคแนวที่หนึ่งในผู้ป่วยวัณโรคปอดที่ไม่ติดเชื้อ HIV

Factors Associated with First-line Anti-tuberculosis Drug-induced Hepatotoxicity in HIV-negative Pulmonary Tuberculosis Patients.

ดนุลดา ฤทธิเทพ¹, นัทธี พรประภา², ลาวัลย์ ศรัทธาพุท¹

Danulada Ritthep, Nattee Phornprapa, Lawan Satthaphut

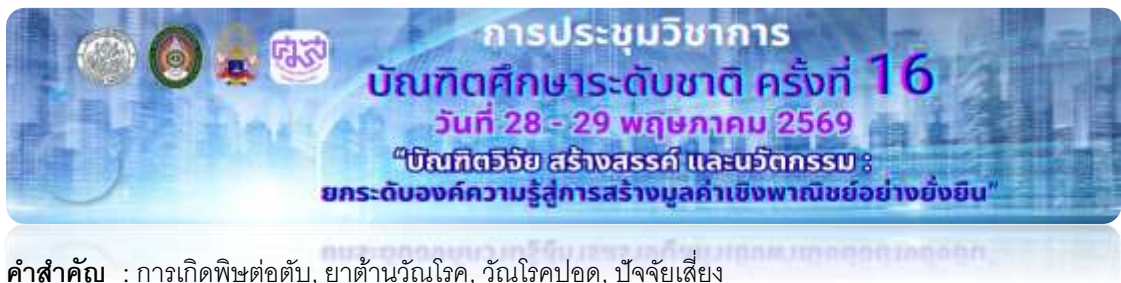
บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์: เพื่อศึกษาปัจจัยที่สัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับจากยาต้านวัณโรคแนวที่หนึ่งในผู้ป่วยวัณโรคปอดที่ไม่ติดเชื้อ HIV **วิธีการ:** กลุ่มศึกษาเป็นผู้ป่วยวัณโรคปอดที่ไม่ติดเชื้อ HIV (>18ปี) และได้รับการรักษาด้วยยาต้านวัณโรคแนวที่ 1 จากโรงพยาบาลกำแพงเพชร โรงพยาบาลพิจิตร โรงพยาบาลอุทัยธานี และโรงพยาบาลชัยนาทนนทร ในระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2562 - วันที่ 31 มีนาคม 2566 จำนวน 509 คน ข้อมูลถูกเก็บย้อนหลังจากเวชระเบียนในระบบอิเล็กทรอนิกส์ นำไปวิเคราะห์และทดสอบโดยใช้สถิติ Chi-square, independent T-test, และ binary logistic regression ($p < 0.05$) **ผลการวิจัย:** จากการศึกษาพบว่า มี 4 ปัจจัยที่สัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับจากยาต้านวัณโรคแนวที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเรียงลำดับจากปัจจัยที่มีผลมากที่สุด ได้แก่ ระดับ Direct Bilirubin > 0.7 mg/dL (OR 10.70, 95%CI 4.51 – 25.39), ภาวะสูงอายุ (มากกว่า 75 ปีขึ้นไป) (OR 4.55, 95%CI 1.14 – 18.09), ระดับ albumin < 3.5 g/dL (OR 3.47, 95%CI 1.92 – 6.25) และ โรคโลหิตจาง (OR 1.61, 95%CI 1.01 – 2.57) **สรุป:** ระดับ Direct Bilirubin > 0.7 mg/dL เป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อการเกิดพิษต่อตับจากยาต้านวัณโรคแนวที่หนึ่งสูงที่สุด (OR 10.70) ร่วมกับปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ สูงอายุ (> 75 ปี) ระดับ albumin ต่ำ (< 3.5 g/dL) และโรคโลหิตจาง ในทางปฏิบัติจึงควรคัดกรองผู้ป่วยที่มีปัจจัยเสี่ยงเหล่านี้ก่อนเริ่มยาต้านวัณโรคแนวที่ 1 และวางแผนเฝ้าระวังภาวะพิษต่อตับและตรวจติดตามการทำงานของตับให้มีความถี่มากขึ้น โดยเฉพาะกลุ่มที่มีระดับ Direct Bilirubin สูง เพื่อป้องกันการเกิดพิษต่อตับที่รุนแรง

¹ สาขาวิชาสุขภาพดิจิทัล คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม 73000 ประเทศไทย Department of Digital Health, Faculty of Pharmacy, Silpakorn University, Sanam Chandra Palace Campus, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

² สาขาวิชาบริบาลทางเภสัชกรรม คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม 73000 ประเทศไทย Department of Pharmaceutical Care, Faculty of Pharmacy, Silpakorn University, Sanam Chandra Palace Campus, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

³ กลุ่มงานเภสัชกรรม โรงพยาบาลกำแพงเพชร 62000 ประเทศไทย Pharmacy Department, Kamphaeng Phet Hospital, Kamphaeng Phet, 62000, Thailand.



คำสำคัญ : การเกิดพิษต่อตับ, ยาต้านวัณโรค, วัณโรคปอด, บั๊จยเสี่ยง

Abstract

Objective: To investigate factors associated with first-line anti-tuberculosis drug-induced hepatotoxicity (ATDH) in HIV-negative pulmonary tuberculosis (TB) patients. **Method:** Five hundred and nine HIV-negative pulmonary TB patients (> 18 Yr) who were treated with first-line anti-TB drug at Kamphaeng Phet hospital, Pichit hospital, Uthai Thani hospital, and Chainat Narenthorn Hospitals during October 2019 - March 2023, were included in the study. Their electronic medical records were retrospectively reviewed and used for data analysis. Statistical testing using Chi-square, independent T-test, and binary logistic regression ($p < 0.05$) were performed. **Results:** Four factors were significantly associated with ATDH. The strongest predictor was direct bilirubin > 0.7 mg/dL (OR 10.70, 95% CI 4.51–25.39), followed by elderly (> 75 years) (OR 4.55, 95% CI 1.14–18.09), albumin < 3.5 g/dL (OR 3.47, 95% CI 1.92–6.25), and anemia (OR 1.61, 95% CI 1.01–2.57), respectively. **Conclusion:** Direct bilirubin > 0.7 mg/dL is the most significant risk factor for ATDH. Other factors such as advanced age, low albumin, and anemia also showed a great impact. Patients should be screened for these risk factors before initiating the therapy. Intensive surveillance and more frequent liver function monitoring are essential, particularly for those with elevated direct bilirubin, to prevent severe hepatotoxicity.

Keyword: hepatotoxicity, anti-tuberculosis drugs, pulmonary tuberculosis, risk factor

บทนำ (Introduction)

วัณโรค (Tuberculosis) เป็นโรคติดต่อที่เป็นปัญหาสาธารณสุขไทย ตามแนวทางการควบคุมวัณโรคประเทศไทยสูตรยาสำหรับผู้ป่วยวัณโรครายใหม่คือสูตรยาด้านวัณโรคแนวที่1(2HRZE/4HR) ได้แก่isoniazid(H), rifampicin(R), ethambutol(E) และ pyrazinamide(Z) โดยสูตรยาดังกล่าวพบอุบัติการณ์การเกิดพิษต่อตับประมาณร้อยละ 8 – 9.1 โดยปัจจัยเสี่ยงของการเกิดพิษต่อตับจากยาด้านวัณโรคจำแนกเป็นกลุ่ม ได้แก่ 1) ปัจจัยจากคุณลักษณะของผู้ป่วย เช่น เพศ อายุ พฤติกรรมสุขภาพ โรคประจำตัว ภาวะทุพโภชนาการ การติดเชื้อไวรัสตับอักเสบบี 2) ปัจจัยทางพันธุกรรม เช่น การตรวจพบยีน NAT2 Diplotype 3) ปัจจัยจากยาด้านวัณโรคและยาอื่นที่ได้รับร่วมด้วย

ที่ผ่านมาในประเทศไทยมีการศึกษาปัจจัยเสี่ยงของการเกิดพิษต่อตับจากยาด้านวัณโรคโดยในกลุ่มผู้ป่วยภาคอีสานพบปัจจัยเสี่ยงที่สัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับจากยาด้านวัณโรค 6 ปัจจัย ได้แก่ อายุมากกว่า 60 ปี การติดเชื้อ HIV ภาวะโลหิตจาง ดัชนีมวลกาย < 18.5 kg/m² ระดับ albumin (alb) < 3.5 g/dL และยาที่ใช้ร่วม การศึกษาในกลุ่มประชากรภาคใต้ พบปัจจัยเสี่ยงคือ อายุมากกว่า 60 ปี และระดับ alb < 3.5 g/dL และการศึกษาในกลุ่มประชากรภาคกลางพบปัจจัยเสี่ยง ได้แก่ มียีน NAT2 acetylator ชนิด slow, อายุ 60 ปีขึ้นไป, ระดับ alb < 3.5 g/dL และมีภาวะตับอักเสบริื้อรัง จากการศึกษาที่ผ่านมายังไม่มี



การศึกษาปัจจัยเสี่ยงจากกลุ่มประชากรภาคเหนือ อีกทั้งองค์การอนามัยโรคคาดการณ์ว่าจำนวนผู้ป่วยติดเชื้อ HIV ในประเทศไทยมีแนวโน้มลดลง ผู้ศึกษาจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาเพื่อค้นหาปัจจัยเสี่ยงการเกิดพิษต่อตับจากยาต้านไวรัสโรคในผู้ป่วยโรคปอดที่ไม่ติดเชื้อ HIV เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการดูแลผู้ป่วยโรคต่อไป

วัตถุประสงค์ (Objective)

เพื่อศึกษาปัจจัยที่สัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับจากยาต้านไวรัสโรคแนวที่หนึ่งในผู้ป่วยโรคปอดที่ไม่ติดเชื้อ HIV

อุปกรณ์และวิธีการ (Materials and Method)

การศึกษานี้เป็นการศึกษาแบบย้อนหลัง (retrospective study) จากเวชระเบียนในระบบอิเล็กทรอนิกส์

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรของการวิจัยคือ ผู้ป่วยโรคปอดรายใหม่ที่ได้รับยาต้านไวรัสโรคแนวที่หนึ่งจากโรงพยาบาลกำแพงเพชร โรงพยาบาลพิจิตร โรงพยาบาลชัยนาทนเรนทร และโรงพยาบาลอุทัยธานี ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2562 - วันที่ 31 มีนาคม 2566

เกณฑ์การคัดเข้าร่วมการศึกษา คือเป็นผู้ป่วยโรคปอดรายใหม่ที่ไม่ติดเชื้อ HIV อายุ 18 ปีขึ้นไปและได้รับการรักษาด้วยยาต้านไวรัสโรคแนวที่ 1 ส่วนเกณฑ์การคัดออก ได้แก่ ผู้ป่วยที่มีประวัติติดเชื้อไวรัสตับอักเสบบุ้ป่วยที่ตับหรือท่อน้ำดีทำงานบกพร่อง หรือผู้ป่วยที่มีข้อมูลไม่ครบถ้วน (ขาดผลตรวจทางห้องปฏิบัติการก่อนเริ่มยาต้านไวรัสโรคแนวที่หนึ่ง)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

โปรแกรม PSPP version 2.0.0-g5b54d1 เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การเก็บรวบรวมข้อมูล

โดยเก็บข้อมูลผู้ป่วยทุกรายที่ผ่านเกณฑ์คัดเข้าและคัดออกตั้งแต่เริ่มยาต้านไวรัสโรคจนกระทั่งครบการรักษาเดือนที่ 3 หรือหยุดใช้ยาต้านไวรัสโรคแนวที่ 1 เนื่องจากเกิดอาการไม่พึงประสงค์จากยา ข้อมูลที่เก็บรวบรวมประกอบด้วย 1) ข้อมูลด้านคุณลักษณะของผู้ป่วย ได้แก่ อายุ เพศ น้ำหนัก ส่วนสูง ดัชนีมวลกาย พฤติกรรมการดื่มแอลกอฮอล์ และสูบบุหรี่ 2) ข้อมูลด้านคลินิก ได้แก่ โรคเบาหวาน โรคความดันโลหิตสูง โรคโลหิตจางหรือมีระดับ Hgb < 13.0 g/dL ในผู้ชาย และ < 12.0 g/dL ในผู้หญิง ผลทางห้องปฏิบัติการก่อนเริ่มยาต้านไวรัสโรค (ระดับ bilirubin, alb, เอนไซม์ AST, ALT, ALP, Hgb, Hct) ประวัติ COVID-19 3) ข้อมูลการใช้ยา ได้แก่ ขนาดยาต้านไวรัสโรค (H, R, Z) การใช้ยาที่มีอันตรกิริยากับยาต้านไวรัสโรคแนวที่ 1 ประวัติการใช้ยาหรือสมุนไพรที่มีผลการเกิดพิษต่อตับร่วมกับการรักษาไวรัสโรค

การวิจัยนี้ผ่านการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์จากมหาวิทยาลัยศิลปากร หมายเลขใบรับรอง COA 66.0621-040

การวิเคราะห์ข้อมูล

ส่วนที่ 1 ใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ความถี่ ร้อยละ สำหรับอธิบายข้อมูลลักษณะประชากร

ส่วนที่ 2 ใช้สถิติ Chi-square test และ T-test เพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับ และใช้การวิเคราะห์แบบหลายตัวแปร (Multivariable analysis) ด้วยสถิติ Binary logistic regression สำหรับศึกษาขนาดความสัมพันธ์ของปัจจัยต่อการเกิดพิษต่อตับ โดยกำหนดค่านัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$

ผลและวิจารณ์ (Result and Discussion)

ผลการวิจัยแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) ข้อมูลลักษณะของประชากร 2) การวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับ

1) ข้อมูลลักษณะประชากร

จากข้อมูลผู้ป่วย 509 ราย เป็นกลุ่มไม่เกิดพิษต่อตับ 423 ราย (83.10%) และกลุ่มที่เกิดพิษต่อตับ 86 ราย (16.89%) ประชากรส่วนใหญ่เป็นเพศชาย (69.94%) ค่ามัธยฐานอายุในกลุ่มไม่เกิดพิษต่อตับเท่ากับ 53 ปี และกลุ่มที่เกิดพิษต่อตับเท่ากับ 61 ปี พฤติกรรมการสูบบุหรี่พบในกลุ่มไม่เกิดพิษต่อตับ (25.30%) สูงกว่ากลุ่มที่เกิดพิษต่อตับ (15.12%) ในส่วนของโรคประจำตัวกลุ่มที่เกิดพิษต่อตับเป็นโรคโลหิตจาง (50.00%) มากกว่ากลุ่มไม่เกิดพิษต่อตับ (38.30%) ผลทางห้องปฏิบัติการก่อนเริ่มยาต้านไวรัสโรคพบว่า กลุ่มที่ไม่เกิดพิษต่อตับมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงปกติ แต่กลุ่มที่เกิดพิษต่อตับมีค่าเฉลี่ยของระดับ alb, AST, ALT สูงกว่าค่าปกติ และระดับ Hgb, Hct ต่ำกว่าค่าปกติเนื่องจากส่วนใหญ่เป็นโรคโลหิตจาง ข้อมูลการใช้ยาพบว่าค่าเฉลี่ยของขนาดยาต้านไวรัสโรคใกล้เคียงกันทั้ง 2 กลุ่ม และพบการใช้ยาที่มีอันตรกริยาและการใช้ยาที่ผลการเกิดพิษต่อตับในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกันทั้ง 2 กลุ่ม ตามตารางที่ 1

2) การวิเคราะห์หาปัจจัยที่สัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับจากยาด้านไวรัสโรคแนวที่ 1

การศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับจากการวิเคราะห์ด้วยสถิติ Chi-square test และ independent T-test พบปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับจากยาด้านไวรัสโรคแนวที่หนึ่งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จำนวน 9 ปัจจัย ได้แก่ อายุ, ระดับ Hgb, Hct, Direct Bilirubin (DB), alb, เอนไซม์ AST, ALT การสูบบุหรี่ และโรคโลหิตจาง ดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อนำทั้ง 9 ปัจจัยมาวิเคราะห์ด้วยสถิติ Binary logistic regression พบว่ามี 4 ปัจจัย ที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับจากยาด้านไวรัสโรคอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เรียงตามลำดับอิทธิพลที่มีผลต่อการเกิดพิษต่อตับ ได้แก่ 1) ระดับ DB > 0.7 mg/dL (OR 10.70, 95%CI 4.51 – 25.39) โดยจากการวิเคราะห์โดยใช้กลุ่มค่าปกติอ้างอิง พบว่าระดับ DB ที่สูงขึ้นก่อนเริ่มยารักษาโรคสัมพันธ์กับภาวะการเกิดพิษต่อตับ 2) ภาวะสูงอายุ (> 75 ปีขึ้นไป) (OR 4.55, 95%CI 1.14 – 18.09) โดยจากการวิเคราะห์พบว่าเมื่ออายุมากขึ้น มีแนวโน้มสัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับ 3) ระดับ alb < 3.5 g/dL (OR 3.47, 95%CI 1.92 – 6.25) โดยจากการวิเคราะห์ พบว่าระดับ alb ที่ลดลงสัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับ 4) โรคโลหิตจาง (OR 1.61, 95%CI 1.01 – 2.57) จากข้อมูลที่รวบรวมมาพบว่าผู้ป่วยโรคโลหิตจางมีจำนวนมากถึงร้อยละ 50 ในกลุ่มที่เกิดพิษต่อตับ ตามตารางที่ 2

ปัจจัยที่สัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับมี 4 ปัจจัย ปัจจัยแรกคือ ระดับ DB > 0.7 mg/dL ซึ่งไม่พบจากการศึกษาที่ผ่านมา เนื่องจากที่ผ่านมายังไม่ได้มีการศึกษาว่า DB เป็นปัจจัยเสี่ยงที่ก่อให้เกิดพิษต่อตับ อย่างไรก็ตาม Wang S และคณะพบว่า total bilirubin (TB) เป็นปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดตับวายเฉียบพลันจากยาด้านไวรัสโรค ปัจจัยถัดมาคือ สูงอายุ (อายุ > 75 ปีขึ้นไป) และ ระดับ alb < 3.5 g/dL ซึ่งสอดคล้องกับ



การศึกษาของทศพร โมระเสริฐและคณะ บุษกร หาญวงษ์และคณะ และธนพร ลิขิตเทียบทองและคณะ โดยในผู้สูงอายุมากกว่า 75 ปี มีแนวโน้มที่การขับออกของยาลดลง อีกทั้งอาจมีโรคประจำตัวที่ต้องใช้ยาาร่วมกันหลายชนิดจนเป็นสาเหตุให้เกิดพิษต่อดัชนีได้ ภาวะ $\text{alb} < 3.5 \text{ g/dL}$ เป็นภาวะทุพโภชนาการ ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการเกิดพิษต่อดัชนีมากขึ้นเนื่องจากเพิ่มจำนวนยาอิสระ (free drug) รวมถึงภาวะ hypoalbuminemia มีผลให้สาร antioxidant ลดลงเสี่ยงต่อการเกิดพิษต่อดัชนีได้ และปัจจัยสุดท้ายคือ ภาวะโลหิตจาง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของบุษกร หาญวงษ์และคณะ โดยมีผลให้การขนส่งออกซิเจนลดลงจึงเกิดภาวะเป็นพิษต่อดัชนีได้ตามแนวทางการควบคุมโรค ประเทศไทย พ.ศ.2564 มีคำแนะนำให้พิจารณาตรวจการทำงานของตับในผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงในการเกิดตับอักเสบ ได้แก่ ผู้สูงอายุ > 60 ปี ตี๋มสุราเป็นประจำ มีประวัติเคยเป็นโรคตับหรือติดเชื้อไวรัสตับอักเสบบี การติดเชื้อเอชไอวี มีภาวะทุพโภชนาการ หญิงตั้งครรภ์ เป็นต้น จากการศึกษานี้อาจนำไปใช้พิจารณาคัดกรองผู้ป่วยที่มีปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดพิษต่อดัชนีเพิ่มเติม

การศึกษานี้มีข้อจำกัดเนื่องจากการเป็นการศึกษาแบบย้อนหลัง มักพบปัญหาความไม่ครบถ้วนของข้อมูล ข้อมูลที่สำคัญบางส่วนจำเป็นต้องสัมภาษณ์ผู้ป่วยหรือผู้ดูแลเพิ่มเติม เช่น พฤติกรรมการดื่มสุราซึ่งเป็นปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดพิษต่อดัชนีที่สำคัญตามแนวทางการควบคุมโรคประเทศไทย พฤติกรรมการใช้ยาสมุนไพรเนื่องจากคนไทยมีการบริโภคยาสมุนไพรเพื่อรักษาโรคร่วมด้วยซึ่งในยาสมุนไพรบางรายการมีรายงานการเกิดพิษต่อดัชนี เช่น ขี้เหล็ก กัญชา เป็นต้น และพฤติกรรมการสูบบุหรี่ นอกจากนี้การศึกษานี้ไม่ได้เก็บข้อมูลความเสี่ยงทางพันธุกรรมเนื่องจากในช่วงการเก็บข้อมูลโรงพยาบาลทั้ง 4 แห่งมีการส่งตรวจยีน NAT2 diplotype น้อย หากจะทำการศึกษาปัจจัยเสี่ยงต่อควรทำแบบดำเนินการไปข้างหน้า ที่มีการนำผลตรวจยีน NAT2 diplotype มาใช้ร่วมด้วย ผลการศึกษาปัจจัยเสี่ยงนี้สามารถนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการเกิดพิษต่อดัชนีจากยาด้านโรคต่อไป

สรุป

ปัจจัยที่สัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อดัชนีจากยาด้านโรคแนวที่หนึ่งในผู้ป่วยโรคปอดที่ไม่ติดเชื้อ HIV ได้แก่ ผู้ป่วยที่มีระดับ DB มากกว่า 0.7 mg/dL ผู้ป่วยที่มีอายุมากกว่า 75 ปีขึ้นไป ผู้ป่วยที่มีระดับ albumin น้อยกว่า 3.5 g/dL และผู้ป่วยที่เป็นโรคโลหิตจาง จึงควรทำการเฝ้าระวังและติดตามอาการไม่พึงประสงค์อย่างใกล้ชิดหลังเริ่มยาต้านโรคแนวที่หนึ่งในผู้ป่วยกลุ่มนี้



เอกสารอ้างอิง

- กองวัณโรค กรมควบคุมโรค. (2564). แนวทางการควบคุมวัณโรคประเทศไทย พ.ศ.2564 (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์อักษรกราฟฟิคแอนดี้ไซน์.
- ธนพร ลิขิตเทียนทอง, จันทวีจิรา ชอบประดิธ, วารณี บุญช่วยเหลือ. (2568). ความสัมพันธ์ระหว่างพหุสัญญาณของยีนเอ็นอะซีติลทรานสเฟอเรส 2 และภาวะตับอักเสบที่เหนี่ยวนำด้วยยาต้านวัณโรค [บทคัดย่อ]. ใน กองวัณโรค กรมควบคุมโรค, เอกสารรวมเล่มบทคัดย่องานประชุมวิชาการวัณโรคระดับชาติ 2568 (น. 14).
- ปาจริย์ ศรีอุทธา. (2017). การบาดเจ็บที่ตับเนื่องจากยา. *Thai Bull Pharm Sci*, 12(2). 69–83.
- บุษกร หาญวงศ์, ปาริโมก เกิดจันทิก, สุรศักดิ์ เกศมศิริ, อนันต์ ไชยกุลวัฒนา. (2556). การพัฒนาแบบคัดกรองเพื่อประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดพิษต่อตับในผู้ป่วยที่ไ้ยาต้านวัณโรค. *วารสารวิชาการสาธารณสุข*, 22(3), 454–63.
- Anand, A. C., Seth, A. K., Paul, M., & Puri, P. (2006). Risk Factors of Hepatotoxicity During Anti-tuberculosis Treatment. *Medical journal, Armed Forces India*, 62(1), 45–49.
[https://doi.org/10.1016/S0377-1237\(06\)80155-3](https://doi.org/10.1016/S0377-1237(06)80155-3)
- El Bouazzi O, Hammi S, Bourkadi JE, Tebaa A, Tanani DS, Soulaymani-Bencheikh R, et al. (2016) First line anti-tuberculosis induced hepatotoxicity: Incidence and risk factors. *Pan Afr Med J*, 25:1–10
- Morasert T, Ruengchaisiwawaith T. (2021). Prevalence and Risk Factors Associated with First-Line Anti-Tuberculosis Induced Hepatotoxicity in Suratthani Hospital, Thailand. *J Med Assoc Thai*, 104:233-9. doi.org/10.35755/jmedassocthai.2021.02.11550
- Mushiroda, T., Yanai, H., Yoshiyama, T., Sasaki, Y., Okumura, M., Ogata, H., & Tokunaga, K. (2016). Development of a prediction system for anti-tuberculosis drug-induced liver injury in Japanese patients. *Human genome variation*, 3, 16014. <https://doi.org/10.1038/hgv.2016.14>
- Wang, S., Shangguan, Y., Ding, C., Li, P., Ji, Z., Shao, J., Fang, H., Yang, M., Shi, P., Wu, J., Ren, J., Yang, S., Yuan, J., Shi, Y., Li, J., Li, L., & Xu, K. (2020). Risk factors for acute liver failure among inpatients with anti-tuberculosis drug-induced liver injury. *Journal of International Medical Research*, 48(1). <https://doi.org/10.1177/0300060518811512>.



ตารางที่ 1 ข้อมูลลักษณะประชากร (N = 509)

คุณลักษณะประชากร	กลุ่มที่ไม่เกิดพิษ ต่อตับ (423 ราย)	กลุ่มที่เกิดพิษ ต่อตับ (86 ราย)	p-value
เพศ, จำนวน (ร้อยละ)			0.826
ชาย	295 (69.74)	61 (70.93)	
หญิง	128 (30.26)	25 (29.07)	
อายุ, มัธยฐาน (ปี)	53	61	0.000*
น้ำหนัก, เฉลี่ย±SD (กิโลกรัม)	51.88 (± 11.38)	51.20 (± 11.92)	0.614
ส่วนสูง, เฉลี่ย±SD (เซนติเมตร)	162.06 (± 8.60)	161.87 (± 6.30)	0.850
ดัชนีมวลกาย เฉลี่ย±SD (กิโลกรัมต่อตารางเมตร)	19.82 (± 4.81)	19.51 (± 4.20)	0.578
พฤติกรรม, จำนวน (ร้อยละ)			
ดื่มแอลกอฮอล์	82 (19.39)	21 (24.42)	0.290
สูบบุหรี่	107 (25.30)	13 (15.12)	0.043*
โรคประจำตัว, จำนวน (ร้อยละ)			
โรคเบาหวาน	102 (24.11)	21 (24.42)	0.952
โรคความดันโลหิตสูง	117 (27.66)	25 (29.07)	0.790
โรคโลหิตจาง	162 (38.30)	43 (50.00)	0.044*
ผลทางห้องปฏิบัติการก่อนเริ่มยาต้านวัณโรค			
ระดับ direct bilirubin (DB), เฉลี่ย±SD (mg/dL)	0.20 (± 0.29)	0.43 (± 0.65)	0.000*
ระดับ albumin, เฉลี่ย±SD (g/dL)	3.32 (± 1.06)	2.93 (± 0.61)	0.001*
ระดับเอนไซม์ตับ (AST), เฉลี่ย±SD (U/L)	36.94 (± 28.50)	50.08 (± 54.77)	0.001*
ระดับเอนไซม์ตับ (ALT), เฉลี่ย±SD (U/L)	25.73 (± 21.08)	34.29 (± 35.43)	0.003*
ระดับเอนไซม์ ALP, เฉลี่ย±SD (U/L)	140.68(±118.52)	143.95 (± 86.80)	0.808



ตารางที่ 1 ข้อมูลลักษณะประชากร (N = 509) (ต่อ)

คุณลักษณะประชากร	กลุ่มที่ไม่เกิดพิษ ต่อตับ (423 ราย)	กลุ่มที่เกิดพิษ ต่อตับ(86 ราย)	p-value
ระดับ Hgb, เฉลี่ย±SD (g/dL)	11.22 (± 2.20)	10.50 (± 2.23)	0.006*
ระดับ Hct, เฉลี่ย±SD (g/dL)	34.23 (± 6.48)	32.20 (± 6.83)	0.009*
ประวัติการติดเชื้อโคโรนาไวรัส 2019, จำนวน (ร้อยละ)	56 (13.24)	8 (9.30)	0.316
ขนาดยาต้านวัณโรคแนวที่ 1			
Isoniazid, เฉลี่ย±SD (mg/kg)	5.89 (± 1.09)	5.96 (± 1.05)	0.551
Rifampicin, เฉลี่ย±SD (mg/kg)	10.17 (± 1.23)	10.23 (± 1.37)	0.699
Pyrazinamide, เฉลี่ย±SD (mg/kg)	27.70 (± 2.84)	28.05 (± 2.83)	0.302
การใช้ยาที่อันตรกริยากับยาต้านวัณโรคแนวที่ 1, จำนวน (ร้อยละ)	29 (6.86)	6 (6.98)	0.972
Paracetamol	28 (6.62)	6 (6.98)	
Carbamazepine	1 (0.24)	0 (0.00)	
ประวัติการใช้ยาที่มีผลการเกิดพิษต่อตับ, จำนวน (ร้อยละ)	145 (34.28)	33 (38.37)	0.468
Carbamazepine	1 (0.24)	0 (0.00)	
Hydralazine	95 (22.46)	18 (20.93)	
Ketoconazole	1 (0.24)	0 (0.00)	
Levofloxacin	1 (0.24)	0 (0.00)	
Phenytoin	2 (0.47)	1 (1.16)	
Propylthiouracil	4 (0.95)	1 (1.16)	
Simvastatin	62 (14.66)	16 (18.60)	
Sulfasalazine	1 (0.24)	0 (0.00)	
Valproic acid	3 (0.71)	0 (0.00)	
ประวัติการใช้สมุนไพรที่มีผลการเกิดพิษต่อตับ, จำนวน (ร้อยละ)	7 (1.65)	3 (3.49)	0.384
กัญชา	3 (0.71)	2 (2.33)	
ซีเห็บ	1 (0.24)	0 (0.00)	
ชาเขียว	3 (0.71)	1 (1.16)	

* มีนัยสำคัญทางสถิติ (P-value < 0.05)



ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่สัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับด้วย logistic regression

ปัจจัย	OR	95%CI	p-value
อายุ			
18 – 30 ปี ^{อ้างอิง}			
31 – 45 ปี	1.35	0.36 – 5.09	0.660

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่สัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับด้วย logistic regression (ต่อ)

ปัจจัย	OR	95%CI	p-value
อายุ (ต่อ)			
46 – 60 ปี	1.57	0.45 – 5.51	0.485
61 – 75 ปี	3.29	0.95 – 11.41	0.061
75 ปีขึ้นไป	4.55	1.14 – 18.09	0.032*
การสูบบุหรี่			
ไม่สูบบุหรี่ ^{อ้างอิง}			
สูบบุหรี่	0.53	0.28 – 0.99	0.045
โรคโลหิตจาง			
ไม่เป็นโรคโลหิตจาง ^{อ้างอิง}			
เป็นโรคโลหิตจาง	1.61	1.01 – 2.57	0.045*
ระดับ Hgb			
< 11 g/dL	1.47	0.89 – 2.44	0.135
11.01 – 12.00 g/dL	0.56	0.28 – 1.15	0.117
12.01 – 15.00 g/dL ^{อ้างอิง}			
ตั้งแต่ 15.01 g/dL	1.56x10 ⁻⁹	0.00 - infinit	0.999
ระดับ Hct			
< 30.99%	1.47	0.89 – 2.44	0.135
31 – 34.99%	0.56	0.28 – 1.15	0.117
35 -45.99% ^{อ้างอิง}			
ตั้งแต่ 46%	1.56x10 ⁻⁹	0.00 - infinit	0.999
ระดับ Direct Bilirubin			
0.0 -0.2 mg/dL ^{อ้างอิง}			
0.3 – 0.4 mg/dL	0.85	0.40 – 1.80	0.664
0.5 – 0.6 mg/dL	1.85	0.58 – 5.88	0.296



ปัจจัย	OR	95%CI	p-value
ตั้งแต่ 0.7 mg/dL	10.70	4.51 – 25.39	0.000*
ระดับ albumin			
<3.5 g/dL	3.47	1.92 – 6.25	0.000**
3.5 – 5 g/dL ^{ข้างอิง}			
ตั้งแต่ 5 g/dL	3.614	0.00 - infinit	0.999
ระดับเอนไซม์ AST			
< 35 U/L ^{ข้างอิง}			
36 – 45 U/L	1.23	0.54 – 2.81	0.614
46 – 55 U/L	3.60	1.74 – 7.47	0.001*

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่สัมพันธ์กับการเกิดพิษต่อตับด้วย logistic regression (ต่อ)

ปัจจัย	OR	95%CI	p-value
ระดับเอนไซม์ AST (ต่อ)			
56 – 65 U/L	1.92×10^{-9}	0.00 – infinit	0.998
66 – 75 U/L	1.65	0.52 – 5.18	0.394
> 75 U/L	2.54	1.27 – 5.10	0.009*
ระดับเอนไซม์ ALT			
< 35 U/L ^{ข้างอิง}			
36 – 45 U/L	2.56	1.29 – 5.09	0.007*
46 – 55 U/L	0.50	0.12 – 2.19	0.360
56 – 65 U/L	5.17	1.68 – 15.97	0.004*
66 – 75 U/L	0.75	0.09 – 6.15	0.792
> 75 U/L	2.54	1.06 – 6.09	0.036*

* มีนัยสำคัญทางสถิติ (P-value < 0.05)

การสกัดและวิเคราะห์สารพฤษเคมีเชิงปริมาณในพืชกระท่อมก้านแดงสดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟและการปรับความเป็นกรดช่วยในการสกัด

Microwave-Assisted Extraction and Quantitative Analysis of Phytochemicals from Fresh Red Vein Kratom (*Mitragyna speciosa*) Leaves with Acidification

อารีรัตน์ เรืองเวช¹ และ มูฮัมหมัด นียมเดชา²

Areerat Ruengwet¹ and Muhammad Niyomdech²

บทคัดย่อ

กระท่อมก้านแดง (Red Vein Kratom, *Mitragyna speciosa* (Korth.) Havil.) จัดเป็นพืชกระท่อมชนิดหนึ่งซึ่งมีสารทางพฤษเคมีหลายชนิดจำนวนมาก แต่สารทางพฤษเคมีหลักที่พบคือสารในกลุ่มแอลคาลอยด์ ซึ่งการสกัดสารดังกล่าวจากกระท่อมก้านแดงมีหลายวิธี ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาขั้นตอนของวิธีการสกัดสารสกัดจากใบกระท่อมก้านแดงสดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟด้วยตัวทำละลาย น้ำกลั่น น้ำผสมเอทานอลในอัตราส่วนที่เท่ากัน และการปรับความเป็นกรดต่อปริมาณสารสำคัญในใบกระท่อมก้านแดงโดยใช้กระบวนการทางเคมีอย่างยั่งยืน นอกจากนี้ได้นำสารสกัดไปวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงคุณภาพด้วยวิธีการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟีแบบชั้นบางและวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกและปริมาณฟลาโวนอยด์ พบว่า การสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟและการปรับสภาพความเป็นกรดในการสกัดเป็นอีกวิธีที่เพิ่มผลร้อยละของการสกัด (9.267, 9.467, 22.567, 24.967 ตามลำดับ) และสกัดสารพฤษเคมี (ปริมาณฟีนอลิกรวม (TPC): 1.18×10^7 , 1.70×10^7 , 4.30×10^6 , 2.40×10^6 mg_{GAE}/g_{CE} และปริมาณฟลาโวนอยด์รวม (TFC): 4.54×10^5 , 5.88×10^5 , n/a, 6.10×10^4 mg_{QE}/g_{CE} ตามลำดับ)

คำสำคัญ: การสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ, กระท่อมก้านแดง (*Mitragyna speciosa* (Korth.) Havil.), การสกัดโดยการปรับสภาพความเป็นกรด, สารพฤษเคมี

Abstract

Red Vein Kratom (*Mitragyna speciosa* (Korth.) Havil.) is a type of kratom plant containing numerous phytochemicals, but the main phytochemical found is alkaloid. There are several methods for extracting these substances from Kratom leaves. This preliminary research studied a method of extracting fresh Kratom leaves using microwave irradiation with solvents distilled water and ethanol mixed in equal proportions and adjusting

¹ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

Department of Chemistry, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

² ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

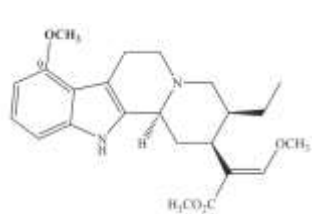
Department of Chemistry, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

the acidity to affect the amount of important substances in the leaves using sustainable chemical processes. Furthermore, the extracted material was analyzed qualitatively using thin-layer chromatography for identification, and the quantitative properties of the phenolic and flavonoid content. The results showed that the microwave – assisted extraction method and acidity adjustment during extraction are effective methods that increase the extraction percentage. (9.267, 9.467, 22.567, 24.967 respectively) And it allows to extraction. (TPC: 1.18×10^7 , 1.70×10^7 , 4.30×10^6 , 2.40×10^6 mg_{GAE}/g_{CE} and TFC: 4.54×10^5 , 5.88×10^5 , n/a, 6.10×10^4 mg_{QE}/g_{CE} respectively)

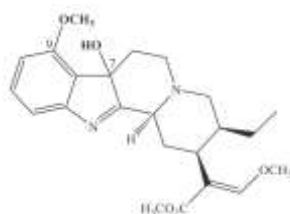
Keyword: Microwave-Assisted Extraction, Red Vein Kratom (*Mitragyna speciosa* (Korth.) Havil.), Acidification extraction, Phytochemical

บทนำ

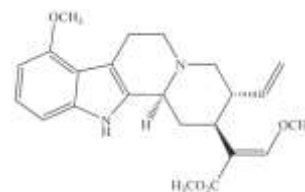
กระท่อมก้านแดง (Red Vein Kratom) จัดเป็นพืชกระท่อมชนิดหนึ่ง มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Mitragyna speciosa* (Korth.) Havil. จัดเป็นพืชวงศ์ Rubiaceae เป็นพืชที่พบมากในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในประเทศไทยพบได้มากในแถบภาคใต้ (สวितรี อัสณางค์กรชัยและคณะ, 2563) กระท่อมสายพันธุ์ก้านแดงมีขนาดใหญ่ ใบกว้าง ขอบใบเรียบ ลักษณะเส้นของก้านใบเป็นสีแดง ใบกระท่อมมีสรรพคุณในการบรรเทาอาการปวดฟัน ปวดท้อง อาการไอและอาการปวดเมื่อยตามร่างกาย รักษาแผลเปื่อย แผลพุพอง โรคท้องร่วง โรคบิดและโรคเบาหวาน (กรมการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก, 2565) การใช้พืชกระท่อมนิยมเคี้ยวสด ซึ่งมีรสขมหรือนำมาต้มน้ำร้อนจะได้สารที่มีสีน้ำตาลเข้มคล้ายสีของยางไม้ ซึ่งในใบกระท่อมมีสารสำคัญได้แก่ ไมทราไจนีน (Mitragynine) สเปซิโอไจนีน (Speciogynine) เพแนนเทอีน (Paynantheine) สเปซิโอซีเลียทีน (Speciociliatine) และ 7-ไฮดรอกซีไมทราไจนีน (7-hydroxymitragynine) (Hassan et al., 2013) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารในกลุ่มแอลคาลอยด์และอนุพันธ์ (Alkaloid and derivatives) ที่มีสรรพคุณในการลดการอักเสบของเนื้อเยื่อและระงับอาการปวด



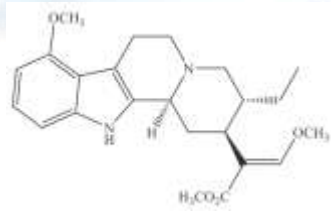
ไมทราไจนีน
(Mitragynine)



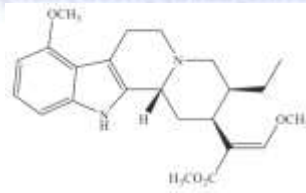
7-ไฮดรอกซีไมทราไจนีน
(7-hydroxymitragynine)



เพแนนเทอีน
(Paynantheine)



สเปซิโอไจนีน
(Speciogynine)



สเปซิโอซีเลียทีน
(Speciociliatine)

รูปที่ 1 โครงสร้างของสารที่สามารถพบในสารสกัดจากกระท่อม

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีพระราชบัญญัติพืชกระท่อม พ.ศ. 2565 โดยปรับปรุงจากพระราชบัญญัติพืชกระท่อม พ.ศ. 2486 และพระราชบัญญัติยาเสพติดให้โทษ พ.ศ. 2522 โดยมีสาระสำคัญ คือ การกำหนดมาตรการควบคุมการบริโภคพืชกระท่อม และการกำหนดบทลงโทษต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง (“Thailand’s New Legal Framework for Kratom,” n.d.; “พระราชบัญญัติพืชกระท่อม พ.ศ. 2565,” 2565; ปรุพณ์ รุจนธำรงค์, 2565) ซึ่งจากพระราชบัญญัตินี้ดังกล่าวทำให้สามารถเกิดการศึกษาและวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพืชกระท่อมและผลิตภัณฑ์ที่มาจากกระท่อมเพื่อใช้ในการทางการแพทย์ และการใช้พืชกระท่อมในการเป็นพืชเศรษฐกิจใหม่ในประเทศไทย สามารถสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกร ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ขององค์การสหประชาชาติ (UN) (*THE 17 GOALS | Sustainable Development*, n.d.) ได้แก่ เป้าหมายที่ 1 ขจัดความยากจน (No Poverty) การส่งเสริมการเพาะปลูกเพื่อนำไปจำหน่ายอย่างถูกกฎหมายทำให้เกิดรายได้แก่เกษตรกร, เป้าหมายที่ 3 การมีสุขภาพและความเป็นอยู่ที่ดี (Good Health And Well-Being) การวิจัยในการใช้พืชกระท่อมในทางการแพทย์และทางเภสัชศาสตร์ทำให้เกิดนวัตกรรม เวชภัณฑ์ทางเลือกและการเลือกใช้กระท่อมในทางการแพทย์ในอนาคต และเป้าหมายที่ 8 งานที่มีคุณค่าและการเติบโตทางเศรษฐกิจ (Decent Work and Economic Growth) การส่งเสริมอุตสาหกรรมการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากใบกระท่อม รวมไปถึงการส่งออกพืชและผลิตภัณฑ์จากกระท่อม เป็นการสร้างรายได้และส่งเสริมให้เกิดการเติบโตทางเศรษฐกิจที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์สุขภาพ

ในการสกัดสารจากพืชมีหลากหลายกรรมวิธี หนึ่งในกรรมวิธีที่น่าสนใจ คือ วิธีการสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave Assisted Extraction) โดยมีหลักการทำลายโครงสร้างของผนังเซลล์ของพืช ส่งผลให้สามารถสกัดสารสำคัญจากพืชได้ จากงานวิจัยของ Phupaboon et al. (2022) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสกัดใบกระท่อมและกัญชาแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและการแช่ในตัวทำละลาย พบว่า วิธีการสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟมีประสิทธิภาพของสารฟลักโกลิโนนสูงกว่าวิธีการสกัดโดยแช่ในตัวทำละลาย นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับสภาพความเป็นกรด - เบสที่เหมาะสมในการสกัด พบว่า สภาพความเป็นกรด - เบสและอุณหภูมิส่งผลต่อความเสถียรของโครงสร้างของแอลคาลอยด์ในสารสกัด (Basiliere & Kerrigan, 2020)

กระบวนการในการสกัดโดยทั่วไปจะใช้ตัวทำละลายในปริมาณมากและมีความอันตรายสูง จึงได้มีการปรับใช้เทคนิคทางเคมีอย่างยั่งยืนหรือเคมีสีเขียว (green chemistry) โดยการลดปริมาณการใช้ตัวทำละลายที่

เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นและมีกรรมวิธีการสกัดที่ปลอดภัย ส่งผลให้ได้สารสกัดที่มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาค้นคว้าวิธีการสกัดสารสกัดจากใบกระท่อมก้านแดงสดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟโดยใช้ตัวทำละลาย อาทิ น้ำกลั่น น้ำผสมเอทานอลในอัตราส่วนที่เท่ากัน และการปรับความเป็นกรดต่อปริมาณสารสำคัญในใบกระท่อมก้านแดงโดยใช้กระบวนการทางเคมีอย่างยั่งยืน นอกจากนี้ได้นำสารสกัดไปวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงคุณภาพและวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงปริมาณของสารสำคัญในใบกระท่อมก้านแดง ซึ่งสามารถนำองค์ความรู้จากการวิจัย อาทิ องค์ประกอบและปริมาณสารพิษทุกชนิดที่มีมาต่อยอดในการวิจัยและจัดทำผลิตภัณฑ์จากใบกระท่อมก้านแดงเพื่อนำมาใช้ในการแพทย์และผลิตภัณฑ์สุขภาพได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการสกัดใบกระท่อมก้านแดงสดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave-Assisted Extraction) สกัดด้วยตัวทำละลายน้ำกลั่น และน้ำกลั่นผสมเอทานอลในอัตราส่วนต่างๆ และการใช้กรดซิตริกร่วมด้วยในการปรับค่า pH ที่ส่งผลต่อปริมาณสารสกัดหยาบ และความบริสุทธิ์ของสารไมทราไจนีน
2. เพื่อตรวจหาความบริสุทธิ์ของสารไมทราไจนีนเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟีแบบชั้นบาง (Thin Layer Chromatography, TLC)
3. เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงปริมาณของสารสำคัญในใบกระท่อมก้านแดงของปริมาณฟีนอลิกรวมและปริมาณฟลาโวนอยด์รวม

อุปกรณ์และวิธีการ

ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้ตัวอย่างพืช (ใบกระท่อมก้านแดง) จากอำเภอสวนผึ้ง จังหวัดราชบุรี ประเทศไทย และใช้สารเคมีต่างๆ อาทิ น้ำกลั่นและน้ำขจัดไขมัน (H_2O), เอทานอลบริสุทธิ์ (C_2H_5OH), กรดซิตริก ($C_6H_8O_7$), โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$), เฮกเซน (C_6H_6), เอทิลแอซิเตต ($CH_3COOC_2H_5$), กรดแกลลิก (Gallic acid, $C_7H_6O_5$), สารละลาย Folin – Ciocateu, โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3), เควอซีทิน (Quercetin, $C_{15}H_{10}O_7$), อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$), โซเดียมแอซิเตต (CH_3COONa), เมทานอล (CH_3OH), ไมทราไจนีนมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

1. การศึกษาวิธีการสกัดใบกระท่อมก้านแดงสดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave - Assisted Extraction) โดยใช้กรดซิตริกร่วมด้วยในการปรับค่า pH โดยนำตัวอย่างพืช 30 กรัม มาบดละเอียดให้มีขนาดสม่ำเสมอด้วยเครื่องปั่น จากนั้นเตรียมตัวทำละลายเป็นสองอัตราส่วนเพื่อเปรียบเทียบผลการสกัด ได้แก่ ตัวทำละลายที่เป็นน้ำบริสุทธิ์และตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำ : เอทานอลในอัตราส่วน 1:1 โดยในแต่ละตัวทำละลายได้มีการปรับสภาพความเป็นกรดด้วยกรดซิตริก 1 % ในสารสกัดเข้มข้น และไม่ได้ปรับสภาพความเป็นกรด จากนั้นทำการสกัดโดยใช้ไมโครเวฟกำลังไฟ 400 W เป็นเวลา 20 นาที นำสารสกัดที่ได้มากรองร้อนด้วยกระดาษกรองและล้างเพื่อแยกของแข็งออกจากสารละลาย สำหรับสารสกัดที่มีการปรับสภาพความเป็นกรดได้นำมาปรับ pH ด้วย

สารละลาย NaOH จนมีค่า pH ประมาณ 9 (วัดโดยใช้กระดาษวัดค่า pH) นำสารละลายที่ผ่านการกรอง (ไม่ปรับค่า pH และปรับ pH) ไปทำการระเหยด้วยเครื่องกลั่นลดความดันแบบหมุน (Rotary evaporator) ทำให้แห้งจนได้สารสกัดหยาบ (crude extract) ชั่งน้ำหนัก (เพื่อนำไปหาผลได้ร้อยละของการสกัดสารสกัด) ดังสมการ (1) เก็บไว้ในภาชนะที่ปิดมิดชิดและที่อุณหภูมิที่เหมาะสม (ประมาณ 4 °C) จนถึงเวลานำไปวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณต่อไป

$$\text{ร้อยละผลได้ของสารสกัดหยาบ (\%)} = \frac{\text{ผลได้จริงของสารสกัดหยาบ (g)}}{\text{ผลได้เชิงทฤษฎีของสารสกัดหยาบ (g)}} \times 100 \quad (1)$$

2. การวิเคราะห์เชิงคุณภาพของสารสกัดจากใบกระท่อมก้านแดง โดยนำสารสกัดหยาบจากใบกระท่อมก้านแดงมาหาเอกลักษณ์โดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟีแบบชั้นบาง (Thin Layer Chromatography, TLC) เพื่อหาสารไมโทราไจนีนในสารสกัด โดยเทียบกับสารไมโทราไจนีนมาตรฐาน ภายใต้รังสี UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm จากนั้นคำนวณค่า Retention factor (R_f) จากโครมาโทแกรมของสารสกัดหยาบดังสมการ (2)

$$R_f = \frac{\text{ระยะที่สารเคลื่อนที่ (cm)}}{\text{ระยะที่ตัวทำละลายเคลื่อนที่ (cm)}} \quad (2)$$

3. การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกของสารสกัดจากใบกระท่อมก้านแดง อ้างอิงจาก (Sari et al., 2023) โดยมีการดัดแปลงเล็กน้อย โดยการตวงสารละลายตัวอย่าง 20 μL (เตรียมได้จากนำสารสกัดหยาบ 0.01 กรัม ละลายในตัวทำละลาย 10 mL) และสารละลาย Folin – Ciocateu 20 μL เขย่าเป็นเวลา 1 นาทีแล้วทิ้งไว้ 5 นาที จากนั้นเติมสารละลาย Na_2CO_3 ความเข้มข้น 7 % ปริมาตร 200 μL และน้ำซัดไอออน 10 μL เขย่าเป็นเวลา 1 นาทีแล้วทิ้งไว้ 120 นาทีในสภาวะมืด จากนั้นนำไปวัดการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยใช้เครื่อง UV – Visible Spectrophotometer (Biochrom EZ Read 2000 microplate reader ของบริษัท Harvard Bioscience ชนิดอ่านจากหลุมไมโครเพลท 96 หลุม) ที่ความยาวคลื่น 750 nm จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับกราฟความเข้มข้นของกรดแกลลิกมาตรฐานที่ $y = 0.0033x + 0.0493$ ($R^2=0.9643$) ค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมของสารสกัดหยาบ ($\text{mg}_{\text{GAE}}/\text{g}_{\text{CE}}$)

4. การวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์ของสารสกัดจากใบกระท่อมก้านแดง อ้างอิงจาก (Sari et al., 2023) โดยมีการดัดแปลงเล็กน้อย โดยการตวงสารละลายตัวอย่าง 50 μL (เตรียมได้จากนำสารสกัดหยาบ 0.01 กรัม ละลายในตัวทำละลาย 5 mL) เติมเมทานอลปริมาตร 100 μL และสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์เข้มข้น 10% ปริมาตร 20 μL เขย่า 5 ครั้งแล้วผสมทิ้งไว้ 3 นาที จากนั้นเติมสารละลายไฮเดียมแอสิตเตดความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 20 μL และเมทานอล 60 μL ทิ้งไว้ 40 นาทีในสภาวะมืด จากนั้นนำไปวัดการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยใช้เครื่อง UV – Visible Spectrophotometer (Biochrom EZ Read 2000 microplate reader ของบริษัท Harvard Bioscience ชนิดอ่านจากหลุมไมโครเพลท 96 หลุม) ที่ความยาวคลื่น 430 nm จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับ

กราฟความเข้มข้นของเคอชิตินมาตรฐานที่ $y = 0.0020x + 0.0388$ ($R^2 = 0.9655$) ค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของ มิลลิกรัมสมมูลของเคอชิตินต่อกรัมของสารสกัดหยาบ ($\text{mg}_{\text{QE}}/\text{g}_{\text{CE}}$)

ผลและวิจารณ์

การศึกษาวិธีการสกัดใบกระท่อมก้านแดงสดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave - Assisted Extraction) โดยใช้กรดซิตริกร่วมด้วยในการปรับค่า pH พบว่าผลได้ร้อยละของสารสกัดหยาบที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำ : เอทานอลในอัตราส่วน 1:1 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารออกฤทธิ์จากตัวอย่างได้ดีกว่าการใช้น้ำเพียงอย่างเดียว และการปรับสภาพความเป็นกรดเป็นปัจจัยที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดสารออกฤทธิ์จากพืชได้อย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 1) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ López-Salazar et al. (2023) ที่รายงานว่าเทคนิค การสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์จากพืชได้ เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟช่วยทำลายโครงสร้างผนังเซลล์พืช ส่งผลให้สารสำคัญถูกปลดปล่อยออกมาได้มากขึ้น จึงทำให้ได้ปริมาณสารสกัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการสกัดแบบทั่วไป และยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Zhang et al. (2018) ที่ศึกษาการสกัดแอลคาลอยด์จากพืช เช่น *Stephania sinica* ที่พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลมีผลต่อประสิทธิภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยการใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอลในช่วงร้อยละ 40–80 ให้ปริมาณสารสกัดสูงสุด เนื่องจากตัวทำละลายผสมสามารถเพิ่มความสามารถในการละลายสารได้หลากหลายและช่วยให้การแพร่ของตัวทำละลายเข้าสู่เซลล์พืชได้ดีขึ้น ดังนั้น การใช้ตัวทำละลายน้ำ : เอทานอลในอัตราส่วน 1:1 จึงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดได้ดีกว่าการใช้น้ำเพียงอย่างเดียว และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Md Yusoff & Shafie, (2024) ที่รายงานว่าการใช้กรดซิตริกร่วมกับเทคนิคการสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์จากพืชได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของกรดส่งผลให้ปริมาณสารสกัดสูงขึ้น เนื่องจากสภาวะกรดช่วยให้สารกลุ่มแอลคาลอยด์อยู่ในรูปที่ละลายได้ดีขึ้น และช่วยให้โครงสร้างผนังเซลล์พืชถูกทำลายได้ง่าย ส่งผลให้สารสำคัญถูกปลดปล่อยออกมาได้มากขึ้น

ตารางที่ 1 ผลได้ร้อยละและผลการวิเคราะห์ทางพิษเคมีของสารสกัดจากใบกระท่อมก้านแดงสดโดยใช้ไมโครเวฟในสภาวะต่างๆ

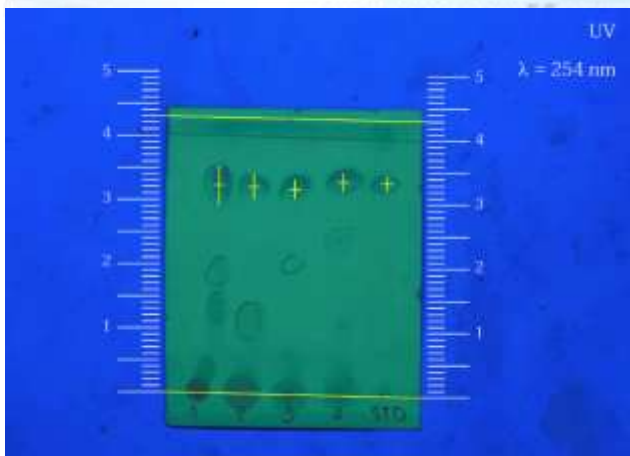
สภาวะที่สกัด	ผลได้ร้อยละ (%)	ปริมาณสารพิษเคมี	
		TPC ($\text{mg}_{\text{GAE}}/\text{g}_{\text{CE}}$)	TFC ($\text{mg}_{\text{QE}}/\text{g}_{\text{CE}}$)
ไม่ปรับสภาพความเป็นกรด			
H ₂ O	9.267	1.18×10^7	4.54×10^5
H ₂ O:C ₂ H ₅ OH=1:1	9.467	1.70×10^7	5.88×10^5
ปรับสภาพความเป็นกรด			
H ₂ O	22.567	4.30×10^6	n/a
H ₂ O:C ₂ H ₅ OH=1:1	24.967	2.40×10^6	6.10×10^4
สารมาตรฐาน			
Mitragynine standard	n/a	7.36×10^6	1.53×10^5

การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกของสารสกัดจากใบกระท่อมก้านแดง พบว่า สารสกัดหยาบที่สกัดด้วยวิธีการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายผสมในอัตราส่วน 1:1 มีปริมาณฟีนอลิกสูงกว่าสารสกัดหยาบที่สกัดด้วยวิธีการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายที่เป็นน้ำเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อมีการปรับสภาพความเป็นกรด สารสกัดหยาบที่สกัดด้วยวิธีการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายที่เป็นน้ำเพียงอย่างเดียวมีปริมาณฟีนอลิกสูงกว่าสารสกัดหยาบที่สกัดด้วยวิธีการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายผสมในอัตราส่วน 1:1 ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์ของสารสกัดจากใบกระท่อมก้านแดง พบว่า สารสกัดหยาบที่สกัดด้วยวิธีการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายผสมในอัตราส่วน 1:1 มีปริมาณฟลาโวนอยด์สูงกว่าสารสกัดหยาบที่สกัดด้วยวิธีการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายที่เป็นน้ำเพียงอย่างเดียว และเมื่อมีการปรับสภาพความเป็นกรด สารสกัดหยาบที่สกัดด้วยวิธีการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายผสมในอัตราส่วน 1:1 มีปริมาณฟลาโวนอยด์สูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Azwanida (2015) รายงานว่าการเลือกใช้ตัวทำละลายผสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารสำคัญกลุ่มฟลาโวนอยด์และฟีนอลิกได้ดีกว่าการใช้ตัวทำละลายเพียงชนิดเดียว เนื่องจากความสามารถในการละลายในสารที่มีสภาพขั้วแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Dai & Mumper, (2010) ที่อธิบายว่าความเป็นกรด – เบสของสารละลายมีผลต่อความเสถียรของกรรมวิธีการสกัดสารพฤกษเคมีจากพืช เช่น สารในกลุ่มฟีนอลิก โดยการปรับสภาพความเป็นกรดสามารถทำให้ปริมาณฟีนอลิกลดลงหรือเปลี่ยนแปลงเป็นสารพฤกษเคมีชนิดอื่นได้

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพของสารสกัดจากใบกระท่อมก้านแดง โดยนำสารสกัดหยาบจากใบกระท่อมก้านแดงมาหาเอกลักษณ์โดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟีแบบชั้นบาง (Thin Layer Chromatography, TLC) เมื่อนำสารสกัดหยาบไปวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นด้วยเทคนิค TLC ในระบบที่ใช้เฟสเคลื่อนที่ที่เป็น Ethyl acetate : *n*-hexane อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร (ค่า R_f ของสารไมทราไจนีนมาตรฐานเท่ากับ 0.77) โดยสารแต่ละชนิดมีค่า R_f ที่แตกต่างกัน แต่มีจุดที่ตรงหรือใกล้เคียงกับไมทราไจนีนมาตรฐาน (ตารางที่ 2 และรูปที่ 2)

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของสารสกัดหยาบด้วยเทคนิค TLC (เฉพาะค่าที่ตรงหรือใกล้เคียงกับไมทราไจนีนมาตรฐาน)

สภาวะที่สกัด	R_f	การแปรผล
ไม่ปรับสภาพความเป็นกรด		
H ₂ O (1)	0.79	ใกล้เคียง
H ₂ O:C ₂ H ₅ OH=1:1 (2)	0.77	ตรง
ปรับสภาพความเป็นกรด		
H ₂ O (3)	0.77	ตรง
H ₂ O:C ₂ H ₅ OH=1:1 (4)	0.79	ใกล้เคียง



รูปที่ 2 โครมาโทแกรมของตัวอย่างสารสกัดจากใบกระท่อมก้านแดงและไมทราไจนีนมาตรฐาน

จึงสรุปได้ว่า สารสกัดมีไมทราไจนีนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Mustafa et al., (2020) ที่รายงานว่าการวิเคราะห์ไมทราไจนีนด้วยเทคนิค TLC โดยใช้ระบบตัวทำละลาย hexane : ethyl acetate ให้ค่า R_f ประมาณ 0.8 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้ในงานวิจัยนี้ รวมทั้งสอดคล้องกับหลักการของ TLC ในการใช้ค่า R_f เปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเพื่อยืนยันชนิดของสารสำคัญในสารสกัดจากพืช และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ashida et al., (2022) ได้ศึกษาการวิเคราะห์สารไตรเทอร์พีนจาก *Simarouba glauca* ด้วยเทคนิค TLC โดยใช้ระบบตัวทำละลาย hexane:ethyl acetate (1:1) เช่นเดียวกัน และพบว่าสารแต่ละชนิดให้ค่า R_f เฉพาะตัว (ประมาณ 0.66) แสดงให้เห็นว่าระบบตัวทำละลายดังกล่าวมีความเหมาะสมในการแยกสารธรรมชาติ และสามารถให้ค่า R_f เป็นเกณฑ์ในการจำแนกชนิดของสารได้

สรุป

กรรมวิธีการสกัดใบกระท่อมก้านแดงสด (*Mitragyna speciosa* (Korth.) Havil.) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave - Assisted Extraction) และการปรับสภาพความเป็นกรดในการสกัดเป็นอีกวิธีการสกัดที่เพิ่มผลได้ร้อยละของการสกัด (9.267, 9.467, 22.567, 24.967 ตามลำดับ) และสกัดสารพฤษเคมีจากพืชดังกล่าวได้ดีขึ้น (TPC: 1.18×10^7 , 1.70×10^7 , 4.30×10^6 , 2.40×10^6 mg_{GAE}/g_{CE} และ TFC: 4.54×10^5 , 5.88×10^5 , n/a, 6.10×10^4 mg_{QE}/g_{CE} ตามลำดับ) จากการวิจัยนี้ผู้วิจัยจะนำองค์ความรู้จากการวิจัย อาทิ องค์ประกอบและปริมาณสารพฤษเคมีมาต่อยอดและปรับปรุงการวิจัยให้มีความรัดกุมมากขึ้น และจัดทำผลิตภัณฑ์จากใบกระท่อมก้านแดงเพื่อนำมาใช้ในทางการแพทย์และผลิตภัณฑ์สุขภาพต่อไป

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากรและเกษตรกรผู้ปลูกกระท่อมก้านแดงจากอำเภอสวนผึ้ง จังหวัดราชบุรี



เอกสารอ้างอิง

กรมการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก. (2565). แนวทางการใช้ประโยชน์จากพืชกระท่อม. บริษัท ปิยอนด์ ฟับลิสซิ่งจำกัด

<https://ockt.dtam.moph.go.th/images/Kratom/%E0%B9%81%E0%B8%99%E0%B8%A7%E0%B8%97%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%83%E0%B8%8A%E0%B9%89%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B9%82%E0%B8%A2%E0%B8%8A%E0%B8%99%E0%B9%8C%E0%B8%88%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%9E%E0%B8%B7%E0%B8%8A%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%97%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%A1.pdf>

ปรุพพ์ รุจนำรงค์. (2565). สารสำคัญของพระราชบัญญัติพืชกระท่อม พ.ศ. 2565. ศูนย์การศึกษาต่อเนื่องทางเภสัชศาสตร์ สภาเภสัชกรรม.

https://ccpe.pharmacycouncil.org/index.php?option=article_detail&subpage=article_detail&id=1249

พระราชบัญญัติพืชกระท่อม พ.ศ. 2565. (2565). ราชกิจจานุเบกษา, เล่ม 139 ตอนที่ 52 ก, หน้า 1-15.

สวาทิตรี อัมณางค์กรชัย, อาภา ศิริวงศ์ ณ อยุธยา, ไพศาล ลิ้มสถิตย์, นิวัติ แก้วประดับ, สมสมร ชิตตระการ, จุไรทิพย์ หวังสินทวีกุล, เอกสิทธิ์ กุมารสิทธิ์, สมชาย ศรีวิริยะจันทร์, ดาร์เนย์ เจ๊ะหะ, วัชรพงศ์ พุ่มชื่น, & ดาวิกา ไสงาม. (2563). บทสรุปของพืชกระท่อม. ศูนย์ศึกษาปัญหาการเสพติด หน่วยระบาดวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

<https://kratom.sci.psu.ac.th/knowledge/interdisciplinary/3181/>

อรุณรัตน์ สันติจิตกวินสกุล. (2557). เคมีพืชสมุนไพรท้องถิ่น (พิมพ์ครั้งที่ 1). มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.

Ashida, S., Beevi, N., Sushama Raj, R. V., & Prabhakumari, C. (2022). Qualitative Detection of Triterpenes and Quantification of Betulinic Acid from Hexane Extract of Simarouba glauca Leaves by Gas Chromatography-Mass Spectrometry and High-Performance Thin Layer Chromatography. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 84(6).

<https://doi.org/10.36468/pharmaceutical-sciences.1036>

Azwanida, N. (2015). A Review on the Extraction Methods Use in Medicinal Plants, Principle, Strength and Limitation. *Medicinal & Aromatic Plants*, 04(03). <https://doi.org/10.4172/2167-0412.1000196>

Basilieri, S., & Kerrigan, S. (2020). Temperature and pH-Dependent Stability of Mitragyna Alkaloids. *Journal of Analytical Toxicology*, 44(4), 314–324. <https://doi.org/10.1093/jat/bkz103>

Dai, J., & Mumper, R. J. (2010). Plant Phenolics: Extraction, Analysis and Their Antioxidant and Anticancer Properties. *Molecules*, 15(10), 7313–7352.

<https://doi.org/10.3390/molecules15107313>



- Hassan, Z., Muzaimi, M., Navaratnam, V., Yusoff, N. H. M., Suhaimi, F. W., Vadivelu, R., Vicknasingam, B. K., Amato, D., Von Hörsten, S., Ismail, N. I. W., Jayabalan, N., Hazim, A. I., Mansor, S. M., & Müller, C. P. (2013). From Kratom to mitragynine and its derivatives: Physiological and behavioural effects related to use, abuse, and addiction. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(2), 138–151. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.11.012>
- López-Salazar, H., Camacho-Díaz, B. H., Ocampo, M. L. A., & Jiménez-Aparicio, A. R. (2023). Microwave-assisted extraction of functional compounds from plants: A Review. *BioResources*, 18(3). <https://doi.org/10.15376/biores.18.3.Lopez-Salazar>
- Md Yusoff, M. H., & Shafie, M. H. (2024). Microwave-assisted extraction of polysaccharides from *Micromelum minutum* leaves using citric acid monohydrate-glycerol based deep eutectic solvents and evaluation of biological activities. *Analytica Chimica Acta*, 1331, 343351. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.343351>
- Mustafa, R., Sukor, R., Mariam, S., Mohd Nor, S. M., Saari, N., & Azri, F. (2020). Enhancing extraction yield and purity of mitragynine from *mitragyna speciosa* through sequential solvent extraction and characterisation using nmr technique. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 9, 3846–3854.
- Phupaboon, S., Matra, M., Prommachart, R., Totakul, P., Supamong, C., & Wanapat, M. (2022). Extraction, Characterization, and Chitosan Microencapsulation of Bioactive Compounds from *Cannabis sativa* L., *Cannabis indica* L., and *Mitragyna speiosa* K. *Antioxidants*, 11(11), 2103. <https://doi.org/10.3390/antiox11112103>
- Sari, K. R. P., Ikawati, Z., Danarti, R., & Hertiani, T. (2023). Micro-titer plate assay for measurement of total phenolic and total flavonoid contents in medicinal plant extracts. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(9), 105003. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105003>
- Thailand's New Legal Framework for Kratom. (n.d.). *Tilleke & Gibbins*. Retrieved November 5, 2025, from <https://www.tilleke.com/insights/thailands-new-legal-framework-for-kratom/>
- THE 17 GOALS | Sustainable Development. (n.d.). Retrieved <https://sdgs.un.org/goals>
- Zhang, Q.-W., Lin, L.-G., & Ye, W.-C. (2018). Techniques for extraction and isolation of natural products: A comprehensive review. *Chinese Medicine*, 13(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s13020-018-0177-x>

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี (UAV) เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพพื้นที่ก่อสร้างโครงการงานป้องกันน้ำท่วมกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย

Application of UAV Technology for Analyzing Site Condition Changes in Flood Prevention Construction Projects: A Case Study of the Department of Public Works and Town & Country Planning

อลิศรา เยื่องเสื่อ¹ และ สุรติ เส็มหมัด¹

Alitsara Yeangsea¹ and Surat Semmad¹

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในการวิเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นที่ในโครงการก่อสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่ง โดยมุ่งเน้นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างข้อมูลสำรวจเพื่อการออกแบบกับสภาพพื้นที่จริงก่อนดำเนินงาน ซึ่งมักประสบปัญหาความไม่สอดคล้องของข้อมูล อันเนื่องมาจากช่องว่างด้านเวลา (Time Lag) ที่ส่งผลให้ข้อมูลเดิมล้าสมัยและไม่สะท้อนสภาพพื้นที่ปัจจุบัน งานวิจัยครั้งนี้ได้นำ การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) สามารถให้ข้อมูลเชิงพื้นที่ที่มีความละเอียดสูงในระดับเซนติเมตร และมีความเป็นปัจจุบัน โดยกรณีศึกษาพบว่าพื้นที่จากการสำรวจโครงการก่อสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งทั้ง 3 โครงการมีค่ารวม 13,604.83 ตารางเมตร ต่ำกว่าข้อมูลแสดงปริมาณงาน (BOQ) ซึ่งระบุไว้ 15,360.00 ตารางเมตร คิดเป็นส่วนต่างที่ลดลงร้อยละ 11.43 หรือมีอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย 0.80 ตารางเมตรต่อเมตร ทั้งนี้ โครงการที่มีระยะเวลาห่างจากการสำรวจเดิมมากที่สุดมีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดถึงร้อยละ 18.92 ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของระยะเวลาที่มีต่อความคลาดเคลื่อนของข้อมูล นอกจากนี้ เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ยังสามารถตรวจจับ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของพื้นที่ เช่น การกัดเซาะ การทับถมของตะกอน และการเปลี่ยนแปลงแนวลำน้ำ ได้อย่างแม่นยำกว่าวิธีการสำรวจแบบดั้งเดิม ส่งผลให้การประมาณปริมาณงานและการปรับแบบก่อสร้างมีความถูกต้อง มากยิ่งขึ้น ดังนั้น การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) จึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพ ความถูกต้อง และความโปร่งใสในการบริหารจัดการโครงการก่อสร้างภาครัฐ อีกทั้งยังช่วยลดความเสี่ยงต่อความล่าช้าและข้อพิพาทในโครงการโครงสร้างพื้นฐานในระยะยาว

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ (UAV), เขื่อนป้องกันตลิ่ง, การบริหารโครงการก่อสร้าง, การเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นที่, กรมโยธาธิการและผังเมือง

¹ ภาควิชาสาขาบริหารงานก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย

Department of Construction Management, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Uthenthawai Campus, Bangkok 10330, Thailand.



Abstract

This academic article aims to apply unmanned aerial vehicle (UAV) technology to analyze land changes in embankment protection projects. The focus is on comparing design survey data with actual site conditions before construction, which often suffers from data inconsistencies due to time lag, resulting in outdated and inaccurate data. This research utilizes UAV surveying, which provides high-resolution, centimeter-level, up-to-date spatial data. Case studies show that the surveyed area of three embankment protection projects totaled 13,604.83 square meters, significantly lower than the Bill of Quantities (BOQ) of 15,360.00 square meters, representing an 11.43% reduction or an average change rate of 0.80 square meters per meter. The project with the longest time gap from the original survey showed the highest change at 18.92%, highlighting the influence of time on data inaccuracies. Furthermore, UAV technology can accurately detect physical changes in the land, such as erosion, sediment deposition, and riverbed changes, more precisely than traditional survey methods. This results in more accurate quantity surveying and construction design adjustments. Therefore, the application of unmanned aerial vehicles (UAVs) is a crucial tool for increasing the efficiency, accuracy, and transparency in managing government construction projects. It also helps reduce the risk of delays and disputes in long-term infrastructure projects.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Riverbank Protection, Construction Project Management, Site Condition Change, Department of Public Works and Town & Country Planning

บทนำ

โครงการก่อสร้างงานป้องกันน้ำท่วมเป็นภารกิจสำคัญของกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย ซึ่งมีบทบาทในการป้องกันและลดผลกระทบจากการกัดเซาะและภัยพิบัติทางน้ำในพื้นที่ต่าง ๆ ทั่วประเทศ โครงการลักษณะนี้มักมีความซับซ้อนทั้งด้านวิศวกรรมและการบริหารจัดการ อีกทั้งต้องผ่านกระบวนการอนุมัติและเตรียมการที่ใช้เวลานานก่อนเริ่มก่อสร้างจริง ส่งผลให้สภาพพื้นที่อาจเปลี่ยนแปลงไปจากข้อมูลที่ใช้ในการสำรวจและออกแบบระยะแรก การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ เช่น การทรุดตัวของตลิ่ง การเปลี่ยนแปลงทางน้ำ การเกิดดินงอก การกัดเซาะ หรือการถมดินบริเวณใกล้เคียง ล้วนส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบและประมาณราคากลาง ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างแผนงานกับสภาพพื้นที่จริง และนำไปสู่ความจำเป็นในการปรับแก้แบบก่อสร้าง การเพิ่มหรือลดปริมาณงาน รวมถึงการแก้ไขสัญญาจ้าง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดความล่าช้าและค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นของโครงการ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นของผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง โดยเฉพาะคณะกรรมการตรวจรับงานและหน่วยงานกำกับดูแล

ด้วยเหตุนี้ การวิเคราะห์และติดตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพพื้นที่ก่อสร้างจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำที่มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ ปัจจุบัน เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) หรือโดรน ได้เข้ามามี

บทบาทสำคัญในการเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงพื้นที่ ด้วยความสามารถในการบันทึกภาพถ่ายทางอากาศที่มีความละเอียดสูง รวดเร็ว และครอบคลุมพื้นที่กว้าง ทำให้สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบ และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีหลักฐานเชิงประจักษ์รองรับ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบสภาพพื้นที่ก่อสร้าง โดยใช้ข้อมูลการสำรวจภาคพื้นดินแบบดั้งเดิม ก่อนการออกแบบกับข้อมูลก่อนดำเนินการก่อสร้างจากเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในโครงการเชื่อมป้องกันน้ำท่วมของกรมโยธาธิการและผังเมือง และนำไปประเมินประสิทธิภาพและความเหมาะสมของการใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในงานสำรวจพื้นที่ก่อสร้าง
2. เพื่อการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในการสนับสนุนการออกแบบประมาณราคา และส่งเสริมการบริหารงานก่อสร้าง

ระเบียบวิธีวิจัย

1. พื้นที่ศึกษาวิจัยครั้งนี้ครอบคลุมโครงการก่อสร้างงานป้องกันน้ำท่วมของกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย จำนวน 3 โครงการ ในพื้นที่ลุ่มน้ำมูล จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งตั้งอยู่ในบริบทพื้นที่ที่แตกต่างกัน ทั้งเขตเมือง อำเภอรอบนอก และศูนย์กลางอำเภอขนาดกลาง โดยมีลักษณะภูมิประเทศหลากหลาย ได้แก่ พื้นที่ชุ่มน้ำในเมือง (ห้วยวังนอง) พื้นที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึงริมแม่น้ำมูล (หนองกินเพล) และพื้นที่ตลิ่งลำน้ำสาขาที่เสี่ยงต่อการกัดเซาะ (ดอนปู่ตา) ประชาชนในแต่ละพื้นที่มีวิถีชีวิตแตกต่างกันตามบริบทชุมชน ตั้งแต่สังคมเมืองที่เน้นพาณิชยกรรมและบริการ ไปจนถึงชุมชนเกษตรกรรมและประมงพื้นบ้าน อย่างไรก็ตามทุกพื้นที่ล้วนมีความผูกพันกับแหล่งน้ำ ทั้งในด้านการดำรงชีพ การใช้ประโยชน์พื้นที่ และวัฒนธรรมชุมชน ปัจจุบันทั้งสามพื้นที่กำลังเผชิญความท้าทายด้านการบริหารจัดการน้ำ การเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศ และการรักษาความยั่งยืนของวิถีชีวิตในอนาคต



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 1 โครงการก่อสร้างงานป้องกันน้ำท่วม ความยาวรวม 2,192 เมตร

ก) โครงการเชื่อมป้องกันตลิ่งริมห้วยวังนองพร้อมปรับปรุงภูมิทัศน์ เทศบาลนครอุบลราชธานี อำเภอเมืองอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี มีความยาว 761 เมตร



ข) โครงการพัฒนาเมืองพื้นที่ชุมชนหนองกิงเพล ระยะ 2 บ้านคูสว่าง อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี มีความยาว 770 เมตร

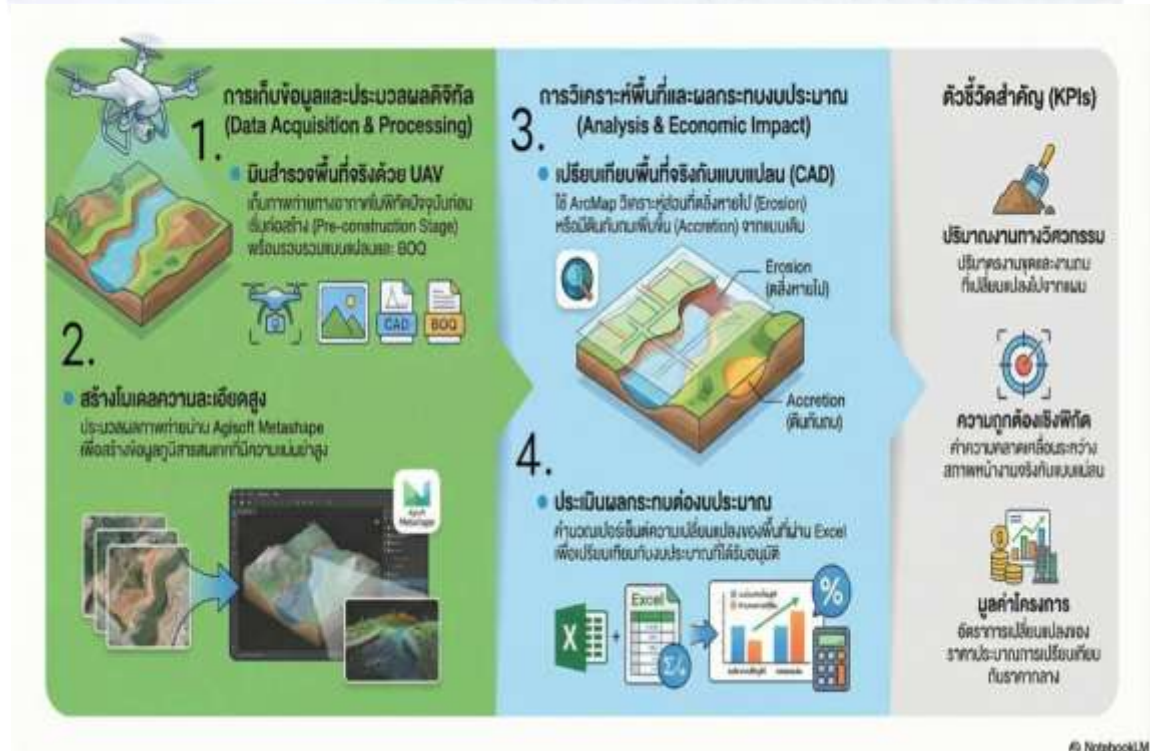
ค) โครงการปรับปรุงภูมิทัศน์สวนสาธารณะ เชื้อนป้องกันตลิ่ง ช่วงที่ 2 เจ้าพ่อ (ดอนปู่ตา) ชุมชนหนองแสงใต้ ตำบลเมืองเดช อำเภอเดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี มีความยาว 661 เมตร

2. เครื่องมือสำรวจและซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิจัย (Materials and Equipment)

เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความละเอียดสูงและมีความถูกต้องเชิงตำแหน่ง (Spatial Accuracy) งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องมือและซอฟต์แวร์สำหรับการสำรวจและวิเคราะห์พื้นที่โครงการก่อสร้าง ดังนี้

- อากาศยานไร้คนขับ (UAV) รุ่น DJI Matrice 4E Pro พร้อมระบบระบุตำแหน่งความแม่นยำสูง สำหรับสำรวจข้อมูลทางอากาศ
- ซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพถ่าย Agisoft Metashape สำหรับสร้างแบบจำลองพื้นผิวภาคพื้นดินดิจิทัล (Digital Surface Model: DSM) และภาพถ่ายออร์โธรี (Orthophoto)
- ซอฟต์แวร์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ArcMap (ArcGIS) สำหรับการซ้อนทับข้อมูล (Overlay Analysis) ระหว่างแบบแปลนก่อสร้าง (CAD) กับข้อมูลสภาพพื้นที่ปัจจุบัน
- ซอฟต์แวร์ประมวลผลทางสถิติ Microsoft Excel สำหรับคำนวณค่าเฉลี่ย วิเคราะห์ปริมาณงานเพิ่ม-ลด และประเมินมูลค่าทางงบประมาณ

3. การสำรวจพื้นที่ภาคสนามและการวิเคราะห์ (Field survey and analysis) เพื่อให้สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและประเมินผลกระทบต่อโครงการได้อย่างชัดเจน งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ร่วมกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) เพื่อตรวจสอบและเปรียบเทียบข้อมูลภาคสนามกับแบบแปลนที่ได้รับอนุมัติ โดยกำหนดขั้นตอนการดำเนินงานสำคัญไว้ 4 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 2 Infographic แสดงลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. การรวบรวมข้อมูล (Data Acquisition) ดำเนินการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ แบบแปลนก่อสร้าง (CAD Design) บัญชีแสดงรายการปริมาณงานและราคา (BOQ) และเอกสารโครงการที่ได้รับอนุมัติ ควบคู่กับการเก็บข้อมูลภาคสนาม โดยใช้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) สำรวจพื้นที่ก่อสร้างจริง เพื่อจัดเก็บภาพถ่ายทางอากาศและข้อมูลพิกัดสภาพพื้นที่ปัจจุบัน ก่อนเริ่มดำเนินการก่อสร้าง (Pre-construction Stage)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3 กระบวนการเก็บข้อมูลภาคสนามโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ (UAV)

(ก) การเตรียมอุปกรณ์ (ข) การวางแผนเส้นทางบิน (ค) การปฏิบัติงานสำรวจในพื้นที่จริง

2. การประมวลผลข้อมูล (Data Processing) นำข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศมาประมวลผลด้วยโปรแกรม Agisoft Metashape เพื่อสร้างแบบจำลองความสูงเชิงดิจิทัล (DEM) และภาพถ่ายเชิงพิกัด (Orthophoto) ความละเอียดสูง สำหรับใช้ในการวิเคราะห์เชิงพื้นที่อย่างถูกต้องและแม่นยำ



รูปที่ 4 ภาพถ่ายทางอากาศที่ได้มาประมวลผลด้วยโปรแกรม Agisoft Metashape

3. การวิเคราะห์พื้นที่จากภาพถ่ายทางอากาศ ข้อมูลจากการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ถูกนำมาซ้อนทับกับแบบแปลนก่อสร้างที่ได้รับอนุมัติในโปรแกรม ArcMap เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของพื้นที่ โดยใช้ข้อมูลจากโครงการห้วยวังนอง (สำรวจปี พ.ศ.2561 ประมาณ 5-7 ปี) โครงการหนองกินเพล (พ.ศ. 2564 ประมาณ 2-3 ปี) และโครงการดอนปู่ตา (พ.ศ.2565 ประมาณ 1-2 ปี) ทั้งนี้ การวิเคราะห์มุ่งพิจารณาองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่

- พื้นที่กัดเซาะ (Erosion Area): บริเวณตลิ่งที่ลดลงจากแบบเดิม
- พื้นที่ดินงอก (Accretion Area): บริเวณที่มีการทับถมของดินเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 การวิเคราะห์เชิงพื้นที่และเปรียบเทียบหาปริมาณพื้นที่งอก-กัดเซาะ โดยโปรแกรม ArcMap

4.การวิเคราะห์ผลกระทบทางงบประมาณ (Economic Impact Analysis) นำผลการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ที่มาคำนวณเป็นร้อยละและค่าเฉลี่ยด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูล BOQ และงบประมาณที่ได้รับอนุมัติเบื้องต้น สำหรับประเมินผลกระทบจากการแก้ไขสัญญา รวมถึงสนับสนุนงานออกแบบการประมาณราคา และการบริหารงานก่อสร้าง



ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลพื้นที่จากการสำรวจด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) กับข้อมูลแสดงปริมาณงาน (BOQ) 3 โครงการ ระยะทางรวม 2,192 เมตร

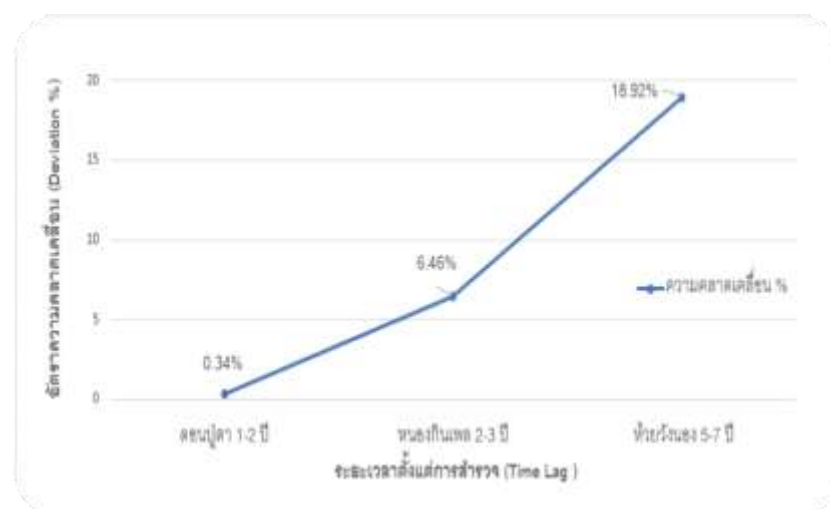
โครงการ	ระยะทาง (เมตร)	พื้นที่ดินนอก (ตร.ม.)	พื้นที่กีดขวาง (ตร.ม.)	คิดเป็น(%) ของพื้นที่	บินโดรน (UAV)	ประมาณ ราคา (BOQ)	Change (%)	หมายเหตุ เริ่มต้นสำรวจ ออกแบบ ประมาณราคา BOQ
ห้วยวังนอง	761	3181.50	3224.11	70.97	6405.61	7900.00	18.92	พ.ศ. 2561
หนองกินเพล	770	3142.95	458.42	10.09	3601.37	3850.00	6.46	พ.ศ. 2564
ดอนปู่ตา	661	2737.35	860.50	18.94	3597.85	3610.00	0.34	พ.ศ. 2565
รวม	2192	9061.80	4543.03					

ผลการวิเคราะห์พบว่า โครงการห้วยวังนองมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่มากที่สุด โดยพื้นที่จากการสำรวจด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) เท่ากับ 6,405.61 ตารางเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลปริมาณงาน (BOQ) ที่ 7,900.00 ตารางเมตร พบว่าพื้นที่ลดลง 1,494.39 ตารางเมตร หรือร้อยละ 18.92

รองลงมาคือโครงการหนองกินเพล ซึ่งมีพื้นที่จากการสำรวจเท่ากับ 3,601.37 ตารางเมตร เมื่อเทียบกับข้อมูล BOQ ที่ 3,850.00 ตารางเมตร พบว่าพื้นที่ลดลง 248.63 ตารางเมตร หรือร้อยละ 6.46

ส่วนโครงการดอนปู่ตามีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด โดยพื้นที่จากการสำรวจด้วย UAV เท่ากับ 3,597.85 ตารางเมตร ลดลง 12.10 ตารางเมตร หรือร้อยละ 0.34

ผลการวิจัย



รูปที่ 7 กราฟแสดงอัตราความคลาดเคลื่อนกับระยะเวลาตั้งแต่การเริ่มสำรวจ

เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลแสดงปริมาณงาน (BOQ) ที่ 3,610.00 ตารางเมตร พบว่าพื้นที่จากการสำรวจลดลง 12.15 ตารางเมตร หรือร้อยละ 0.34 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ต่อระยะทาง พบว่าโครงการห้วยวังนอง มีค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่ 1.96 ตารางเมตรต่อเมตร

(ความต่าง 1,494.39 ตารางเมตร ตลอดระยะทาง 761 เมตร) รองลงมาคือ โครงการหนองกินเพลที่ 0.32 ตารางเมตรต่อเมตร (ความต่าง 248.63 ตารางเมตร ตลอดระยะทาง 770 เมตร) และโครงการดอนปู่ตาที่ 0.02 ตารางเมตรต่อเมตร (ความต่าง 12.15 ตารางเมตร ตลอดระยะทาง 661 เมตร) โดยมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 0.80 ตารางเมตรต่อเมตร เมื่อพิจารณาตามช่วงเวลา พบว่าโครงการห้วยวังนอง (พ.ศ. 2561 ประมาณ 5-7 ปี) มีความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดที่ร้อยละ 18.92 และ 1.96 ตารางเมตรต่อเมตร ขณะที่โครงการหนองกินเพล (พ.ศ. 2564; ประมาณ 2-3 ปี) อยู่ในระดับปานกลางที่ร้อยละ 6.46 และ 0.32 ตารางเมตรต่อเมตร ส่วนโครงการดอนปู่ตา (พ.ศ. 2565; ประมาณ 1-2 ปี) มีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดที่ร้อยละ 0.34 และ 0.02 ตารางเมตรต่อเมตร ผลดังกล่าวสะท้อนแนวโน้มชัดเจนว่า ระยะเวลาที่ห่างจากการสำรวจ (Time Lag) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับความคลาดเคลื่อนของข้อมูลพื้นที่ โดยข้อมูล BOQ ที่จัดทำในอดีตมีแนวโน้มสูงกว่าพื้นที่จริงเฉลี่ยร้อยละ 11.43 และยิ่งระยะเวลายาวนาน ความคลาดเคลื่อนยิ่งเพิ่มขึ้น

ผลการศึกษาพบว่า ระยะเวลาที่ห่างกันระหว่างการสำรวจเพื่อออกแบบและการก่อสร้างจริง (Time Lag) เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้อมูลเชิงพื้นที่คลาดเคลื่อน โดยพบว่าพื้นที่จากการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) มีค่ารวม 13,604.83 ตารางเมตร ต่ำกว่าข้อมูล BOQ ที่ 15,360.00 ตารางเมตร คิดเป็นความแตกต่าง 1,755.17 ตารางเมตร หรือร้อยละ 11.43 เมื่อพิจารณารายโครงการ พบว่าโครงการที่มี Time Lag มากที่สุด (พ.ศ. 2561) มีความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดถึงร้อยละ 18.92 และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย 1.96 ตารางเมตรต่อเมตรของระยะทางสำรวจ ทั้งนี้ การใช้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) ช่วยให้ได้ข้อมูลเชิงพื้นที่ที่มีความละเอียดสูงระดับเซนติเมตร และเป็นข้อมูลสภาพปัจจุบัน (Near real-time) ทำให้สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ได้แม่นยำ โดยเฉพาะในโครงการป้องกันน้ำท่วมที่มีการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่อง เช่น การกัดเซาะ การทับถมของตะกอน และการเปลี่ยนแปลงแนวลำน้ำ

ผลศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ศิริพร ตรีธาร (2558) และ Raczynski (2017) ที่ระบุว่า ปัจจัย ด้านความสูงในการบินและความละเอียดของภาพถ่ายทางอากาศมีอิทธิพลโดยตรงต่อความถูกต้องของข้อมูลเชิงพื้นที่และการวิเคราะห์ปริมาณงาน ดังนั้น การนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) มาใช้ จึงไม่เพียงช่วยลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลแสดงปริมาณงาน (BOQ) เดิม แต่ยังเป็นเครื่องมือสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการวางแผน ออกแบบ และบริหารจัดการโครงการก่อสร้างให้สอดคล้องกับสภาพพื้นที่จริงในปัจจุบัน

สรุป

1. การวิเคราะห์และเปรียบเทียบสภาพพื้นที่ก่อสร้าง ผลการศึกษาพบว่า ข้อมูลพื้นที่จากการสำรวจด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ต่ำกว่าข้อมูล BOQ ในทุกโครงการ รวมความแตกต่าง 1,755.17 ตารางเมตร หรือร้อยละ 11.43 สะท้อนว่า BOQ ที่จัดทำในอดีตมีแนวโน้มสูงกว่าพื้นที่จริง และความคลาดเคลื่อนมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาระหว่างการออกแบบและการก่อสร้าง (Time Lag) โดยโครงการที่มีช่วงเวลายาวนานจะมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบเชิงคุณภาพ พบว่า เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) มีข้อได้เปรียบเหนือวิธีสำรวจแบบดั้งเดิมในด้านความรวดเร็ว ความครอบคลุมพื้นที่ และการเก็บข้อมูลภาพความละเอียดสูง สามารถนำไปสร้างแบบจำลอง 3 มิติและวิเคราะห์เชิงพื้นที่ได้อย่างมี



ประสิทธิภาพ ขณะที่วิธีดั้งเดิม เช่น การรังวัดภาคพื้น (Total Station) แม้มีความแม่นยำเชิงจุดสูง แต่ใช้เวลามาก ใช้แรงงานมาก และเข้าถึงพื้นที่ยากได้จำกัดอย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ยังมีข้อจำกัด เช่น ความไวต่อสภาพอากาศ ข้อจำกัดด้านสัญญาณ GPS ในพื้นที่ทึบ และความจำเป็นในการใช้ซอฟต์แวร์และผู้เชี่ยวชาญในการประมวลผลข้อมูล ดังนั้น เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นทั้งเครื่องมือหลักและเครื่องมือเสริมในการสำรวจพื้นที่โครงการ โดยเฉพาะงานที่มีพื้นที่กว้างและมีการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่อง เนื่องจากช่วยเพิ่มความแม่นยำ ลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล BOQ และสนับสนุนการตัดสินใจด้านวิศวกรรมได้มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีดั้งเดิม

2.แนวทางการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) สามารถใช้ในงานก่อสร้างได้ 3 ด้านหลัก คือ การสำรวจพื้นที่ก่อนเริ่มโครงการ เพื่อเพิ่มความแม่นยำของแบบ การใช้ประกอบการประมาณราคาเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของ BOQ และการติดตามความเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ระหว่างก่อสร้าง โดยเฉพาะงานป้องกันตลิ่งและน้ำท่วม ทั้งนี้ ควรใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ร่วมกับการสำรวจภาคพื้น (Integrated Survey) เพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูล และกำหนดมาตรฐานการเก็บและประมวลผลข้อมูลให้ชัดเจน เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและนำผลไปใช้ต่อยอดงานออกแบบและบริหารโครงการได้อย่างมีประสิทธิภาพ



เอกสารอ้างอิง

กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2566). คู่มือการควบคุมงานก่อสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งและโครงสร้างป้องกันน้ำท่วม.

กรุงเทพฯ: กระทรวงมหาดไทย.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2567). มาตรฐานงานสำรวจและออกแบบเพื่อป้องกันกัดเซาะตลิ่งริมแม่น้ำ.

กรุงเทพฯ: กระทรวงมหาดไทย. สืบค้นจาก <https://dsdw.go.th/>.

ศิริพร ตีรธาร, และ ชัยพน พงษ์เกษวัฒนา. (2558). การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับการสำรวจเส้นทาง.

วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 28(93), 103-114.

ดนัย เรืองสอน, วิชัย วงศ์วิศิษฐ์, สุชาภัสร์ โชติรักษา, ณัฐวุฒิ หัสดีวิจิตร, ศุภกร สุทธิพันธ์, ภาณุพงศ์ มะโนเย็น, และ

มีชัย บุญเลิศ. (2565). การใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับบริหารโครงการก่อสร้างทางหลวง. ใน เอกสารรวมบทความ

วิจัยการประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27 (น. STR29-1 ถึง STR29-10). เชียงราย:

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.

ณัฐวัฒน์ พัฒนจันทร์, และคณะ. (2568). การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ร่วมกับภาพถ่ายทาง

อากาศจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อติดตามความก้าวหน้าโครงการก่อสร้าง. วารสารวิชาการ

เทคโนโลยีอุตสาหกรรม: มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, 9(1), 45-58.

เนติ ศรีหาญ, และ ศิवा แก้วปลั่ง. (2560). การประเมินความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศด้วย

ยานไร้คนขับบินต้นทุ่นต่ำ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 10(2), 146-157.

Vega Aguilar, A., et al. (2025). Application of UAV-mounted LiDAR technology for flood risk assessment

and vegetation loss estimation in dam construction projects in Mexico.

Raczynski, R. (2017). Analysis of factors influencing the accuracy of UAV photogrammetric products.

Barry, P., & Coakley, R. (2013). Field accuracy of total station, GPS and unmanned aerial vehicle optical

imagery. Survey Review, 45(331), 163–173.

Gerke, M., & Przybilla, H.-J. (2016). Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks:

Influence of onboard RTK-GNSS and flight patterns. Photogrammetrie, Fernerkundung,

Geoinformation, 2016(1), 17–30.



ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ของการแจกแจงปัวซอง-ฮัคและการประยุกต์

Confidence Intervals for the parameter of the Poisson-Haq distribution and Applications

ปฏิพร สมบูรณ์เรศ¹ และ วราฤทธิ์ พานิชกิจโกศลกุล¹

Patiporn Somboonret¹ and Wararit Panichkitkosolkul¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการประมาณช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ภายใต้การแจกแจงปัวซอง-ฮัค (Poisson-Haq Distribution) ซึ่งเป็นการแจกแจงสำหรับข้อมูลนับที่สามารถรองรับภาวะการกระจายเกินเกณฑ์ (overdispersion) ได้ การศึกษาดำเนินการโดยใช้การจำลองข้อมูลแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) เพื่อเปรียบเทียบวิธีการประมาณช่วงความเชื่อมั่นจำนวน 5 วิธี ได้แก่ วิธีอัตราส่วนน่าจะเป็น (likelihood ratio), วิธีวัลด์ (Wald), วิธีบูตสแตรป์เปอร์เซ็นต์ไทล์ (percentile bootstrap), วิธีบูตสแตรป์พื้นฐาน (basic bootstrap) และ วิธีบูตสแตรป์ปรับค่าเอนเอียงและค่าเร่ง (bias-corrected and accelerated (BCa) bootstrap) โดยประเมินประสิทธิภาพของแต่ละวิธีจากค่าความน่าจะเป็นคัมรวม (Coverage Probability) และความกว้างคาดหวัง (Expected Length) ภายใต้เงื่อนไขของขนาดตัวอย่างและค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าวิธีวัลด์ แสดงความเสถียรของค่าความน่าจะเป็นคัมรวมได้ดีที่สุดในหลายสถานการณ์ และให้ความกว้างคาดหวังอยู่ในระดับเหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น โดยมีการประยุกต์ใช้กับข้อมูลจำนวนอุบัติเหตุบนท้องถนนของประเทศไทยในช่วงวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2564 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2565

คำสำคัญ : การแจกแจงปัวซอง-ฮัค; ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์; ข้อมูลนับ; ภาวะการกระจายเกินเกณฑ์

Abstract

This study aims to investigate the performance of confidence interval estimation methods for the parameter under the Poisson-Haq distribution, which is a discrete probability distribution for count data that can accommodate overdispersion. The study was conducted using Monte Carlo simulation to compare five confidence interval estimation methods: likelihood ratio, Wald, percentile bootstrap, basic bootstrap, and bias-corrected and accelerated (BCa) bootstrap. The performance of each method was evaluated based on the coverage probability and the expected length under different conditions of sample size and parameter values. The results showed that the Wald method performed best in terms of coverage probability in many situations and provided an expected length at an appropriate level when compared with other methods. The study was applied to the number of traffic accidents in Thailand from January 1, 2021, to December 31, 2021.

¹ สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี, 12120, ประเทศไทย

Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathum Thani, 12120, Thailand



bootstrap, basic bootstrap, และ bias-corrected and accelerated (BCa) bootstrap. The performance of each method was evaluated based on coverage probability and expected length under different sample sizes and parameter values.

The results indicate that the Wald method demonstrates the most stable coverage probability across various scenarios and provides an appropriate expected length of the confidence interval compared with the other methods. The proposed methods are further applied to real data on the number of road traffic accidents in Thailand from January 1, 2021, to December 31, 2022.

Keywords : Poisson-Haq distribution; confidence interval; count data; overdispersion

บทนำ

ในปัจจุบัน การวิเคราะห์ข้อมูลแบบนับ (Count Data Analysis) มีบทบาทสำคัญในหลายสาขาวิชา โดยข้อมูลลักษณะนี้มักอยู่ในรูปของจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นภายในช่วงเวลาหรือพื้นที่ที่กำหนด การทำความเข้าใจรูปแบบการกระจายของข้อมูลมีความสำคัญต่อการพยากรณ์และการวางแผนการแจกแจงที่นิยมใช้จะอยู่บนพื้นฐานของ การแจกแจงปัวซอง (Poisson Distribution) ซึ่งเป็นการแจกแจงที่ค่าเฉลี่ยเท่ากับ ค่าความแปรปรวน อย่างไรก็ตาม ข้อมูลจริงในหลายสาขามักมีค่าความแปรปรวนมากกว่าค่าเฉลี่ย มักมี ภาวะการกระจายเกินเกณฑ์ (overdispersion) ส่งผลให้การแจกแจงปัวซองไม่สามารถอธิบายข้อมูลได้อย่าง เหมาะสม เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว นักสถิติได้มีการพัฒนาการแจกแจงที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้นภายใต้แนวคิด ของการแจกแจงผสม (Mixture Distributions) โดย Haq (2025) ได้เสนอการแจกแจงปัวซอง-ฮัค (Poisson-Haq Distribution) ซึ่งนำการแจกแจงฮัคมาผสมกับการแจกแจงปัวซองเพื่อเพิ่มความแปรปรวนของการ แจกแจง ทำให้สามารถอธิบายข้อมูลแบบนับที่มีปัญหาภาวะการกระจายเกินเกณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การสร้างช่วงความเชื่อมั่นมีบทบาทสำคัญในการอนุมานค่าพารามิเตอร์ เนื่องจากช่วยแสดงระดับ ความไม่แน่นอนของค่าประมาณได้อย่างเหมาะสม แม้ว่าจะมีการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างช่วงความเชื่อมั่น สำหรับการแจกแจงข้อมูลแบบนับหลายประเภทแล้วก็ตาม แต่จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ายังไม่มีงานวิจัย ที่มุ่งเน้นการสร้างช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ภายใต้การแจกแจงปัวซอง-ฮัค (Poisson-Haq Distribution) โดยเฉพาะ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาวิธีอัตราส่วนภาวะน่าจะเป็นและวิธีวัลด์ซึ่งเป็นวิธี มาตรฐานที่นิยมใช้ในการอนุมานเชิงสถิติร่วมกับวิธีบูตสแตรป์เปอร์เซ็นไทล์, วิธีบูตสแตรป์พื้นฐาน และวิธี บูตสแตรป์ปรับค่าเอนเอียงและค่าเร่งซึ่งเหมาะสำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงซับซ้อนหรือไม่เป็นไปตามการแจก แจงปกติ โดยประเมินผลด้วยค่าความน่าจะเป็นคัมรวม (Coverage Probability) และค่าความยาวช่วงเฉลี่ย (Expected Length) รวมทั้งเปรียบเทียบความเหมาะสมของการแจกแจงปัวซอง-ฮัคกับการแจกแจงข้อมูลแบบนับ อื่น ๆ ผ่านข้อมูลอุบัติเหตุทางถนนของประเทศไทย



วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์สำหรับการแจกแจงปัวซอง-ฮัค
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่น และศึกษาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ (θ) และขนาดตัวอย่าง (n) ต่อประสิทธิภาพของแต่ละวิธี

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษานี้ดำเนินการเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ θ ของการแจกแจงปัวซอง-ฮัค ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมลักษณะการกระจายของข้อมูล โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

1. การกำหนดค่าพารามิเตอร์และขนาดตัวอย่าง

การศึกษานี้ใช้การจำลองข้อมูลแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ โดยกำหนดเงื่อนไขดังนี้

- โปรแกรมที่ใช้: ภาษา R รุ่น 4.2.1 และโปรแกรม RStudio
- ขนาดตัวอย่าง (Sample size): $n = 10, 50, 100, 500$ และ $1,000$
- ค่าพารามิเตอร์ (Parameter values): $\theta = 0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1, 1.5$ และ 2
- จำนวนครั้งของการจำลอง: $M = 1,000$
- จำนวนรอบ Bootstrap: $B = 2,000$
- ระดับความเชื่อมั่น (Confidence level): $95\% (1 - \alpha = 0.95)$

ข้อมูลถูกสร้างจากการแจกแจงปัวซอง-ฮัคโดยใช้วิธียอมรับ-ปฏิเสธ (Acceptance-Rejection Method)

2. การประมาณค่าพารามิเตอร์ (Parameter Estimation)

ค่าพารามิเตอร์ θ ของการแจกแจงปัวซอง-ฮัคถูกประมาณด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimator: MLE) โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขในการแก้สมการฟังก์ชันลอการิทึมภาวะน่าจะเป็น (loglikelihood function) เนื่องจากไม่มีรูปคำตอบแบบปิด สำหรับตัวประมาณดังกล่าว

3. วิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Intervals)

การศึกษานี้พิจารณาวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ทั้งหมด 5 วิธี ได้แก่

- วิธีอัตราส่วนภาวะน่าจะเป็น (likelihood ratio) คือวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่นที่อาศัยฟังก์ชันภาวะน่าจะเป็นและสถิติอัตราส่วนภาวะน่าจะเป็น

ให้ $X_1, X_2, \dots, X_n$ เป็นตัวอย่างสุ่มอิสระจากการแจกแจงปัวซอง-ฮัคที่มีพารามิเตอร์ θ โดยมีฟังก์ชันมวลความน่าจะเป็นดังนี้

$$P(X = x; \theta) = \frac{\theta^x}{(1 + \theta)^{x+3}} \frac{2(2 + \theta)(1 + \theta)^2 + \theta(2 + x)(1 + x)}{2(1 + \theta)^2}; x = 0, 1, 2, \dots; \theta > 0$$



โดยลักษณะการกระจายของข้อมูลภายใต้ค่าพารามิเตอร์ θ ที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งพบว่าเมื่อ θ มีค่าน้อย ความน่าจะเป็นจะกระจุกตัวอยู่ที่ค่าตัวเลขต่ำและลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่เมื่อ θ เพิ่มขึ้น การกระจายของข้อมูลจะกว้างขึ้นและส่วนปลายจะยาวขึ้น แสดงถึงความยืดหยุ่นของการแจกแจงในการรองรับข้อมูลแบบนับที่มีความแปรปรวนสูงหรือมีภาวะการกระจายเกินเกณฑ์

ค่าพารามิเตอร์ θ ถูกประมาณด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด โดยในการศึกษานี้ได้ใช้ฟังก์ชัน $\max Lik()$ เพื่อประมาณค่า $\hat{\theta}$ เนื่องจากไม่สามารถหาคำตอบในรูปแบบปิดได้โดยตรง

สถิติอัตราส่วนภาวะน่าจะเป็นสามารถเขียนในรูปฟังก์ชันล็อกภาวะน่าจะเป็น ได้ดังนี้

$$-2\log\Lambda(\theta) = -2[\ell(\theta) - \ell(\hat{\theta})]; \Lambda(\theta) = \frac{L(\theta)}{L(\hat{\theta})}$$

โดยที่ $\Lambda(\theta)$ คือ สถิติอัตราส่วนภาวะน่าจะเป็น (likelihood ratio statistic)

$L(\theta)$ คือ ฟังก์ชันภาวะน่าจะเป็นภายใต้ค่าพารามิเตอร์ θ

$L(\hat{\theta})$ คือ ฟังก์ชันภาวะน่าจะเป็นภายใต้ค่าประมาณภาวะน่าจะเป็นสูงสุด $\hat{\theta}$

$\ell(\theta)$ คือ ฟังก์ชันล็อกภาวะน่าจะเป็นของ $L(\theta)$

$\ell(\hat{\theta})$ คือ ค่าฟังก์ชันล็อกภาวะน่าจะเป็นภายใต้ค่าประมาณภาวะน่าจะเป็นสูงสุด $\hat{\theta}$

ภายใต้เงื่อนไขที่ขนาดตัวอย่างมีค่ามากเพียงพอ สถิตินี้ดังกล่าวมีการแจกแจงไคสแควร์ที่มีองศาอิสระเท่ากับ 1

ดังนั้น ช่วงความเชื่อมั่นแบบวิธีอัตราส่วนภาวะน่าจะเป็น ระดับ $100(1 - \alpha)\%$ คือ

$$-2[\ell(\theta) - \ell(\hat{\theta})] \leq \chi^2_{1, 1-\alpha}$$

ในทางปฏิบัติ ขอบเขตของช่วงความเชื่อมั่นจะถูกคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้ค่า $\hat{\theta}$ เป็นค่าเริ่มต้นในการค้นหาค่าที่ทำให้สมการข้างต้นเป็นจริง

- วิธีวัลด์ (Wald) คือวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่นที่อาศัยสมบัติสภาพปกติเชิงเส้นกำกับ (asymptotic normality) ของค่าประมาณแบบวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด โดยเมื่อขนาดตัวอย่างมีค่ามากเพียงพอ ค่าประมาณ $\hat{\theta}$ จะมีการแจกแจงประมาณเป็นแบบปกติ ดังนี้

$$\hat{\theta} \sim N(\theta, \text{Var}(\hat{\theta}))$$

โดยที่ ความแปรปรวนของตัวประมาณสามารถประมาณได้จากเมทริกซ์สารสนเทศฟิชเชอร์ (Fisher's information) หรือจากส่วนกลับของลบอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันล็อกภาวะน่าจะเป็นดังนี้

$$\widehat{\text{Var}}(\hat{\theta}) = I^{-1}(\hat{\theta}), \quad I(\hat{\theta}) = -\left. \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \log L(\theta|x) \right|_{\theta = \hat{\theta}}$$

$$I(\hat{\theta}) = \frac{2n}{\hat{\theta}^2} - \sum_{i=1}^n \frac{x_i + 5}{(1 + \hat{\theta})^2} - \sum_{i=1}^n \frac{(12\hat{\theta} + 16)g_2(x_i; \hat{\theta}) - g_1(x_i; \hat{\theta})^2}{g_1(x_i; \hat{\theta})^2}$$

$$\text{โดยที่ } g_1(x_i; \hat{\theta}) = 2(3\hat{\theta} + 5)(\hat{\theta} + 1) + (2 + x_i)(1 + x_i) \quad \text{และ} \\ g_2(x_i; \hat{\theta}) = 2(\hat{\theta} + 2)(\hat{\theta} + 1)^2 + \theta(2 + x_i)(1 + x_i)$$

ดังนั้น ช่วงความเชื่อมั่นแบบวิธีไวล์ด์ ระดับ $100(1 - \alpha)\%$ คือ

$$\hat{\theta} \pm z_{1-\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\hat{\theta})}$$

โดยที่ $z_{1-\alpha/2}$ คือค่าควอนไทล์ของการแจกแจงปกติมาตรฐานระดับความเชื่อมั่น 95%

ในการศึกษานี้ ได้ดำเนินการประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{\theta}$ และประมาณค่าความแปรปรวนของตัวประมาณ ด้วยวิธีภาวน่าจะเป็นสูงสุด ผ่านฟังก์ชัน $\max Lik()$

- วิธีบูตสแตรป์เปอร์เซ็นต์ไทล์ (percentile bootstrap) คือวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่นโดยอาศัยการเลือกตัวอย่างซ้ำบูตสแตรป์ (bootstrap resampling) จากข้อมูลตัวอย่างเดิม เพื่อประมาณการแจกแจงของค่าประมาณ $\hat{\theta}$ โดยช่วงความเชื่อมั่นจะถูกสร้างขึ้นจากค่าควอนไทล์ของค่าประมาณบูตสแตรป์โดยตรง

ให้ $x = (x_1, \dots, x_n)$ คือข้อมูลตัวอย่าง และ $\hat{\theta}$ คือค่าประมาณพารามิเตอร์จากข้อมูลจริง จากนั้นทำการสุ่มตัวอย่างซ้ำแบบมีการคืนค่า จำนวน B ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าประมาณ $\hat{\theta}^{*(1)}, \hat{\theta}^{*(2)}, \dots, \hat{\theta}^{*(B)}$

ให้ $\hat{\theta}_{(\alpha/2)}^*$ และ $\hat{\theta}_{(1-\alpha/2)}^*$ คือควอนไทล์ลำดับที่ $\alpha/2$ และ $1 - \alpha/2$ ของค่าประมาณจากบูตสแตรป์

ดังนั้น ช่วงความเชื่อมั่นแบบบูตสแตรป์เปอร์เซ็นต์ไทล์ ระดับ $100(1 - \alpha)\%$ คือ

$$(\hat{\theta}_{(\alpha/2)}^*, \hat{\theta}_{(1-\alpha/2)}^*)$$

ในการศึกษานี้ ได้ดำเนินการประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{\theta}^{*(b)}$ ในแต่ละรอบถูกคำนวณโดยใช้วิธีภาวน่าจะเป็นสูงสุด ผ่านฟังก์ชัน $\max Lik()$

- วิธีบูตสแตรป์พื้นฐาน (basic bootstrap) คือวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่นโดยอาศัยแนวคิดการเลือกตัวอย่างซ้ำ (resampling) จากข้อมูลตัวอย่างเดิม เพื่อประมาณการแจกแจงของค่าประมาณ $\hat{\theta}$ โดยให้ $x = (x_1, \dots, x_n)$ แทนข้อมูลตัวอย่าง และให้ $\hat{\theta}$ เป็นค่าประมาณพารามิเตอร์จากข้อมูลจริง จากนั้นทำการเลือกตัวอย่างซ้ำบูตสแตรป์จำนวน B ครั้ง เพื่อให้ได้ชุดตัวอย่าง $x^{*(b)}$, $b = 1, 2, \dots, B$ และคำนวณค่าประมาณในแต่ละรอบเป็น $\hat{\theta}^{*(b)}$

โดยให้ $\hat{\theta}^{*(1)}, \hat{\theta}^{*(2)}, \dots, \hat{\theta}^{*(B)}$ แทนค่าประมาณจากตัวอย่างบูตสแตรป์ และให้ $\hat{\theta}_{(\alpha/2)}^*$ และ $\hat{\theta}_{(1-\alpha/2)}^*$ แทนควอนไทล์ลำดับที่ $\alpha/2$ และ $1 - \alpha/2$ ของลำดับค่าดังกล่าว

ดังนั้น ช่วงความเชื่อมั่นแบบวิธีบูตสแตรป์พื้นฐาน ระดับ $100(1 - \alpha)\%$ คือ

$$(2\hat{\theta} - \hat{\theta}_{(1-\alpha/2)}^*, 2\hat{\theta} - \hat{\theta}_{(\alpha/2)}^*)$$

ในการศึกษานี้ ได้ดำเนินการเลือกตัวอย่างซ้ำด้วยวิธีบูตสแตรป์จำนวน B ครั้ง และในแต่ละรอบได้ประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{\theta}^{*(b)}$ ด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด ผ่านฟังก์ชัน $\max Lik()$

- วิธีบูตสแตรป์ปรับค่าเอนเอียงและค่าเร่ง (bias-corrected and accelerated (BCa) bootstrap) ที่ได้รับการปรับปรุงเพื่อแก้ทั้งความเอนเอียง (bias) และ ความเบ้ (skewness) ของตัวประมาณ โดยใช้ ปัจจัยปรับความเอนเอียง (bias-correction factor) และปัจจัยเร่ง (acceleration factor)

โดยให้ $\hat{\theta}^{*(1)}, \dots, \hat{\theta}^{*(B)}$ แทนค่าประมาณจากตัวอย่างบูตสแตรป์ และให้ z_0 แทนค่าปรับความเอนเอียง (bias-correction) และให้ a แทนค่าปรับความเร่ง (acceleration) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$z_0 = \Phi^{-1} \left(\frac{\#(\hat{\theta}^* \leq \hat{\theta})}{B} \right), \quad a = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{\theta}_{(-i)} - \hat{\theta}_{(-)})^3}{6[\sum_{i=1}^n (\hat{\theta}_{(-i)} - \hat{\theta}_{(-)})^2]^{3/2}}, \quad \hat{\theta}_{(-)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{\theta}_{(-i)}$$

โดยที่ $\Phi^{-1}(\cdot)$ คือ ฟังก์ชันผกผันของการแจกแจงปกติมาตรฐาน

$\#(\hat{\theta}^* \leq \hat{\theta})$ คือ จำนวนครั้งที่ค่าประมาณบูตสแตรป์มีค่าไม่เกินค่าประมาณจากข้อมูลจริง

$\hat{\theta}_{(-i)}$ คือ ค่าประมาณพารามิเตอร์ที่ได้จากการตัดข้อมูลตัวอย่างลำดับที่ i ออก

ดังนั้น ช่วงความเชื่อมั่นแบบวิธีบูตสแตรป์ปรับค่าเอนเอียงและค่าเร่ง ระดับ $100(1 - \alpha)\%$ คือ

$$(\hat{\theta}_{(\alpha_1)}^*, \hat{\theta}_{(\alpha_2)}^*)$$

$$\text{โดยที่ } \alpha_1 = \Phi \left(z_0 + \frac{z_0 + z_{\alpha/2}}{1 - a(z_0 + z_{\alpha/2})} \right) \text{ และ } \alpha_2 = \Phi \left(z_0 + \frac{z_0 + z_{1-\alpha/2}}{1 - a(z_0 + z_{1-\alpha/2})} \right)$$

ในการศึกษานี้ ได้ดำเนินการประมาณค่าพารามิเตอร์ในแต่ละตัวอย่างบูตสแตรป์ซึ่งได้จากการสุ่มตัวอย่างซ้ำจากข้อมูลเดิม ด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด ผ่านฟังก์ชัน $\max Lik()$

4. การประเมินประสิทธิภาพ (Performance Evaluation)

ในการศึกษานี้ ประสิทธิภาพของวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ θ ถูกประเมิน โดยใช้เกณฑ์ดังนี้

- ค่าความน่าจะเป็นคัมรวม (Coverage Probability) คือ ค่าความน่าจะเป็นที่ช่วงความเชื่อมั่นครอบคลุมค่าพารามิเตอร์จริงของประชากร โดยวิธีที่มีประสิทธิภาพควรให้ค่าความน่าจะเป็นคัมรวมใกล้เคียงกับระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด

- ความกว้างคาดหวัง (Expected Length) โดยวิธีที่มีประสิทธิภาพควรให้ค่าความกว้างคาดหวังมีค่าน้อยที่สุด โดยพิจารณาพร้อมกับค่าความน่าจะเป็นคัมรวมที่ต้องอยู่ใกล้เคียงกับระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด

5. การประยุกต์กับข้อมูลจริง (Real Data Application)

โดยใช้ข้อมูลจำนวนอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นบนท้องถนนในประเทศไทย วันที่ 1 มกราคม พ.ศ.2564 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ.2565 โดยใช้ข้อมูลอุบัติเหตุบนท้องถนนของโครงข่ายถนนของกระทรวงคมนาคม

ผลและวิจารณ์

การศึกษานี้ดำเนินการเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ของการแจกแจงปัวซอง-ฮัค โดยผลการจำลองแบบมอนติคาร์โลสำหรับวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่นแสดงดังตารางที่ 1 พบว่า เมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น ค่าความน่าจะเป็นคัมรวม (Coverage Probability) ของทุกวิธีมีแนวโน้มเข้าใกล้ระดับความเชื่อมั่นที่กำหนดไว้ที่ 95% และค่าความยาวช่วงเฉลี่ย (Expected Length) มีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่าการประมาณค่ามีความแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ วิธีวัดให้ค่าความน่าจะเป็นคัมรวมอยู่ในระดับใกล้เคียง 0.95 อย่างสม่ำเสมอ ร่วมกับมีค่าความยาวช่วงเฉลี่ยค่อนข้างสั้นเมื่อเทียบกับวิธีอื่น จึงถือว่ามีประสิทธิภาพโดยรวมที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษานี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้วิธีการที่ศึกษาในสถานการณ์จริง งานวิจัยนี้ได้นำวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่นไปใช้กับข้อมูลจำนวนอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นบนท้องถนนในประเทศไทย โดยสถิติเชิงพรรณนาของข้อมูลแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าข้อมูลมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.7426 ขณะที่ค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1.6804 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยอย่างชัดเจน สะท้อนให้เห็นถึงภาวะการกระจายเกินเกณฑ์ นอกจากนี้ ค่ามัธยฐานเท่ากับ 0 แสดงว่าข้อมูลส่วนใหญ่มีจำนวนอุบัติเหตุเกิดขึ้นน้อยหรือไม่เกิดอุบัติเหตุเลย ขณะที่ค่ามากที่สุดเท่ากับ 49 บ่งชี้ถึงการมีจำนวนอุบัติเหตุสูงในบางกรณี ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญในการพิจารณาเลือกการแจกแจงที่สามารถรองรับภาวะการกระจายเกินเกณฑ์ได้อย่างเหมาะสมในขั้นตอนถัดไป

เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของการแจกแจงสำหรับข้อมูลชุดนี้ จึงทำการเปรียบเทียบการแจกแจงข้อมูลแบบนับหลายรูปแบบ โดยผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 3 พบว่าการแจกแจงปัวซอง-ฮัคให้ค่าล็อกภาวะน่าจะเป็นสูงที่สุด และมีค่า AIC และ BIC ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการแจกแจงอื่น ขณะที่การแจกแจง Komal ให้ค่า AIC ใกล้เคียงกับการแจกแจงปัวซอง-ฮัค แสดงให้เห็นว่าทั้งสองการแจกแจงสามารถอธิบายข้อมูลได้ดีในระดับใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม การแจกแจงปัวซอง-ฮัคมีฟังก์ชันมวลความน่าจะเป็นที่พัฒนาภายใต้แนวคิดของการแจกแจงผสมระหว่างการแจกแจงปัวซองและการแจกแจงฮัค จึงมีความยืดหยุ่นในการอธิบายข้อมูลที่มีภาวะการกระจายเกินเกณฑ์และมีจำนวนศูนย์สูงได้ดีกว่า ส่งผลให้สามารถสะท้อนลักษณะการกระจายของข้อมูลอุบัติเหตุได้เหมาะสมมากขึ้น จึงให้ค่าล็อกภาวะน่าจะเป็นสูงกว่า และมีค่าเกณฑ์ AIC และ BIC ต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการแจกแจง Komal

ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์จากการประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริงแสดงดังตารางที่ 4 พบว่าวิธีวัดให้ค่าความยาวช่วงความเชื่อมั่นสั้นที่สุดเท่ากับ 0.0462 ซึ่งสะท้อนถึงความแม่นยำในการประมาณค่าที่สูงกว่าวิธีอื่น ภายใต้ระดับความเชื่อมั่นเดียวกัน



สรุป

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่น โดยอาศัยทั้งการจำลองแบบมอนติคาร์โลและข้อมูลจริง ผลการศึกษาพบว่า เมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น ทุกวิธีให้ค่าความน่าจะเป็นคุ่มรวมเข้าใกล้ระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด และให้ค่าความกว้างคาบหมายลดลงในลักษณะใกล้เคียงกัน แม้ว่าผลลัพธ์ของแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันไม่มากในหลายกรณีย่อย แต่วิธี Wald ให้ค่าความน่าจะเป็นคุ่มรวมอยู่ใกล้ระดับ 0.95 ได้อย่างสม่ำเสมอร่วมกับให้ค่าความกว้างคาบหมายค่อนข้างสั้น จึงสะท้อนถึงความสมดุลระหว่างความครอบคลุมและความแม่นยำในการประมาณค่าได้ดีกว่าวิธีอื่นเล็กน้อย ขณะเดียวกัน ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจริงให้ข้อสรุปที่สอดคล้องกับผลการจำลอง จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธี Wald มีประสิทธิภาพโดยรวมเหมาะสมที่สุดสำหรับการศึกษานี้



เอกสารอ้างอิง

- Adya, R., & Kumar, S. (2021). Adya distribution: A new lifetime model with statistical properties and applications. *Journal of Applied Statistics*, 48(9), 1587–1605.
- Akshaya, K., & Rani, P. (2022). Akshaya distribution: Properties and real-life applications. *Asian Journal of Probability and Statistics*, 19(3), 45–60.
- Alomair, A. M., Ayyaz, F., Tariq, S., & Ahsan-ul-Haq, M. (2025). Discrete Poisson Haq distribution with mathematical properties and count data modeling. *Scientific Reports*, 15(1), 23281.
- Casella, G., & Berger, R. L. (2002). *Statistical inference* (2nd ed.). Duxbury.
- Efron, B., & Tibshirani, R. J. (1993). *An introduction to the bootstrap*. Chapman & Hall.
- Haq, A. (2016). Haq distribution: A new one-parameter continuous model with applications. *Journal of Statistical Theory and Applications*, 15(3), 245–258.
- Ishita, M., & Sujatha, K. (2021). Ishita distribution and its statistical applications. *International Journal of Statistics and Probability*, 10(4), 12–25.
- Iwueze, I. S., & Nwosu, C. R. (2018). Iwueze distribution: Properties and applications to count data. *Journal of Statistical Theory and Practice*, 12(2), 225–239.
- Juchez, E. C., & Mbegbu, J. I. (2022). Juchez probability distribution: Properties and applications. *Asian Journal of Probability and Statistics*, 20(2), 56–71.
- Komal, R., & Sharma, V. (2020). Komal distribution and its applications in engineering data. *Applied Mathematics and Computation*, 367, 124783.
- Ministry of Transport. (2025). ข้อมูลอุบัติเหตุบนท้องถนนของโครงข่ายถนนของกระทรวงคมนาคม. Data.go.th. <https://datagov.mot.go.th/dataset/roadaccident>
- Lindley, D. V. (1958). Fiducial distributions and Bayes' theorem. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 20(1), 102–107.
- Prakaamy, R., & Pranav, S. (2023). Prakaamy distribution: A flexible one-parameter model for count data. *Mathematics and Statistics*, 11(1), 1–15.
- Rama, K., & Devi, L. (2019). Rama distribution: Mathematical properties and parameter estimation. *Statistics in Transition*, 20(4), 587–602.



Rani, P., & Akshaya, K. (2021). Statistical inference for the Rani distribution with applications. *Journal of Probability and Statistics*, 2021, 1–12.



ตาราง

ตารางที่ 1 ผลการจำลองแบบมอนติคาร์โลของค่าความน่าจะเป็นคัมรวมและความกว้างคาตหมายของวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับพารามิเตอร์การแจกแจงปัวซอง-ฮัค

θ	n	Coverage Probability					Expected Length				
		likelihood	Wald	basic	percentile	BCa	likelihood	Wald	basic	percentile	BCa
0.1	10	0.8980	0.9280	0.9050	0.9520	0.9400	0.0578	0.0579	0.0558	0.0573	0.0576
	50	0.9420	0.9280	0.9400	0.9460	0.9520	0.0352	0.0352	0.0347	0.0354	0.0355
	100	0.9520	0.9530	0.9510	0.9560	0.9590	0.0248	0.0248	0.0246	0.0248	0.0248
	500	0.9620	0.9600	0.9620	0.9530	0.9560	0.0111	0.0110	0.0111	0.0111	0.0111
	1000	0.9410	0.9410	0.9440	0.9460	0.9450	0.0078	0.0078	0.0078	0.0079	0.0078
0.3	10	0.8930	0.9110	0.9040	0.9470	0.9420	0.2046	0.2045	0.1938	0.1950	0.1970
	50	0.9390	0.9470	0.9450	0.9570	0.9590	0.1228	0.1223	0.1200	0.1206	0.1210
	100	0.9500	0.9520	0.9600	0.9650	0.9570	0.0855	0.0856	0.0846	0.0853	0.0854
	500	0.9520	0.9500	0.9500	0.9490	0.9500	0.0377	0.0377	0.0378	0.0378	0.0377
	1000	0.9520	0.9510	0.9490	0.9490	0.9460	0.0266	0.0266	0.0265	0.0265	0.0265
0.5	10	0.9130	0.9240	0.9270	0.9670	0.9579	0.3857	0.3873	0.3599	0.3637	0.3685
	50	0.9310	0.9340	0.9430	0.9490	0.9510	0.2262	0.2262	0.2200	0.2227	0.2242
	100	0.9460	0.9510	0.9460	0.9630	0.9530	0.1574	0.1575	0.1552	0.1568	0.1573
	500	0.9460	0.9450	0.9470	0.9420	0.9460	0.0691	0.0691	0.0694	0.0696	0.0693
	1000	0.9320	0.9290	0.9340	0.9210	0.9320	0.0486	0.0486	0.0489	0.0489	0.0489
0.8	10	0.9210	0.8880	0.9340	0.9610	0.9692	0.7819	0.7842	0.7085	0.6812	0.5742
	50	0.9350	0.9280	0.9370	0.9560	0.9510	0.4192	0.4196	0.4035	0.4068	0.4119
	100	0.9280	0.9100	0.9230	0.9350	0.9350	0.2886	0.2888	0.2830	0.2830	0.2847
	500	0.9530	0.9490	0.9530	0.9540	0.9510	0.1266	0.1264	0.1277	0.1274	0.1269
	1000	0.9450	0.9390	0.9450	0.9320	0.9440	0.0883	0.0882	0.0889	0.0889	0.0887
1	10	0.8930	0.8900	0.9100	0.9610	0.9156	1.1117	1.1136	0.9832	0.9473	0.6296
	50	0.9380	0.9330	0.9470	0.9580	0.9580	0.5912	0.5922	0.5657	0.5633	0.5734
	100	0.9420	0.9410	0.9450	0.9470	0.9570	0.3952	0.3952	0.3864	0.3864	0.3896
	500	0.9440	0.9380	0.9390	0.9350	0.9340	0.1696	0.1693	0.1705	0.1708	0.1697
	1000	0.9460	0.9470	0.9440	0.9510	0.9450	0.1210	0.1209	0.1215	0.1215	0.1211
1.5	10	0.8868	0.8717	0.8970	0.9430	0.0000	2.4959	2.5041	2.0879	1.8024	6.3822
	50	0.8980	0.9130	0.9170	0.9560	0.9727	1.1512	1.1524	1.0742	1.0542	1.0439
	100	0.9450	0.9300	0.9460	0.9560	0.9450	0.7287	0.7288	0.7046	0.6983	0.7093
	500	0.9550	0.9540	0.9490	0.9500	0.9500	0.3052	0.3044	0.3060	0.3056	0.3041
	1000	0.9530	0.9510	0.9500	0.9420	0.9510	0.2144	0.2141	0.2150	0.2150	0.2143



θ	n	Coverage Probability					Expected Length				
		likelihood	Wald	basic	percentile	BCa	likelihood	Wald	basic	percentile	BCa
2	10	0.9150	0.8506	0.9300	0.9619	0.9836	4.2274	4.2633	3.4769	2.8402	8.2527
	50	0.9160	0.8950	0.9350	0.9530	0.9667	1.8381	1.8378	1.6615	0.6077	1.3583
	100	0.9410	0.9280	0.9470	0.9650	0.9600	1.1529	1.1498	1.1016	1.0874	1.1120
	500	0.9570	0.9520	0.9550	0.9500	0.9510	0.4688	0.4668	0.4727	0.4732	0.4684
	1000	0.9560	0.9570	0.9540	0.9420	0.9530	0.3292	0.3285	0.3286	0.3285	0.3276

ตารางที่ 2 สถิติเชิงพรรณนาของชุดข้อมูล

n	Min	Mean	Median	Max	StDev	Variance
31817	0	0.7426	0.0000	49	1.2963	1.6804

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของการแจกแจง

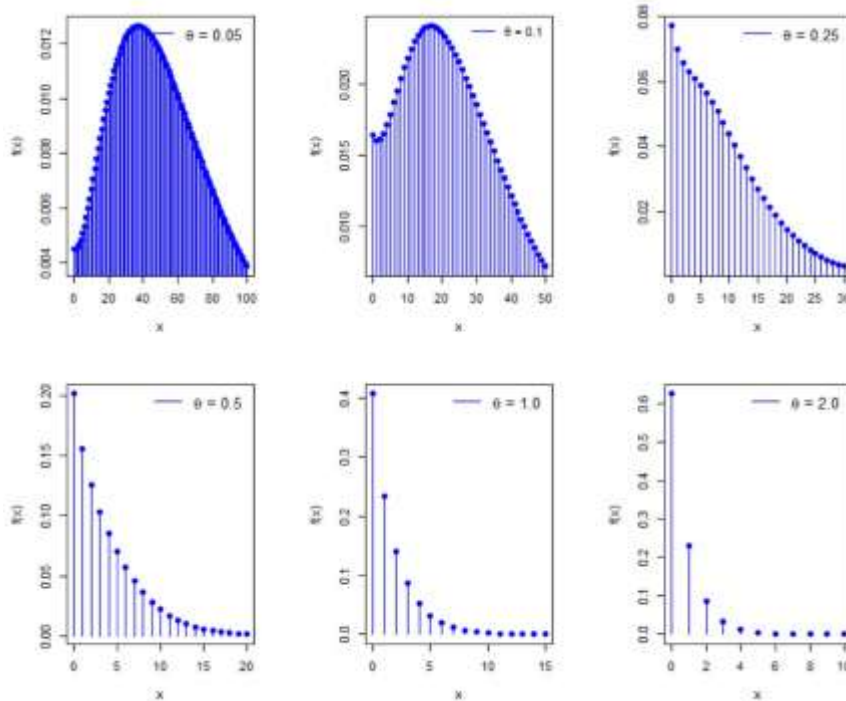
Distribution	MLE	SE	logLik	AIC	BIC
Phaq	1.7172	0.0118	-37899.23	75898.04	75808.82
Komal	2.6932	0.0204	-37948.02	75898.04	75906.41
Poisson	0.7426	0.0048	-40321.62	80645.23	80653.60
Adya	2.2687	0.0169	-45716.73	91435.47	91443.83
Iwueze	4.0397	0.0292	-46311.07	92624.14	92632.51
Juchez	1.1477	0.0067	-52153.94	104309.88	104318.24
Rama	1.1477	0.0067	-52153.94	104309.88	104318.24
Rani	1.1477	0.0067	-61192.72	122387.45	122395.82
Pranav	1.1477	0.0067	-67008.90	134019.79	134028.16
Prakaamy	1.7215	0.0092	-69122.40	138246.80	138255.17
Sujatha	1.7215	0.0092	-82288.50	164579.00	164587.36
Ishita	1.7215	0.0092	-86210.86	172423.72	172432.09
ZTP	1.0287	0.0103	-632516.22	1265034.45	1265042.82

ตารางที่ 4 ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์จากการประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริง

Method	95% CI	Length
likelihood ratio	(1.6942, 1.7406)	0.0463
Wald	(1.6941, 1.7403)	0.0462
percentile	(1.6926, 1.7423)	0.0497
basic	(1.6897, 1.7439)	0.0543

รูปภาพ

รูปภาพที่ 1 กราฟฟังก์ชันความน่าจะเป็น (pmf) ของการแจกแจงปัวซอง-ฮัท





ประสิทธิผลของการออกกำลังกายแบบเสริมสร้างความยืดหยุ่นและการทรงตัวเพื่อ
การป้องกันทุติยภูมิในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจ: การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็น
ระบบของการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ และการวิเคราะห์ห่อภิมาณ
Effectiveness of Flexible and Balance Exercise for Secondary Prevention in Patient with
Coronary Heart Disease: A Systematic Review of Systematic review and Meta-analyses

อิสริยา มานะดี¹, วารณี บุญช่วยเหลือ² และ กมลภัทร รัชมีรัถยาธรรม²

Itsareeya Manadee¹, Waranee Bunchulua² and Kamolpat Russameeruttayadham²

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์หลักฐานจาก systematic reviews และ meta-analyses
เกี่ยวกับประสิทธิผลของการออกกำลังกายแบบเสริมสร้างความยืดหยุ่นและการทรงตัวเพื่อป้องกันทุติยภูมิ
ในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจ เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาตามปกติ สืบค้นข้อมูลจาก PubMed, Scopus,
CINAHL และ The Cochrane Library รวมทั้งเอกสารอ้างอิงและ OpenGrey จนถึงวันที่ 26 มิถุนายน 2567
คัดเลือกงานวิจัยที่ตีพิมพ์ภาษาอังกฤษ และประเมินคุณภาพด้วย AMSTAR-2 พบบางงานวิจัยที่ผ่านเกณฑ์
12 เรื่อง ได้แก่ โยคะ 3 เรื่อง ไทเก็ก 8 เรื่อง และปาตวันจิน 1 เรื่อง ผลการศึกษาพบว่า โยคะช่วยลดความดัน
โลหิตลดระดับไตรกลีเซอไรด์ เพิ่มระดับไขมันดี (HDL) และเพิ่มคุณภาพชีวิต แต่ไม่พบความแตกต่างในผลลัพธ์
ด้านการเสียชีวิต เหตุการณ์หัวใจและหลอดเลือดรวม ระดับคอเลสเตอรอลรวม และระดับไขมันร้าย (LDL)
ไทเก็กช่วยเพิ่มสมรรถภาพทางกายและค่าการบีบตัวหัวใจห้องล่างซ้าย (Left Ventricular Ejection Fraction,
LVEF) อย่างมีนัยสำคัญ และมีแนวโน้มให้ผลดีต่อคุณภาพชีวิต ความดันโลหิต ระดับไขมัน ความเครียด
ความวิตกกังวล ความไวต่อการรับรู้ความดันโลหิต (Baroreflex sensitivity) และอัตราการเต้นของหัวใจ
ส่วนปาตวันจินช่วยเพิ่มสมรรถภาพทางกาย LVEF, สมรรถภาพการใช้ออกซิเจน และ Metabolic Equivalent of
Task (METs) สรุปได้ว่า การออกกำลังกายที่เน้นความยืดหยุ่นและการทรงตัวอาจเป็นทางเลือกเสริมที่มี
ประโยชน์ต่อสมรรถภาพทางกายการทำงานของหัวใจและปัจจัยเสี่ยงทางหัวใจและหลอดเลือดในผู้ป่วย

¹กลุ่มงานเภสัชกรรม โรงพยาบาลพิมาย นครราชสีมา 30110 ประเทศไทย

Pharmacy Department, Phimai hospital, Nakon Ratchasima 30110, Thailand

² สาขาการคุ้มครองผู้บริโภคด้านสุขภาพและการบริหารทางเภสัชศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000
ประเทศไทย

Department of Health Consumer Protection and Pharmacy Administration, Faculty of Pharmacy, Silpakorn University,
Nakhon Pathom 73000, Thailand



โรคหลอดเลือดหัวใจ อย่างไรก็ตาม หลักฐานต่อผลลัพธ์ทางคลินิกระยะยาวยังไม่ชัดเจน และควรมีการศึกษาคุณภาพสูงเพิ่มเติม

คำสำคัญ : โรคหลอดเลือดหัวใจ, โยคะ, ไทเก๊ก, ปาตวันจิน, การป้องกันทุติยภูมิ, การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ, การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบและวิเคราะห์หือภิมาน

Abstract

This systematic review sought to consolidate evidence from systematic reviews and meta-analyses regarding the efficacy of flexibility and balance exercises for secondary prevention in patients with coronary heart disease, in comparison to standard care. We searched PubMed, Scopus, CINAHL, and the Cochrane Library as well as OpenGrey and reference screening, until June 26, 2024. Reviews in English were included, and AMSTAR-2 was used to assess the quality of the research. There were 12 reviews that met the requirements for inclusion: 3 on yoga, 8 on Tai Chi, and 1 on Baduanjin. The findings demonstrated that yoga improved blood pressure, triglycerides, HDL, and quality of life, yet did not have a significant impact on all-cause mortality, composite cardiovascular events, total cholesterol, or LDL levels. Tai Chi significantly improved exercise capacity and left ventricular ejection fraction (LVEF), showing good changes in quality of life, blood pressure, lipid profiles, stress levels, anxiety, baroreflex sensitivity, and heart rate. Baduanjin improved exercise capacity, left ventricular ejection fraction (LVEF), peak oxygen consumption (VO_2), oxygen pulse, and metabolic equivalents (METs). Flexibility and balance exercises may be effective supplementary strategies for secondary prevention in patients with coronary heart disease, particularly in improving functional capacity, cardiac function, and certain cardiovascular risk factors. However, there is not much evidence about long-term clinical outcomes, so more high-quality research is needed.

Keywords: Coronary heart disease, Yoga, Tai chi, Baduanjin, Secondary prevention, Systematic review, Systematic review and meta-analysis

บทนำ

โรคหลอดเลือดหัวใจ (Coronary heart disease) จัดเป็นปัญหาสาธารณสุขที่สำคัญ เนื่องจากเป็นโรคที่เกิดจากการมีภาวะหลอดเลือดแดงแข็ง จากการสะสมของไขมันในผนังหลอดเลือด ทำให้ผู้ป่วยมีโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ที่นำไปสู่ภาวะขาดเลือดไปเลี้ยงกล้ามเนื้อหัวใจได้ โดยพบว่ามากกว่า 40% ในผู้ที่เคยเป็นโรคหลอดเลือดหัวใจจะกลับมาเกิดภาวะหัวใจขาดเลือดเฉียบพลันซ้ำ (The Health Policy Partnership, 2021) ซึ่งจะพบได้มากในช่วง 1 ปีแรก (Namiuchi et al., 2021) และพบว่าปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการตีบซ้ำของ

หลอดเลือดหัวใจ (Chinphan et al., 2019) ได้แก่ โรคเบาหวาน ประวัติการเป็นโรคของครอบครัว ดัชนีมวลกายเกินเกณฑ์ พฤติกรรมการดูแลตนเอง เช่น ด้านการบริโภคอาหาร ด้านกิจกรรมทางกายและการพักผ่อนอย่างเพียงพอ ด้านการสูบบุหรี่และดื่มแอลกอฮอล์ เป็นต้น และพบว่าเมื่อผู้ป่วยเกิดโรคซ้ำ จะเพิ่มโอกาสในการเสียชีวิตมากยิ่งขึ้นโดยพบการเสียชีวิตประมาณร้อยละ 20 ในช่วงปีแรก และประมาณร้อยละ 10 ในปีถัดไป (Law et al., 2002)

การป้องกันทุติยภูมิ (Secondary prevention) เป็นแนวทางการจัดการโรคที่หลายหน่วยงานให้ความสำคัญและกำหนดเป็นนโยบายในระดับประเทศโดยในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจจะครอบคลุมทั้งการรักษาด้วยยาและการดูแลแบบไม่ใช้ยา เช่น การควบคุมอาหาร การเลิกสูบบุหรี่ การลดน้ำหนัก การจัดการความเครียด และการออกกำลังกาย ตามแนวทางเวชปฏิบัติระดับสากล เช่น ESC Guidelines ปี ค.ศ.2024 และคำแนะนำจากองค์กรด้านโรคหัวใจต่างๆ ให้ความสำคัญกับการออกกำลังกายในฐานะองค์ประกอบหลักของโปรแกรมฟื้นฟูหัวใจ (cardiac rehabilitation) เนื่องจากช่วยเพิ่มสมรรถภาพหัวใจและหลอดเลือดลดปัจจัยเสี่ยง และส่งเสริมคุณภาพชีวิตของผู้ป่วย การออกกำลังกาย (Exercise) จึงเป็นวิธีการที่แนะนำกับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจทุกราย (Pollock et al., 2000) ตัวอย่าง เช่น การออกกำลังกายแบบแอโรบิก (Aerobic exercise) การออกกำลังกายแบบแอนาโรบิก (Anaerobic exercise) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติผู้ป่วยบางรายอาจมีข้อจำกัดในการออกกำลังกายที่มีความหนักปานกลางถึงหนัก เช่น ผู้สูงอายุ ผู้ที่มีสมรรถภาพทางกายต่ำ หรือผู้ที่มีโรคร่วมหลายชนิด จึงมีความสนใจต่อการออกกำลังกายรูปแบบที่มีความอ่อนโยนมากขึ้น โดยเฉพาะการออกกำลังกายรูปแบบเสริมสร้างความยืดหยุ่นและการทรงตัว (Flexible and balance exercise) ซึ่งกำลังได้รับความนิยมมากขึ้น และถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นทางเลือกในการป้องกันทุติยภูมิ เช่น การเล่นโยคะ (Yoga) (Matchim & Kritpracha, 2015) เป็นการแพทย์ทางเลือกในทวีปอเมริกาเหนือ และยุโรป (Cramer, 2015) การเล่นไทเก๊ก (Taichi) ของประเทศจีนได้รับความนิยมมากในผู้สูงอายุ (Nery et al., 2014; Liu et al., 2018) เป็นต้น รูปแบบการออกกำลังกายดังกล่าวไม่ได้มุ่งเน้นเพียงการเคลื่อนไหวของร่างกายเท่านั้น แต่ยังผสมผสานการยืดเหยียด การฝึกสมดุล การควบคุมลมหายใจ การผ่อนคลาย และการฝึกจิตใจเข้าไว้ด้วยกัน จึงอาจส่งผลเชิงบวกต่อทั้งระบบหัวใจและหลอดเลือด ระบบประสาทอัตโนมัติ สุขภาวะด้านจิตใจ (Bruce et al., 2021; Yang et al., 2022;) และมีคุณภาพชีวิตที่เพิ่มขึ้น (Yeh et al., 2009) นอกจากนี้การออกกำลังกายรูปแบบนี้ มีข้อดีในด้านความสะดวกที่สามารถเล่นได้ทุกที่ทุกเวลา (Bruce et al., 2021; Taylor-Piliae et al., 2020) ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่จำเพาะในการเล่น มีความปลอดภัย (Liu et al., 2018) และเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะกับประเทศที่มีรายได้ปานกลางค่อนข้างต่ำ (Li et al., 2021) เพราะเป็นรูปแบบการออกกำลังกายที่ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ (Bruce et al., 2021; Taylor-Piliae et al., 2020) จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าการออกกำลังกายรูปแบบเสริมสร้างความยืดหยุ่นและการทรงตัว มีข้อได้เปรียบที่มากมายซึ่งจะสามารถเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการป้องกันทุติยภูมิสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจต่อไป



จากการทบทวนวรรณกรรมพบบงานวิจัยที่ศึกษาประสิทธิผลของการออกกำลังกายแบบเสริมสร้างความยืดหยุ่นและการทรงตัวที่หลากหลาย โดยมีการศึกษารูปแบบการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic review; SR) และการวิเคราะห์ห่อหุ้ม (Meta-analysis; MA) ที่ศึกษาประสิทธิผลของการออกกำลังกายแบบเสริมสร้างความยืดหยุ่นและการทรงตัวในการป้องกันหัตถิภัยภูมิสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจ เช่น โยคะ (Bruce et al., 2021; Li et al., 2021) ไทเก็ก (Taylor-Piliae et al., 2020; Liu et al., 2018, Wu et al., 2020) ปาตวันจีน (Wang & Xu, 2022) ซึ่งผลการศึกษาที่รายงานยังมีความไม่สอดคล้องกัน โดยมีการรายงานว่าการออกกำลังกายแบบดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มคุณภาพชีวิตและลดภาวะซึมเศร้าได้ (Taylor-Piliae et al., 2020; Li et al., 2021) ในขณะที่ผลลัพธ์ทางคลินิก เช่น การลดความดันโลหิต ระดับไตรกลีเซอไรด์ ดัชนีมวลกาย (Bruce et al., 2021; Liu et al., 2021; Li et al., 2021) และค่า LVEF (Bruce et al., 2021; Wu et al., 2020; Wang & Xu, 2022) ยังให้ผลที่แตกต่างกันในแต่ละการศึกษา แม้จะมีข้อสรุปจากงานวิจัยในรูปแบบ systematic review และ meta-analysis แต่ข้อค้นพบที่รายงานยังมีความหลากหลายและบางส่วนไม่สอดคล้องกัน อีกทั้งยังไม่พบการสังเคราะห์หลักฐานเชิงประจักษ์ที่เป็นการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบในรูปแบบ umbrella review อย่างครอบคลุมในประเด็นนี้ ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวม ประเมิน และสังเคราะห์หลักฐานเชิงประจักษ์จาก systematic reviews และ meta-analyses ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิผลของการออกกำลังกายแบบยืดหยุ่นและการฝึกการทรงตัวเพื่อการป้องกันหัตถิภัยภูมิในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจ

วัตถุประสงค์

เพื่อสังเคราะห์หลักฐานเชิงประจักษ์ของประสิทธิผลของการออกกำลังกายแบบเสริมสร้างความยืดหยุ่นและการทรงตัวเพื่อการป้องกันหัตถิภัยภูมิในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจ โดยการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบที่ครอบคลุมงานวิจัยรูปแบบการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบหรือการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ และวิเคราะห์ห่อหุ้มเปรียบเทียบกับมาตรฐานการดูแลในรูปแบบปกติ (usual care)

อุปกรณ์และวิธีการ

แหล่งข้อมูลในการสืบค้น

ผู้วิจัยสืบค้นงานวิจัยโดยใช้ฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ จำนวน 4 ฐานข้อมูล ได้แก่ PubMed, Scopus, CINAHL และ The Cochrane Library (CENTRAL) โดยสืบค้นตั้งแต่มีฐานข้อมูล จนถึงวันที่ 26 มิถุนายน 2567 ร่วมกับการสืบค้นเพิ่มเติมโดยพิจารณาจากเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง หรือสืบค้นจากวารสารเฉพาะกลุ่มที่ไม่ได้รับการตีพิมพ์ (Grey literature) จากฐานข้อมูล OpenGrey



ขอบเขตของการสืบค้น

ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตและคำสำคัญในการสืบค้นจากฐานข้อมูลตามระบบ PICO ได้แก่

- (1) P (population) หมายถึง ประชากรที่ศึกษา คือ ผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจ คำค้นที่ใช้ เช่น coronary artery disease (MeSH), myocardial ischemia (MeSH), ischemic heart diseases, stenocardia, stenocardias, heart attack
- (2) I (intervention) หมายถึง โปรแกรมหรือวิธีการป้องกันทุติยภูมิด้วยวิธีการออกกำลังกายรูปแบบเสริมสร้างความยืดหยุ่น และการทรงตัว คำค้นที่ใช้ เช่น secondary prevention, secondary disease prevention, relapse prevention, medicine, medicine, Chinese traditional, traditional (MeSH), Chinese exercise, exercise movement techniques (MeSH), flexible exercise, balancing exercise, exercise (MeSH), kinesiotherapy
- (3) C (comparison) หมายถึง กลุ่มควบคุม หรือกลุ่มเปรียบเทียบ คือ การดูแลในรูปแบบปกติ โดยไม่มีการระบุเป็นคำค้น
- (4) O (outcome) หมายถึง ผลลัพธ์ของการศึกษา เช่น ระดับไขมันในเลือด ระดับความดันโลหิต อัตราการเต้นของหัวใจ การเสียชีวิต ความสามารถในการออกกำลังกาย เหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ทางหัวใจที่ไม่รุนแรง (Nonfatal cardiac event) (คุณภาพชีวิต เป็นต้น โดยไม่มีการระบุ คำค้น เพื่อรวบรวมผลลัพธ์ที่มีความหลากหลาย

การสืบค้นใช้คำเชื่อม OR ระหว่างคำสืบค้นแต่ละคำภายในกลุ่ม population และ intervention และใช้คำเชื่อม AND ระหว่างกลุ่มคำสืบค้นของ population และ intervention

การคัดเลือกและประเมินคุณภาพงานวิจัย

เกณฑ์การคัดเข้า (Inclusion criteria)

- เป็นงานวิจัยรูปแบบการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ หรือการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบและวิเคราะห์หือภิมาน
- ทำการศึกษาในผู้ป่วยที่ถูกรวบรวมเป็นโรคหลอดเลือดหัวใจ
- เป็นงานวิจัยที่ศึกษาประสิทธิผลของวิธีการออกกำลังกายรูปแบบเสริมสร้างความยืดหยุ่นและการทรงตัว เพื่อการป้องกันทุติยภูมิ เปรียบเทียบกับการดูแลในรูปแบบปกติ (usual care) ซึ่งคือการบริการผู้ป่วยนอก และผู้ป่วยในตามมาตรฐานของสหวิชาชีพ ทั้งนี้การบริการรูปแบบปกติยังรวมถึงการบริการปกติ หรือมาตรฐาน (usual care/standard care) เช่น การรับประทานยา การให้คำแนะนำในการดูแลสุขภาพ หรือการดูแลที่ครอบคลุมในโปรแกรม cardiac rehabilitation ในบริบทของแต่ละประเทศที่ศึกษานั้นด้วย
- เป็นงานวิจัยที่มีการรายงานผลลัพธ์ที่สนใจอย่างน้อย 1 ผลลัพธ์

เกณฑ์คัดออก (Exclusion Criteria)

- งานวิจัยที่บทความฉบับเต็มตีพิมพ์เป็นภาษาอื่นที่ไม่ใช่ภาษาอังกฤษ
- งานวิจัยที่ไม่สามารถแยกผลลัพธ์เฉพาะผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจได้

ผู้วิจัย 2 คนดำเนินการคัดเลือกรายงานงานวิจัยอย่างเป็นอิสระต่อกัน โดยพิจารณาจากชื่อเรื่อง บทคัดย่อ และบทความฉบับเต็มตามเกณฑ์ที่กำหนด ในกรณีที่มีความเห็นไม่ตรงกัน จะปรึกษาศูนย์วิจัยคนที่ 3 เพื่อหาข้อสรุป



ร่วมกัน จากนั้นจึงสกัดข้อมูลสำคัญให้อยู่ในรูปแบบเดียวกัน ประกอบด้วยข้อมูลทั่วไปของการศึกษา ได้แก่ ชื่อผู้วิจัย ปีที่ตีพิมพ์ ประเทศที่ศึกษา รูปแบบการวิจัย จำนวนและลักษณะของกลุ่มตัวอย่าง รายละเอียดของวิธีการศึกษา ระยะเวลาติดตาม และผลลัพธ์ที่สนใจ เช่น ระดับความดันโลหิต ระดับไขมันในเลือด คุณภาพชีวิต การเสียชีวิต และการกลับเป็นซ้ำของโรคหลอดเลือดหัวใจ

คุณภาพของงานวิจัยที่ผ่านการคัดเลือกทั้งหมดประเมินโดยใช้ AMSTAR-2 (Shea et al., 2017) ซึ่งสามารถประเมินงานวิจัยได้ทั้งรูปแบบ Systematic review หรือ Systematic review and meta-analysis ของงานวิจัยรูปแบบ RCTs และ non-RCTs ประกอบด้วย ข้อคำถามทั้งหมด 16 ข้อ และกำหนดให้ข้อ 2, 4, 7, 9, 11, 13 และ 15 เป็นเกณฑ์สำคัญ (critical domains) โดยผลการประเมินแบ่งออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ คุณภาพสูง (high) คุณภาพปานกลาง (moderate) คุณภาพต่ำ (low) และคุณภาพต่ำมาก (critically low)

การประเมินความซ้ำซ้อนของงานวิจัยต้นฉบับระหว่าง systematic reviews ด้วยค่า Corrected Covered Area (CCA) เพื่อพิจารณาระดับการอ้างอิงงานวิจัยต้นฉบับซ้ำกันระหว่างบทความทบทวน โดยคำนวณจาก citation matrix ตามสูตร

$$CCA = \frac{N - r}{(r \times c) - r}$$

เมื่อ N คือจำนวนครั้งทั้งหมดของการอ้างอิงงานวิจัยต้นฉบับ r คือจำนวนงานวิจัยต้นฉบับที่ไม่ซ้ำกัน และ c คือจำนวน systematic reviews ที่นำมาวิเคราะห์ เกณฑ์การแปลผล ได้แก่ 0–5% = slight overlap, 6–10% = moderate overlap, 11–15% = high overlap และ >15% = very high overlap ทั้งนี้ หากพบความซ้ำซ้อนในระดับสูงหรือสูงมาก จะคัดเลือก systematic review ที่มีคุณภาพสูงกว่า ครอบคลุมกว่า หรือใหม่กว่า เป็นแหล่งข้อมูลหลักในการสังเคราะห์ผล

ผลการศึกษา

จากการสืบค้นฐานข้อมูล พบบงานวิจัยทั้งหมด 3,579 เรื่อง หลังตัดบทความซ้ำออก 1,269 เรื่อง คงเหลือ 2,310 เรื่อง สำหรับการคัดเลือกจากชื่อเรื่องและบทคัดย่อ มีการคัดออก 2,250 เรื่อง เหลือบทความฉบับเต็ม 60 เรื่องเพื่อประเมินตามเกณฑ์การคัดเลือก สุดท้ายมีงานวิจัยที่ผ่านเกณฑ์และนำมาวิเคราะห์จำนวน 12 เรื่อง (ภาพที่ 1) งานวิจัยที่ผ่านการคัดเลือกสามารถจำแนกตามรูปแบบการออกกำลังกายได้ 3 ประเภท ได้แก่ โยคะ (yoga) จำนวน 3 เรื่อง ไทเก๊ก (tai chi) จำนวน 8 เรื่อง และ ปาตวันจิน (baduanjin) จำนวน 1 เรื่อง (ตารางที่ 1) ในจำนวนนี้เป็นงานวิจัยประเภท systematic review with meta-analysis จำนวน 8 เรื่อง (Wang et al., 2016; Liu et al., 2018; Bruce et al., 2021; Li et al., 2021; Wang & Xu, 2022; Wu et al., 2020; Taylor-Piliae et al., 2020; Yang et al., 2022) และ systematic review จำนวน 4 เรื่อง (Yeh et al., 2009; Cramer et al., 2015; Ng et al., 2012; Nery et al., 2014) สำหรับการประเมินคุณภาพด้วย AMSTAR-2 พบว่า งานวิจัยมีคุณภาพระดับสูง 5 เรื่อง ระดับปานกลาง

2 เรื่อง ระดับต่ำ 3 เรื่อง และระดับต่ำมาก 2 เรื่อง (ภาพที่ 2)

1) การป้องกันทุติยภูมิด้วยการออกกำลังกายรูปแบบโยคะ

พบงานวิจัยจำนวน 3 เรื่อง ตีพิมพ์ระหว่าง ค.ศ. 2015–2021 โดยทบทวนงานวิจัยต้นฉบับประเภท randomized controlled trials ทั้งหมด การวิเคราะห์ความซ้ำซ้อนของงานวิจัยต้นฉบับระหว่าง systematic reviews ด้วยค่า Corrected Covered Area (CCA) เท่ากับร้อยละ 31.8 ซึ่งจัดอยู่ในระดับ สูงมาก จึงมีการคัดเลือกแหล่งข้อมูลหลักตามลำดับความสำคัญของคุณภาพและความครอบคลุมของข้อมูล โดยเลือกงานของ Li et al. (2020) เป็นแหล่งข้อมูลหลัก เนื่องจากมีข้อมูลครอบคลุมและมีคุณภาพสูงกว่างานวิจัยอื่นที่ซ้ำซ้อนกัน ลักษณะของงานวิจัยต้นฉบับส่วนใหญ่ดำเนินการในประเทศอินเดีย ระยะเวลาการฝึกและติดตามผลอยู่ระหว่าง 3–12 เดือน โปรแกรมโยคะที่ศึกษาโดยมากไม่ได้ระบุประเภทอย่างชัดเจน แต่ครอบคลุมองค์ประกอบหลัก ได้แก่ การฝึกท่าทาง (postures) การฝึกการหายใจ (breathing) และการผ่อนคลายหรือทำสมาธิ ความถี่ของการฝึกอยู่ระหว่าง 30–75 นาทีต่อครั้ง สัปดาห์ละ 1–14 ครั้ง ขณะที่กลุ่มควบคุมได้รับการดูแลตามปกติ ผลการศึกษาพบว่า โยคะให้ผลดีกว่าการดูแลตามปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในหลายด้าน ได้แก่ คุณภาพชีวิต (SMD = 0.07; 95% CI: 0.01–0.14, P = 0.02) ความดันโลหิต systolic (SBP)) SMD = -3.46, 95% CI: -4.70, -2.23, P < 0.01(ความดันโลหิต diastolic (DBP)) SMD = -1.59, 95% CI: -2.83, -0.34, P=0.01(ระดับไตรกลีเซอไรด์ (TG)) SMD = -0.55, 95% CI: -0.99, -0.10, P = 0.02(และ ระดับ HDL) SMD= 0.63, 95% CI: 0.11, 1.14, P = 0.02(อย่างไรก็ตามไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในผลลัพธ์ด้านการเสียชีวิตโดยรวม เหตุการณ์หัวใจและหลอดเลือดรวม ระดับไขมันรวม และระดับ LDL (ตารางที่ 2)

2) การป้องกันทุติยภูมิด้วยการออกกำลังกายรูปแบบไทเก็ก

พบงานวิจัยจำนวน 8 เรื่อง ตีพิมพ์ระหว่าง ค.ศ. 2009–2022 ครอบคลุมงานวิจัยต้นฉบับประเภท randomized controlled trials, clinical controlled trials และ non-controlled trials การวิเคราะห์ความซ้ำซ้อนของงานวิจัยต้นฉบับด้วยค่า CCA เท่ากับร้อยละ 11.11 ซึ่งจัดอยู่ในระดับสูง จึงเลือกงานของ Yang et al. (2022) เป็นแหล่งข้อมูลหลัก เนื่องจากเป็นงานที่ตีพิมพ์ล่าสุดและมีคุณภาพระดับสูง พร้อมใช้ข้อมูลจาก Wu et al. (2020), Wang et al. (2016) และ Ng et al. (2012) เพื่อเพิ่มความครอบคลุมของผลลัพธ์ งานวิจัยต้นฉบับส่วนใหญ่ดำเนินการในประเทศจีน รองลงมาคือ ประเทศไต้หวัน และประเทศอื่นในเอเชีย ระยะเวลาการฝึกและติดตามผลอยู่ระหว่าง 6 สัปดาห์ถึง 12 เดือน รูปแบบไทเก็กที่ศึกษามีความหลากหลาย โดยพบว่า Yang style เป็นรูปแบบที่ใช้บ่อยที่สุด รองลงมาคือ Chen 42 forms และ Tai Chi's waving hands ความถี่ของการฝึกอยู่ระหว่าง 30–90 นาทีต่อครั้ง สัปดาห์ละ 1–14 ครั้ง โดยส่วนใหญ่ฝึกครั้งละ 30–60 นาที สัปดาห์ละ 1, 3 หรือ 5 ครั้ง กลุ่มควบคุมได้รับการดูแลตามปกติ เช่น การให้คำแนะนำด้านพฤติกรรมสุขภาพ การช้ยา หรือการออกกำลังกายรูปแบบอื่น เช่น การเดินหรือการวิ่ง ผลการศึกษาพบว่าไทเก็กช่วยเพิ่มสมรรถภาพทางกายจากการทดสอบ 6-minute walk test (6MWT) (SMD = 1.30; 95% CI: 0.50-2.11, P = 0.002) และค่าการบีบตัวของหัวใจห้องล่างซ้าย (LVEF) ได้ดีกว่าการดูแลตามปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (SMD=1; 95% CI: 0.43-1.57, P = 0.002) นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มให้ผลดีต่อ Peak VO₂, peak work rate, คุณภาพชีวิต, ระดับความเครียด, ความวิตกกังวล, ความดันโลหิต, ระดับไขมันในเลือด, baroreflex sensitivity และ อัตราการเต้นของหัวใจ อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ด้าน SOC-13 ไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม ส่วนผลลัพธ์ด้าน heart rate variability ยังมีความไม่สอดคล้องกันระหว่างการศึกษา (ตารางที่ 3)

3) การป้องกันทุติยภูมิด้วยปาดัวนจีน

พบบงานวิจัยจำนวน 1 เรื่อง คือ systematic review with meta-analysis ที่พิมพ์ในปี ค.ศ. 2022 ซึ่งรวบรวม randomized controlled trials จำนวน 12 เรื่อง ตีพิมพ์ระหว่าง ค.ศ. 2016–2021 ผู้เข้าร่วมรวม 928 คน และดำเนินการศึกษาในประเทศจีนทั้งหมด เนื่องจากมี systematic review เพียง 1 เรื่อง จึงไม่ได้วิเคราะห์ความซ้ำซ้อนของงานวิจัยต้นฉบับ ระยะเวลาการติดตามผลอยู่ระหว่าง 2 สัปดาห์ถึง 6 เดือน โดยส่วนใหญ่ติดตามที่ 3 เดือน กลุ่มทดลองส่วนใหญ่ได้รับการฝึกปาด่วนจีนเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามมีบางการศึกษาที่ให้ปาด่วนจีนร่วมกับการออกกำลังกายชนิดอื่น เช่น aerobic training, aerobic walking training หรือ low-intensity aerobic exercise ร่วมกับ resistance exercise ความถี่ของการฝึกอยู่ระหว่าง 15–120 นาทีต่อวัน สัปดาห์ละ 3–7 วัน โดยส่วนใหญ่ฝึกครั้งละ 30 นาที สัปดาห์ละ 5–7 วัน กลุ่มควบคุมได้รับการดูแลตามปกติและบางการศึกษามีการแนะนำให้ออกกำลังกายเพิ่มเติม ผลการศึกษาพบว่าปาด่วนจีนให้ผลดีกว่าการดูแลตามปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในด้านสมรรถภาพทางกายจากการทดสอบ 6MWT)MD = 40.14, 95% CI: 8.45 –71 .83, P = 0.01(, LVEF)MD = 3.90, 95% CI: 2.40 –5 .40, P < 0.01(, Peak VO₂)MD = 0.91, 95% CI: 0.52 –1 .29, P < 0.01(, O₂ pulse)MD = 4.26, 95% CI: 2.49 –6 .04, P < 0.01(และ METs)MD = 0.80, 95% CI: 0.54 –1 .05, P < 0.01((ตารางที่ 4)

อภิปรายผลการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบที่สังเคราะห์หลักฐานจาก systematic reviews และ meta-analyses เกี่ยวกับการออกกำลังกายที่เน้นความยืดหยุ่นและการทรงตัวเพื่อการป้องกันหัตถ์ในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจ โดยผลการศึกษาชี้ว่า โยคะ ไทเก็ก และปาด่วนจีน มีแนวโน้มให้ประโยชน์ต่อผลลัพธ์สำคัญบางด้าน โดยเฉพาะผลต่อสมรรถภาพทางกาย การทำงานของหัวใจ ความดันโลหิต ระดับไขมันบางตัว และคุณภาพชีวิต เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม อย่างไรก็ตามขนาดของผลลัพธ์ในบางด้านยังอยู่ในระดับไม่มาก และยังไม่เพียงพอที่จะสะท้อนผลต่อเหตุการณ์ทางคลินิกที่สำคัญ เช่น การเสียชีวิตหรือการเกิดเหตุการณ์หัวใจและหลอดเลือดรวม

สำหรับโยคะ จากหลักฐานพบว่าท่าออกกำลังกายรูปแบบโยคะ มีการกำหนดระยะเวลาการฝึกครั้งละประมาณ 60-75 นาที ความถี่ 2–7 วันต่อสัปดาห์ และมีระยะเวลาการฝึกและติดตามผลอยู่ระหว่าง 3–12 เดือน โดยส่วนใหญ่มีการติดตามผลที่ระยะเวลา 12 เดือน ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลชี้ให้เห็นว่าการฝึกโยคะสัปดาห์ละ 2–3 ครั้ง ครั้งละ 45–60 นาที โดยประกอบด้วยท่าทางทางกาย (postures) การควบคุมลมหายใจ (breathing) และการผ่อนคลายการทำสมาธิ/ (meditation/relaxation) เพียงพอที่จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สามารถวัดได้ในด้านสมรรถภาพทางกาย ความยืดหยุ่น คุณภาพการนอนหลับ การลดความเครียด เป็นต้น อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยหลายฉบับที่ศึกษาประโยชน์ด้านสุขภาพของโยคะ โดยแนะนำให้ฝึก 5–7 วันต่อสัปดาห์ และมีระยะเวลาเฉลี่ย 60 นาทีต่อครั้ง (Manjunath & Krishnamurthy, 2025) จากผลการศึกษาพบว่าโยคะสามารถลดความดันโลหิต SBP และ DBP ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งอาจอธิบายได้จากกลไกของการเพิ่มการทำงานของระบบประสาทพาราซิมพาเทติก การลดการกระตุ้น hypothalamic–pituitary–adrenal axis และการลด oxidative stress นอกจากนี้ยังพบผลดีต่อระดับ TG, HDL และคุณภาพชีวิต สอดคล้องกับงานวิจัยหลักฐานก่อนหน้านี้ (Murugesan, 2024) อย่างไรก็ตามแม้ผลลัพธ์

ดังกล่าวจะแสดงถึงประโยชน์ต่อปัจจัยเสี่ยงทางหัวใจและหลอดเลือด แต่ขนาดของการเปลี่ยนแปลงยังค่อนข้างน้อย เช่น การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพชีวิตมีค่าเฉลี่ยเพียงเล็กน้อย และไม่พบความแตกต่างในผลลัพธ์ทางคลินิกสำคัญ ได้แก่ การเสียชีวิตโดยรวม เหตุการณ์หัวใจและหลอดเลือดรวม แม้จะมีการติดตามผลลัพธ์ที่ระยะเวลา 12 เดือน ดังนั้นควรมีการติดตามผลลัพธ์ที่มากกว่า 12 เดือน เพื่อมีข้อมูลที่เพียงพอที่จะสรุปประสิทธิผลต่อผลลัพธ์สำคัญดังกล่าว รวมถึงไม่พบความแตกต่างของระดับ TC และ LDL ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kalra et al. (2022) ดังนั้นประสิทธิผลของโยคะในบริบทนี้อาจเด่นชัดในระดับของ risk factor modification มากกว่าการลดผลลัพธ์ทางคลินิกที่สำคัญ

สำหรับไทเก็ก จากหลักฐานพบว่าการออกกำลังกายรูปแบบไทเก็ก ส่วนใหญ่มักกำหนดระยะเวลาการฝึกครั้งละประมาณ 30-60 นาที สัปดาห์ละ 1, 3 หรือ 5 ครั้ง โดยส่วนใหญ่มีการติดตามผลที่ระยะเวลา 6 เดือนขึ้นไป ถึง 12 เดือน โดยพบว่า Yang style เป็นรูปแบบที่นำมาใช้บ่อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่รายงานไว้ในผู้ป่วยกลุ่มโรคระบบหัวใจและหลอดเลือดสมอง (Circulatory System Diseases) มีการใช้ Yang style สูงถึง 77.3% โดยแนะนำให้ฝึกสัปดาห์ละ 2-3 ครั้ง ครั้งละ 60 นาที เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้รูปแบบ 8-form Yang style และ 108-form Yang style ในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจ ซึ่งพบว่าสามารถเพิ่มความไวของ baroreflex sensitivity รวมทั้งเพิ่มค่า rate-pressure product และ RPP reserve ได้ (Huang et al., 2021) จากผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นหลักฐานสนับสนุนผลที่ดีค่อนข้างชัดเจนในด้านสมรรถภาพทางกาย และการทำงานของหัวใจโดยเฉพาะการเพิ่มระยะทางในการทดสอบ 6MWT และการเพิ่มค่า LVEF นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มให้ผลดีต่อความดันโลหิต ระดับไขมัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chatzi et al. (2026) ที่ทำการศึกษาในผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงจะเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจ นอกจากนั้นไทเก็กยังเพิ่มความไวต่อ Baroreflex sensitivity ซึ่งผลลัพธ์ที่กล่าวมาเกิดจากกลไกการกระตุ้นระบบประสาท parasympathetic vagal tone (Sato et al., 2010) ทำให้เกิดสมดุลของระบบประสาทอัตโนมัติมากขึ้น ประกอบกับการเล่นไทเก็กเป็นการเคลื่อนไหวร่างกาย ที่ต้องฝึกให้มีการหายใจเข้าช้า ๆ ลึก ๆ และมีสมาธิ รับรู้การเคลื่อนไหวของร่างกาย ส่งผลให้อัตราการเต้นของหัวใจลดลง และลดความเครียด ความวิตกกังวลได้ สำหรับผลลัพธ์คุณภาพชีวิต ผลการทดสอบสมรรถภาพร่างกายจากการทดสอบ 6MWT และค่า LVEF ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับงานวิจัย Zhao et al. (2026) ที่ทำการศึกษาการเล่นไทเก็กในผู้ป่วยโรคหัวใจล้มเหลว พบว่าการเล่นไทเก็กสามารถเพิ่มคุณภาพชีวิตหลังการฝึกผ่านไปแล้ว 3 เดือน โดยผลลัพธ์จะเพิ่มมากขึ้นหลัง 6 เดือน และการเพิ่มขึ้นของค่า LVEF เกิดจากการกระตุ้นระบบประสาท parasympathetic ซึ่งเชื่อว่าจะส่งผลให้การไหลเวียนของหลอดเลือดหัวใจเพิ่มขึ้น เพิ่มปริมาณเลือดที่ถูกสูบฉีดออกจากหัวใจในการบีบตัวหนึ่งครั้ง (stroke volume) และเพิ่มปริมาณเลือดที่หัวใจสูบฉีดต่อนาที (cardiac output) ส่งผลให้ค่า LVEF ดีขึ้น (Chow et al., 2023) อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ด้าน heart rate variability ยังพบความไม่สอดคล้องกันระหว่างการฝึก จากงานวิจัยของ Luo B et al. (2025) ที่ทำการศึกษาการเล่นไทเก็กในผู้ป่วยที่เป็นโรคหลอดเลือดสมอง พบว่าสามารถลดอาการวิตกกังวล และภาวะซึมเศร้าได้ แต่ยังไม่พบความแตกต่างของผลลัพธ์ด้านระดับความดันโลหิตและระดับไขมัน

สำหรับปาดัวนจีน จากหลักฐานพบว่าการออกกำลังกายรูปแบบปาดัวนจีน ส่วนใหญ่มักกำหนดระยะเวลาการฝึกครั้งละประมาณ 30 นาที ความถี่ 5-7 วันต่อสัปดาห์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทาง ESC Guidelines

ปี ค.ศ.2024 (Vrints et al., 2024) ที่แนะนำให้ผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจมีกิจกรรมทางกายระดับความเข้มข้นปานกลางอย่างน้อย 150–300 นาทีต่อสัปดาห์ หรือกิจกรรมทางกายระดับความเข้มข้นสูงอย่างน้อย 75–150 นาทีต่อสัปดาห์ โดยส่วนตัวจีนจัดเป็นการออกกำลังกายระดับความเข้มข้นปานกลาง)Wang & Xu, 2022) นอกจากนี้ระยะเวลาการติดตามผลลัพธ์ของการศึกษาอยู่ระหว่าง 2 สัปดาห์ถึง 6 เดือน โดยส่วนใหญ่มีการติดตามผลที่ระยะเวลา 3 เดือน ซึ่งถือเป็นการประเมินผลลัพธ์ในระยะสั้น อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาพบแนวโน้มประสิทธิผลที่น่าสนใจ โดยเฉพาะด้านการเพิ่มสมรรถภาพทางกายและตัวชี้วัดการทำงานของหัวใจ เช่น 6MWT, LVEF, Peak VO₂, O₂ pulse และ METs แม้ว่าผลลัพธ์ดังกล่าวจะสะท้อนให้เห็นว่าผู้ป่วยจีนอาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการฟื้นฟูสมรรถภาพหัวใจในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจ แต่หลักฐานเกี่ยวกับผลลัพธ์ระยะยาวยังมีจำกัด จึงยังไม่เพียงพอที่จะสรุปประสิทธิผลต่อผลลัพธ์สำคัญทางคลินิกบางประการ เช่น อัตราการกลับเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล หรืออัตราการเสียชีวิต นอกจากนี้ความน่าเชื่อถือของข้อมูลยังมีข้อจำกัด เนื่องจากหลักฐานทั้งหมดมาจากการศึกษาในประเทศจีน มีขนาดกลุ่มตัวอย่างรวมค่อนข้างน้อย และมีความแตกต่างระหว่างการศึกษานี้ในหลายด้าน รวมถึงรูปแบบการออกกำลังกาย ความถี่ของการฝึก และระยะเวลาการติดตามผลลัพธ์ ซึ่งสะท้อนถึงข้อจำกัดด้านความเข้มงวดของระเบียบวิธีวิจัย

ในงานศึกษาที่มีอยู่ปัจจุบันเมื่อพิจารณาโดยรวม ผลการศึกษานี้สนับสนุนว่าการออกกำลังกายที่เน้นความยืดหยุ่นและการทรงตัวอาจเป็นทางเลือกเสริมหรือส่วนหนึ่งของโปรแกรมป้องกันทุติยภูมิสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจ โดยเฉพาะในผู้ป่วยที่ไม่สามารถเข้าร่วมการออกกำลังกายแบบเข้มข้นหรือโปรแกรมฟื้นฟูหัวใจแบบมาตรฐานได้ อย่างไรก็ตามการแปลผลควรคำนึงถึงคุณภาพของหลักฐาน ความซ้ำซ้อนระหว่าง systematic reviews และความหลากหลายของรูปแบบการแทรกแซงในแต่ละการศึกษา

ข้อจำกัดของการศึกษา

การศึกษานี้มีข้อจำกัดหลายประการ ประการแรก คัดเลือกเฉพาะงานวิจัยที่ตีพิมพ์เป็นภาษาอังกฤษ จึงอาจทำให้ไม่ครอบคลุมหลักฐานที่ตีพิมพ์ในภาษาอื่นและเกิด selection bias ได้ ประการที่สอง การแทรกแซงที่นำมาประเมินมีความหลากหลายทั้งชนิดของการออกกำลังกาย รูปแบบการฝึก ความถี่ ระยะเวลาการฝึก และช่วงเวลาการติดตามผล ส่งผลให้การเปรียบเทียบและการสังเคราะห์ผลลัพธ์ทำได้ยาก และอาจเป็นสาเหตุของความแตกต่างระหว่างงานวิจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาได้ ประการที่สาม systematic reviews หลายฉบับมีความซ้ำซ้อนของงานวิจัยต้นฉบับในระดับสูง จึงอาจส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของหลักฐาน แม้ว่าการศึกษานี้จะใช้ค่า CCA และคัดเลือกแหล่งข้อมูลหลักเพื่อลดผลกระทบดังกล่าวแล้วก็ตาม ประการที่สี่ งานวิจัยต้นฉบับส่วนใหญ่ดำเนินการในประเทศอินเดียและจีน จึงอาจจำกัดความสามารถในการประยุกต์ใช้ผลการศึกษากับประชากรในบริบทอื่น

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

งานวิจัยในอนาคตควรออกแบบการศึกษาให้มีความจำเพาะของโปรแกรมออกกำลังกายมากขึ้น ทั้งในด้านรูปแบบ ความถี่ ระยะเวลา และองค์ประกอบของการฝึก เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการศึกษได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ ควรทำการศึกษารูปแบบ randomized controlled trials ที่มีคุณภาพสูง



และมีการติดตามผลระยะยาวมากขึ้น โดยเฉพาะผลลัพธ์ทางคลินิกสำคัญ เช่น การเสียชีวิต การกลับเข้าโรงพยาบาล และเหตุการณ์หัวใจและหลอดเลือด รวมถึงควมมีการศึกษาในประชากรที่หลากหลายมากขึ้นนอกบริบทของเอเชีย เพื่อเพิ่มความสามารถในการประยุกต์ใช้ผลการศึกษาในวงกว้าง

บทสรุป

การออกกำลังกายที่เน้นความยืดหยุ่นและการทรงตัว ได้แก่ โยคะ ไทเก็ก และปาดัวนจิน แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ในการป้องกันทุติยภูมิในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจ โดยเฉพาะด้านสมรรถภาพทางกาย การทำงานของหัวใจ ความดันโลหิต ระดับไขมันบางตัว และคุณภาพชีวิต เมื่อเทียบกับการดูแลตามปกติ อย่างไรก็ตาม หลักฐานเชิงประจักษ์ในด้านประสิทธิผลของการออกกำลังกายแบบนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณภาพงานวิจัยที่รวบรวมได้ ความแตกต่างกันของลักษณะการออกกำลังกาย



เอกสารอ้างอิง

- Bruce, C., Achan, V., & Rathore, S. (2021). Yoga-based cardiac rehabilitation: Current perspectives from randomized controlled trials in coronary artery disease. *Vascular Health and Risk Management*, 17, 779–789.
- Chatzi, C., Markozannes, G., Ntzani, E. E., Rizzo, M., Basios, A., Kalampoki, A., et al. (2026). Effect of different types of exercise interventions on cardiometabolic risk factors: An umbrella review of systematic reviews and meta-analyses. *Journal of Diabetes and Its Complications*, 40(5), 109305.
- Chinphan, S., Sirisophon, N., Onsiri, S., & Wattanaburanon, A. (2019). Factors correlated with instant stenosis in coronary heart disease patients. *Journal of The Royal Thai Army Nurses*, 20(3), 218225.
- Chow, S. L., Bozkurt, B., Baker, W. L., Bleske, B. E., Breathett, K., Fonarow, G. C., et al. (2023). Complementary and alternative medicines in the management of heart failure: A scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 147, e4–e30.
- Cramer, H., Lauche, R., Haller, H., Dobos, G., & Michalsen, A. (2015). A systematic review of yoga for heart disease. *European Journal of Preventive Cardiology*, 22(3), 284–295.
- Huang J., Wang D., & Wang J. (2021). *Clinical evidence of Tai Chi exercise prescriptions: A systematic review. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2021, Article 5558805.
- Kalra, S., Miraj, M., Ajmera, P., Shaik, R. A., Seyam, M. K., Shawky, G. M., Alasiry, S. M., et al. (2022). Effects of yogic interventions on patients diagnosed with cardiac diseases: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, 9, 942740.
- Law, M. R., Watt, H. C., & Wald, N. J. (2002). The underlying risk of death after myocardial infarction in the absence of treatment. *Archives of Internal Medicine*, 162(21), 2405–2410.
- Li, J., Gong, X., Hao, X., Kantas, D., Mohamed, E. A., Zheng, X., et al. (2021). Yoga for secondary prevention of coronary heart disease: A systematic review and meta-analysis. *Complementary Therapies in Medicine*, 57, 102643.
- Liu, T., Chan, A. W., Liu, Y. H., & Taylor-Piliae, R. E. (2018). Effects of Tai Chi-based cardiac rehabilitation on aerobic endurance, psychosocial well-being, and cardiovascular risk reduction



among

patients with coronary heart disease: A systematic review and meta-analysis. *European Journal*

of Cardiovascular Nursing, 17(4), 368–383.

Luo, B., Zhang, L., Bai, Y., Zhang, F., & Liu, Y. (2025). Therapeutic effect of traditional Chinese exercise

in stroke patients: An umbrella review of systematic reviews and meta-analyses of clinical trials.

European Journal of Integrative Medicine, 74, 102438.

Manjunath., & Krishnamurthy N. (2025). Frequency and dosage of yoga practice for maintaining optimal

physical and mental health. *International Journal of Yoga*, 18(3), 233–234.

Matchim, Y., & Kritpracha, J. (2015). Integrating eastern wisdom modality in care for patients with myocardial infarction. Retrieved January 25, 2024, from

[https://www.researchgate.net/profile/Yaowarat-](https://www.researchgate.net/profile/Yaowarat-Matchim2/publication/296596644_Integrating_Eastern_wisdom_modality_in_care_for_patients_with_myocardial_infarction)

Matchim2/publication/296596644_Integrating_

Eastern_wisdom_modality_in_care_for_patients_with_myocardial_infarction

Murugesan, P. (2024). Yoga and cardiovascular diseases – A mechanistic review. *International Journal of Yoga*, 17(2), 83–92.

Namiuchi, S., Tanita, A., Ushigome, R., Noda, K., & Takii, T. (2021). Higher recurrence rate of acute coronary syndrome in patients with multiple-time myocardial infarction. *International Heart Journal*, 62(3), 493–498.

Nery, R. M., Zanini, M., Ferrari, J. N., Silva, C. A., Farias, L. F., Comel, J. C., et al. (2014). Tai Chi Chuan for cardiac rehabilitation in patients with coronary arterial disease. *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, 102(6), 588–592.

Ng, S. M., Wong, C., Ho, R. T., Ziea, T. C., He, J., Wong, V. C., & Chan, C. L. (2012). Tai chi exercise for

patients with heart disease: A systematic review of controlled clinical trials. *Alternative Therapies*

in Health and Medicine, 18(3), 16–22.

Pollock, M. L., Franklin, B. A., Balady, G. J., Chaitman, B. L., Fleg, J. L., Fletcher, B. J., et al. (2000).

Resistance exercise in individuals with and without cardiovascular disease: Benefits, rationale, safety, and prescription. *Circulation*, 101(7), 828–833.

Sato, S., Makita, S., Uchida, R., Ishihara, S., & Masuda, M. (2010). Effect of Tai Chi training on



baroreflex sensitivity and heart rate variability in patients with coronary heart disease.

International Heart Journal, 51(4), 238–241.

Taylor-Piliae, R. E., & Finley, B. A. (2020). Tai chi exercise for psychological well-being among adults with

cardiovascular disease: A systematic review and meta-analysis. *European Journal of Cardiovascular Nursing*, 19(7), 580–591.

The Health Policy Partnership. (2021). Secondary prevention of heart attack and stroke in Europe: Consensus report. Retrieved April 28, 2022, from

<https://www.healthpolicypartnership.com/app/uploads/Secondary-prevention-of-heart-attack-and-stroke-in-Europe.pdf>

Vrints, C., Andreotti, F., Koskinas, K. C., et al. (2024). 2024 ESC guidelines for the management of chronic coronary syndromes. *Giornale Italiano di Cardiologia*, 25(12 Suppl 1), e1–e132.

Wang, D., & Xu, J. (2022). Updated meta-analysis assessing effects of Baduanjin on cardiopulmonary

functions of patients with coronary heart disease. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2022, Article 3913082

Wang, X. Q., Pi, Y. L., Chen, P. J., Liu, Y., Wang, R., Li, X., et al. (2016). Traditional Chinese exercise for cardiovascular diseases: Systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of the American Heart Association*, 5(3), e002562.

Wu, B., Ding, Y., Zhong, B., Jin, X., Cao, Y., & Xu, D. (2020). Intervention treatment for myocardial infarction with tai chi: A systematic review and meta-analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 101(12), 2206–2218.

Yang, G., Li, W., Klupp, N., Cao, H., Liu, J., Bensoussan, A., et al. (2022). Does tai chi improve psychological well-being and quality of life in patients with cardiovascular disease and/or cardiovascular risk factors? A systematic review. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 22(1), 3.

Yeh, G. Y., Wang, C., Wayne, P. M., & Phillips, R. (2009). Tai chi exercise for patients with cardiovascular conditions and risk factors: A systematic review. *Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation and Prevention*, 29(3), 152–160.

Zhao, X., Zou, R., Miao, H., Chang, X., Chinda, K., Chen, F., et al. (2026). The efficacy of traditional Chinese exercises in patients with chronic heart failure: An umbrella review and meta-analysis. *Reviews in Cardiovascular Medicine*, 27(3), 46055.



ตารางที่ 1 ลักษณะของงานวิจัยที่ถูกคัดเลือก

ชื่อผู้วิจัย (ปี)	รูปแบบ งานวิจัย	ประเทศ	ลักษณะ ประชากร	กลุ่มทดลอง	กลุ่มควบคุม	ระยะเวลา การฝึก/ ติดตามผล	ผลลัพธ์ที่ศึกษา
Cramer et al. (2015)	SR(4 RCTs)	เยอรมนีทำการศึกษา ที่อินเดีย	โรค CHD 510 คน, ช่วง อายุเฉลี่ย 51.5-58.75 ปี (ค่ามัธยฐาน 57.75 ปี), เป็นผู้หญิง 0-15.3%0 (ค่ามัธยฐาน 7.7%), - ไม่ระบุเชื้อชาติที่ ทำการศึกษา	การเล่นโยคะ - ไม่จำกัดประเภทของโยคะ (ครอบคลุมรูปแบบการฝึก ท่าทาง (postures)การฝึก หายใจ (breathing)และการ ผ่อนคลาย (relaxation) ความถี่: 35-90 นาทีต่อวัน (ค่ามัธยฐาน 50 นาที) 5-7 วัน ต่อสัปดาห์ - การดูแลในรูปแบบปกติ - มี Co-intervention ร่วมได้	การดูแลในรูปแบบปกติ เช่น การควบคุมการทาน อาหารการออกกำลังกาย รูปแบบmoderate aerobic - มี Co-intervention ร่วมได้ เช่น การ รับประทานยา	สัปดาห์-18 เดือน/ 14 สัปดาห์-18 เดือน (ค่ามัธยฐาน 6 เดือน)	- ระดับไขมันในเลือด - ระดับความดันโลหิต - อัตราการเต้นของหัวใจ - การเสียชีวิต - ความสามารถในการออกกำลังกาย - เหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ทาง หัวใจที่ไม่รุนแรง(Nonfatal cardiac event) - ความปลอดภัยของการเล่น โยคะ
Bruce et al. (2021)	SRMA (6 RCTs)	อังกฤษ (ทำการ ศึกษาที่อินเดีย 5 เรื่อง, อังกฤษ 1 เรื่อง)	ผู้ป่วยโรค -CHD (Stable CAD, ACS, CABG) จำนวน 4,494 คน	- Yoga-based cardiac rehabilitation - ไม่ได้ระบุความถี่ชัดเจน	-การดูแลในรูปแบบ มาตรฐานเช่น การให้ คำแนะนำในการดูแล สุขภาพหรือการดูแลที่ ครอบคลุมในโปรแกรม cardiac rehabilitation	3-/เดือน 12 3 สัปดาห์-2 1.เดือน 6	-ดัชนีมวลกาย - ระดับไขมันในเลือด - ระดับความดันโลหิต - ระดับน้ำตาลในเลือด - ระดับความเครียด (Patient- perceived stress levels) -LVEF (Left ventricular ejection fraction) -ความปลอดภัยของการเล่น โยคะ
Li et al.(2020)	SRMA (8 RCTs)	จีน(ทำการ ศึกษาที่อินเดีย 7 เรื่อง, อังกฤษ 1 เรื่อง)	ผู้ป่วยโรค -CHD (Stable CAD, Stable angina, MI, ACS, มีประวัติทำ CABG, PCI) จำนวน4,671 คน - อายุเฉลี่ย 51-60. ปี 7เป็นผู้ชาย 85.4%	- การเล่นโยคะ -ไม่ได้ระบุประเภทของ โยคะชัดเจน(ครอบคลุม รูปแบบการฝึกท่าทาง การ ฝึกหายใจ และการผ่อนคลาย ทำสมาธิ/ (relaxation/relaxation)) ความถี่: 30-75 นาทีต่อครั้ง (นาที 50 ค่ามัธยฐาน) 1-14ครั้ง ต่อสัปดาห์ - การดูแลในรูปแบบปกติ	-การดูแลในรูปแบบปกติ	3-12 เดือน/ 3-12 เดือน	-ระดับไขมันในเลือด - ระดับความดันโลหิต - การเสียชีวิตจากทุกสาเหตุ - คุณภาพชีวิต - Composite cardiovascular events -ความปลอดภัยของการเล่น โยคะ
Nery et al. (2013)	SR (3 RCTs)	บราซิล (ไม่ได้ระบุประเทศ ที่ทำการศึกษา)	- ผู้ป่วยอายุ > 18 ปี ที่เป็นโรค CAD จำนวน 176คน, เป็น ผู้ชาย 68. 75%	- การเล่นไทเก็ก ไม่ได้ระบุ ประเภท ความถี่: ไม่ได้ระบุ	- การดูแลในรูปแบบปกติ เช่น การให้คำแนะนำ การดูแลสุขภาพ เทคนิค การผ่อนคลาย หรือ การให้คำแนะนำการออก กำลังกาย	2-12 เดือน/ 2-12 เดือน	-ระดับความดันโลหิต - Baroreflex Sensitivity - อัตราการเต้นของหัวใจขณะ พัก (Resting heart rate) - ความแปรผันของอัตราการ เต้นหัวใจ (heart rate variability) - การทดสอบ chair stand test, one-leg stand test, 8-foot up-and-go test, step test test, sit and stand



ชื่อผู้วิจัย (ปี)	รูปแบบ งานวิจัย	ประเทศ	ลักษณะ ประชากร	กลุ่มทดลอง	กลุ่มควบคุม	ระยะเวลา การฝึก/ ติดตามผล	ผลลัพธ์ที่ศึกษา
Liu et al. (2018)	SRMA (2 RCTs, 11 CCTs)	ฮ่องกง (ทำการ ศึกษาที่จีน 6 เรื่อง, ได้เห็น 3 เรื่อง, ญี่ปุ่น, เกาหลี,บราซิล ,อเมริกา 1 เรื่อง)	- ผู้ป่วยโรค CHD (Angina, MI, มีประวัติทำ CABG, PCI) จำนวน 972 คน, เป็น ผู้หญิง <31 %, อายุเฉลี่ย ปี 64	-การเล่นไทเก็ก เช่น รูปแบบ standard protocol, 12 form, 24 form, 42 form chen, Yang, Yang ร่วมกับ Sun ซึ่งอาจจะมีการเล่น ไทเก็กเพียงชนิดเดียว หรือ การมี intervention อื่นๆ ร่วมด้วย ความถี่: 30-60 นาทีต่อครั้ง 1-7 วัน ต่อสัปดาห์	- การดูแลในรูปแบบปกติ เช่น การออกกำลังกาย การปรึกษาปัญหา สุขภาพกับผู้ดูแล	3-12 เดือน/ 3-12 เดือน	- สมรรถภาพในการออกกำลังกาย - VO2 max - คุณภาพชีวิต - ความวิตกกังวล - ภาวะซึมเศร้า - ระดับไขมันในเลือด - ระดับความดันโลหิต
Wu et al. (2020)	SRMA (7 RCTs)	จีน (ทำการ ศึกษาที่จีน)	- ผู้ป่วยโรค CHD (MI ทั้ง ST-segment elevation และ non-ST- segment elevation, มี ประวัติทำ PCI) จำนวน คน 615	- การเล่นไทเก็ก เช่น รูปแบบchen 42 ท่า, Tai chi's waving hand ความถี่: 30-60 นาทีต่อวัน 3-5 วัน ต่อสัปดาห์ - การดูแลในรูปแบบปกติ ร่วมด้วย เช่น การให้ คำแนะนำในการปรับ พฤติกรรม การทานยา หรือ การออกกำลังกายรูปแบบ อื่นๆ ร่วมด้วย เช่นการวิ่ง การเดิน	- การดูแลในรูปแบบปกติ เช่น การให้คำแนะนำใน การปรับพฤติกรรม การทานยา หรือการออก กำลังกายรูปแบบอื่นๆ ร่วมด้วย เช่นการวิ่ง การเดิน	6-11 เดือน/ 6-11 เดือน	- สมรรถภาพในการออกกำลังกาย - ค่า LVEF - คุณภาพชีวิต - ความสามารถในการปรับตัว ต่อความเครียด(sense of coherence sense of coherence-13)
Ng et al. (2012)	SR 2RCTs, 4 NRS,)	ฮ่องกง (ทำการการศึกษาที่ ได้เห็น 3 เรื่อง, ญี่ปุ่น,เกาหลี, เรื่อง อังกฤษ1)	ผู้ป่วยโรค -CHD 205 คน,	- การเล่นไทเก็ก เช่น รูปแบบYang, Wu, Yang และ Sun - การดูแลในรูปแบบปกติ เช่นการให้คำแนะนำใน การปรับพฤติกรรม ความถี่: 60-90 นาทีต่อวัน 1 วัน ต่อสัปดาห์	-การดูแลในรูปแบบปกติ	8สัปดาห์-1 ปี/ 8สัปดาห์-1 ปี	-ระดับความดันโลหิต - Baroreflex Sensitivity - ความแปรผันของอัตราการ เต้นหัวใจ - อัตราการเต้นของหัวใจ - Peak VO ₂ - คุณภาพชีวิต
Wang et al. (2022)	SRMA (12 RCTs)	จีน (ทำการ ศึกษาที่จีน)	ผู้ป่วยโรค ดังนี้ - ผู้ป่วยโรคCHD 232 คน, - ผู้ป่วยโรค CHD ที่ทำ PCI 415 คน - ผู้ป่วยโรค CHD และ CHF 139 คน - ผู้ป่วยโรค CHD ที่ทำ PCI หรือ CABG 58 คน - ผู้ป่วยโรคCHD ที่ทำ PTCA 84 คน รวมมีผู้ป่วยทั้งสิ้นจำนวน คน 928	-การเล่นปาตวันจีนเพียง อย่างเดียว หรือ การเล่นปาตวันจีน ร่วมกับการออกกำลังกาย ชนิดอื่น เช่นaerobic training, aerobic walking training, low intensity aerobic ร่วมกับ resistance exercise ความถี่: 15-60 นาทีต่อวัน 3-7 วัน ต่อสัปดาห์ - การดูแลในรูปแบบปกติ	-การดูแลในรูปแบบปกติ (แนะนำให้ออกกำลังกาย) ไม่ได้ระบุความถี่ หรือ การออกกำลังกาย ชนิดอื่น เช่น aerobic training , aerobic walking training, low intensity aerobic ร่วมกับ resistance exercise	ไม่ระบุ รายละเอียด/ -สัปดาห์ 26 เดือน	- การทดสอบ 6MWT - ค่า LVEF - Peak VO ₂ - O ₂ pulse - METs



ชื่อผู้วิจัย (ปี)	รูปแบบ งานวิจัย	ประเทศ	ลักษณะ ประชา กร	กลุ่มทดลอง	กลุ่มควบคุม	ระยะเวลา การฝึก/ ติดตามผล	ผลลัพธ์ที่ศึกษา
Taylor-Pillae et al. (2020)	SRMA (1 RCT, 1 QE)	สหรัฐ อเมริกา (ทำการ ศึกษาที่ เกาหลีใต้ 1 เรื่อง,เยอรมนี 1 เรื่อง)	- ผู้ป่วยโรคCHD 164 คน, อายุเฉลี่ย ปี 65,เป็น ผู้หญิง 37%	- การเล่นไทเก็ก เช่นรูปแบบ Yang และ Sun 19 ท่า หรือ ไม่ได้ระบุประเภท - การดูแลในรูปแบบปกติ เช่นการให้คำแนะนำในการ รับประทาน และการจัดการ ความเครียด ความถี่: 24 ครั้งภายใน 24 สัปดาห์ หรือ ไม่ได้ระบุ ประเภท	-การดูแลในรูปแบบปกติ	24- 52สัปดาห์/ ไม่ระบุรายละเอียด	-คุณภาพชีวิต - ความวิตกกังวล - ภาวะซึมเศร้า
Yang et al. (2022)	SRMA (8 RCTs)	ออสเตรเลีย	ผู้ป่วยอายุ≤40 ปี - โรค CHDคน 832	- การเล่นไทเก็ก เช่น รูปแบบChen 42 ท่า, Yang 24 ท่า, รูปแบบ ประยุกต์ 24 ท่า, Tai Chi "Cloud hands" ความถี่: 30-60 นาทีต่อครั้ง 3-14 ครั้งต่อสัปดาห์ - การดูแลในรูปแบบปกติ ร่วมด้วย เช่น การให้ คำแนะนำในการปรับพฤติกรรม การทานยา หรือ การออกกำลังกายรูปแบบ อื่นๆ ร่วมด้วย เช่นการวิ่ง การเดิน หรือการทำจิต บำบัด	-การดูแลในรูปแบบปกติ เช่น การให้คำแนะนำใน การปรับพฤติกรรม การทานยา หรือการออก กำลังกายรูปแบบอื่นๆ ร่วมด้วย เช่นการวิ่ง การเดิน หรือการทำจิต บำบัด	12-48 สัปดาห์/ ไม่ระบุรายละเอียด	-คุณภาพชีวิต - ความวิตกกังวล - ภาวะซึมเศร้า - ความเครียด
Yeh et al. (2009)	SR (1 RCTs, 2 NRS)	สหรัฐ อเมริกา (ทำการ ศึกษาที่อังกฤษ, ไต้หวัน, จีน อย่างละ 1 เรื่อง)	- ผู้ป่วยโรคCHD 170 คน,	- การเล่นไทเก็ก เช่น รูปแบบWu, Yang 24 ท่า ความถี่: ไม่ได้ระบุ	-การดูแลในรูปแบบปกติ	-สัปดาห์ 81 ปี/ ไม่ระบุรายละเอียด	-ระดับความดันโลหิต - สมรรถภาพในการออกกำลังกาย
Wang et al. (2016)	SRMA (6 RCTs)	จีน (ทำการศึกษา ที่จีน 4 เรื่อง, ญี่ปุ่น, อังกฤษ อย่างละ เรื่อง 1)	- ผู้ป่วยโรคCHD 419 คน	-การเล่นไทเก็ก ไม่ได้ระบุ ประเภท - การดูแลในรูปแบบปกติ ความถี่: 1-5 ครั้ง ต่อ สัปดาห์	-การดูแลในรูปแบบปกติ	8 สัปดาห์-1 ปี/ 8 สัปดาห์-1 ปี	-ระดับความดันโลหิต - ระดับไขมันในเลือด - อัตราการเต้นของหัวใจ - Peak VO ₂ - คุณภาพชีวิต



SR: Systematic review, SRMA: Systematic review with meta-analysis, RCT: Randomized controlled trial, CCT: Clinical controlled trial, NRS: Non controlled studies, CHD: Coronary heart disease, CAD: coronary artery disease, ACS: Acute coronary syndrome, MI: myocardial infraction, CHF: Chronic heart disease, PCI: Percutaneous coronary intervention, CABG: Coronary artery bypass grafting, PTCA: Percutaneous transluminal coronary angioplasty, QOL: Quality of life, LVEF: Left ventricular ejection fraction, HRV: Heart rate variability, 6MWT: 6-minute walk test, METs: Metabolic Equivalents, PeakVO₂: Peak Oxygen, O₂ pulse: Oxygen Pulse

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของการออกกำลังกายรูปแบบโยคะ

ชื่อผู้วิจัย (ปี)	รูปแบบงานวิจัย	ผลลัพธ์ที่ศึกษา												
		ระดับไขมัน TC	ระดับไขมัน LDL	ระดับไขมัน HDL	ระดับไขมัน TG	ระดับความดัน SBP	ระดับความดัน DBP	ระดับดัชนีมวลกาย	ระดับน้ำตาลในเลือด	LVEF	ระดับความเครียด	ความสามารรถในการออกกำลังกาย	การเสียชีวิต	คุณภาพชีวิต
Bruce et al. (2021)	SRMA (6 RCTs)		↔	NA	↔	↔	A					A		A
Cramer et al. (2015)	SR (4 RCTs)								A	A	A			
Li et al. (2020)	SRMA (8 RCTs)	↔	↔					A	A	A	A	A		*

*: กลุ่มควบคุมดีกว่ากลุ่มทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, ↑: กลุ่มควบคุมดีกว่ากลุ่มทดลอง, ↔: กลุ่มทดลองไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม แต่ดีขึ้นกว่าก่อนการทดลอง, NA: ไม่มีการศึกษา, SR: Systematic review, SRMA: Systematic review with meta-analysis, RCT: Randomized controlled trial, LVEF: Left ventricular ejection fraction, SBP: Systolic blood pressure, DBP: Diastolic blood pressure, TC: total cholesterol, TG: Triglyceride, LDL: Low density lipoprotein, HDL: High density lipoprotein



ตารางที่ 3 ผลการศึกษาของงานวิจัยการป้องกันทุติยภูมิด้วยการเล่นไทเก็ก

ชื่อผู้วิจัย (ปี)	รูปแบบ งานวิจัย	ผลลัพธ์ที่ศึกษา																		
		Peak VO2	Peak work rate	VO2 max	6MWT	Baroreflex Sensitivity	ระดับความดัน SBP	ระดับความดัน DBP	Heart rate	Heart rate variability	ระดับไขมัน TC	ระดับไขมัน LDL	ระดับไขมัน HDL	ระดับไขมัน TG	คุณภาพชีวิต	Anxiety	Depression	Stress	SOC-13	LVEF
LiuT (2018)	SRMA (2 RCTs, 11 CCTs)	NA	NA	*	NA	NA				N	↔	↔		↔				N	N	N
Nery RM (2013)	SR (3 RCTs)	NA	NA	NA	NA	↑		↑	↑		N	N	N	N	N	N	N	N		N
NgSM (2012)	SR (2 RCTs, 4 NRS,)	↑	↑	NA	NA	↑		↑	↑		N	N	N	N		N	N	N		N
Taylor- Piliae RE (2020)	SRMA (1 RCT, 1 QE)	NA	NA	NA	NA	NA				N	N	N	N	N				N		N
WangXQ (2016)	SRMA (6 RCTs)	NA	NA	NA	NA	↑	↑	↑							N	N	N			N
Wu B (2020)	SRMA (7 RCTs)	NA	NA	NA	*	NA				N	N	N	N	N		N	N	N		
Yang G (2022)	SRMA (8 RCTs)	NA	NA	NA	NA	NA				N	N	N	N	N						
Yeh GY (2009)	SR (1 RCTs, 2 NRS)		↑								A	N	N	N	N	A	A	A	A	N

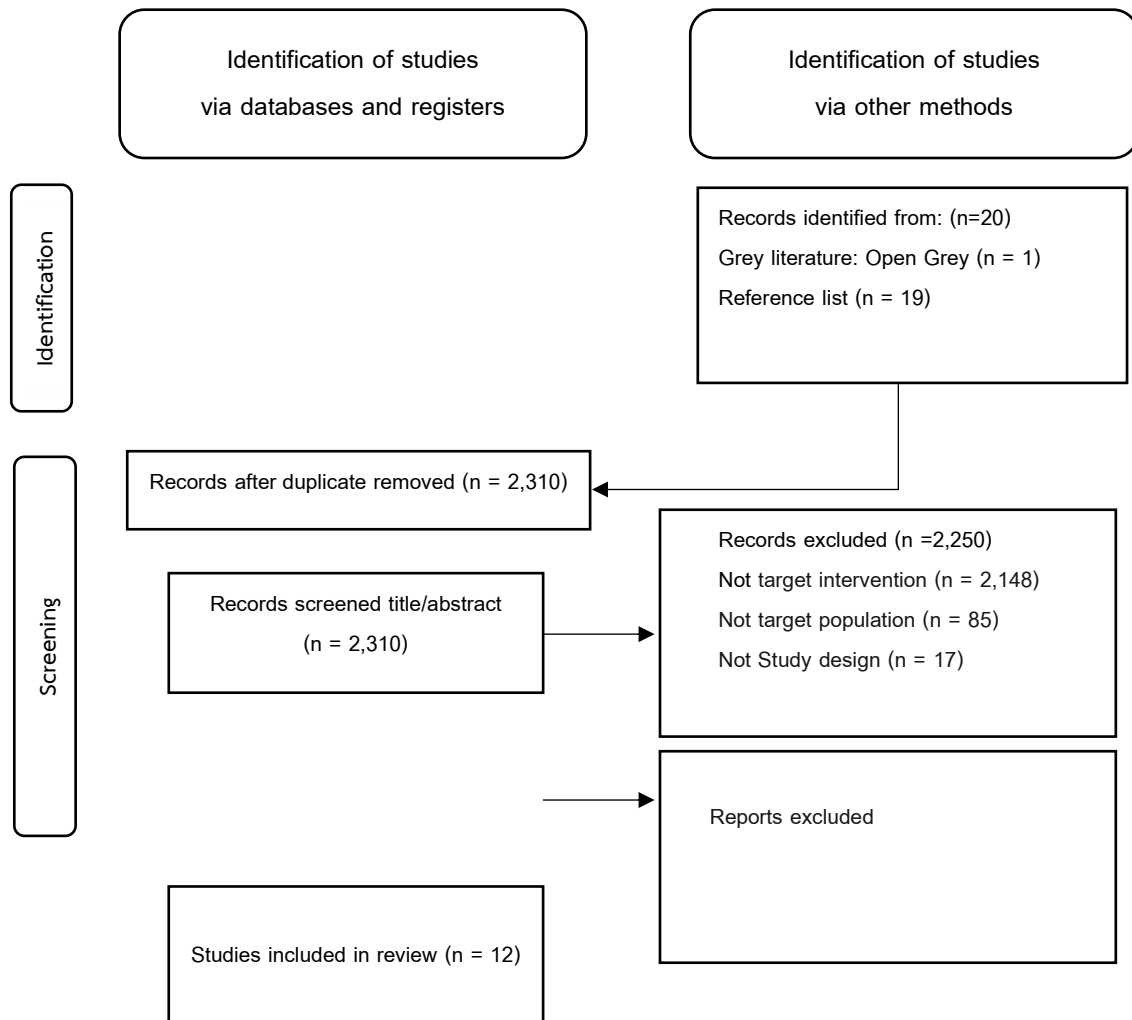


*: กลุ่มควบคุมดีกว่ากลุ่มทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, ↑: กลุ่มควบคุมดีกว่ากลุ่มทดลอง, ⇌: กลุ่มทดลองไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม แต่ดีขึ้นกว่าก่อนการทดลอง, <>: ผลลัพธ์มีความไม่สอดคล้องกัน ระหว่างการศึกษา, NA: ไม่มีการศึกษา, SR: Systematic review, SRMA: Systematic review with meta-analysis, RCT: Randomized controlled trial, CCT: Clinical controlled trial, NRS: Non controlled studies, QE: Quasi-experimental study, QOL: Quality of life, LVEF Left ventricular ejection fraction, HRV: Heart rate variability, 6MWT: 6-minute walk test, VO₂ max: maximum oxygen consumption, PeakVO₂: Peak oxygen uptake, SBP: Systolic blood pressure, DBP: Diastolic blood pressure, HR: Heart rate, HRV: Heart rate variability, TC: total cholesterol, TG: Triglyceride, LDL: Low density lipoprotein, HDL: High density lipoprotein, SF-36: 36-Item Short Form, SOC-13: Sense of coherence-13, LVEF: Left ventricular ejection fraction

ตารางที่ 4 ผลการศึกษาของงานวิจัยการป้องกันทุติยภูมิด้วยการเล่นปาตั่ววันจีน

ชื่อผู้วิจัย (ปี)	รูปแบบงานวิจัย	ผลลัพธ์ที่ศึกษา				
		6MWT	LVEF	Peak VO ₂	O ₂ pulse	METs
Wang D (2022)	SRMA (12RCTs)	*	*	*	*	*

*: กลุ่มควบคุมดีกว่ากลุ่มทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, SRMA: Systematic review with meta-analysis, RCT: Randomized controlled trial, 6MWT: 6-minute walk test, LVEF: Left ventricular ejection fraction, PeakVO₂: Peak Oxygen, O₂ Pulse: Oxygen pulse, METs: Metabolic Equivalent of Task



ภาพที่ 1 PRISMA flow diagram ของการทบทวนแบบครอบคลุม



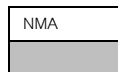
งานวิจัย	Study design	การประเมินคุณภาพงานวิจัย																สรุป
		Q 1	Q 2	Q 3	Q 4	Q 5	Q 6	Q 7	Q 8	Q 9	Q 10	Q 11	Q 12	Q 13	Q 14	Q 15	Q 16	
Cramer et al.)2015(	RCT											NMA	NMA			NMA		High
Bruce et al.)2021(	RCT																	Critically Low
Li et al.)2020(	RCT																	Low
Nery et al.)2013(	RCT											NMA	NMA			NMA		Low
Liu et al.)2018(	RCT, CCT																	Critically Low
Wu et al.)2020(	RCT																	Moderate
Wang et al.)2022(	RCT																	High
Ng et al.)2012(	RCT, CCT											NMA	NMA			NMA		High
Taylor-Piliae et al. (2020)	RCT, QE																	Low
Yang et al. (2022)	RCT																	High
Yeh et al. (2009)	RCT, NRS, OBS											NMA	NMA			NMA		Moderate
Wang et al. (2016)	RCT																	High

RCT: Randomized controlled trial, CCT: Clinical controlled trial, NRS: Non controlled studies, OBS: Observational controlled study, QE: Quasi-experimental study

การแปลผลคุณภาพงานวิจัย



Yes
Partial Yes
No



No meta-analysis
Question: Critical domain

ภาพที่ 2 ผลการประเมินคุณภาพงานวิจัยด้วยเครื่องมือ AMSTAR



ผลของการทดแทนไขมันด้วยคาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลินต่อคุณภาพของนั้กเก็ตไก่ The Effect of Fat Replacement by Carrageenan, Konjac flour, and Inulin on the Quality of Chicken Nuggets

ณัฐธิดา ไต้เปี้ยบ¹ ณัฐนิชา เกษรสังข์¹ และ สินี หนองเต่าดำ¹

Nattida Daipreab¹, Natnicha Keasonsung¹, and Sinee Nongtaodum¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการทดแทนไขมันทั้งหมด (100% โดยน้ำหนัก) ด้วยคาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลิน ต่อคุณภาพของนั้กเก็ตไก่ จากการศึกษพบว่า ปริมาณความชื้น และค่าความสว่าง (L^*) ของนั้กเก็ตไก่ที่ทดแทนไขมันมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) และค่า Water activity (a_w) ของนั้กเก็ตไก่ควบคุม (มีและไม่มีไขมัน) และนั้กเก็ตไก่ที่ทดแทนไขมันมีค่าอยู่ในช่วง 6.26-6.32 และ 0.97-0.98 ตามลำดับ นั้กเก็ตไก่ที่ทดแทนไขมันด้วยคาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลินมีปริมาณไขมันลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าแรงเฉือน (Shear force) สูงกว่านั้กเก็ตไก่ควบคุม (ใส่ไขมัน) ($p \leq 0.05$) จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าคะแนนเฉลี่ยความชอบโดยรวมของนั้กเก็ตไก่ที่ทดแทนไขมันด้วยอินนูลินมีคะแนนเฉลี่ยไม่แตกต่างกับนั้กเก็ตไก่ควบคุม (ใส่ไขมัน) ($p > 0.05$) โดยมีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 8.05 (ชอบมากถึงชอบมากที่สุด)

คำสำคัญ : นั้กเก็ตไก่, คาร์ราจีแนน, แป้งบุก, อินนูลิน, คุณภาพ

Abstract

The objective of this research was to study the effects of replacing 100% of the fat content by weight with carrageenan, konjac flour, and inulin on the quality of chicken nuggets. The results indicated that the moisture content and lightness (L^*) of chicken nuggets incorporated with these fat replacers increased significantly ($p \leq 0.05$). The pH values and water activity (a_w) of the control samples (both with and without fat) and the fat-replaced chicken nuggets ranged from 6.26 to 6.32 and 0.97 to 0.98, respectively. Chicken nuggets with fat replaced by carrageenan, konjac flour, and inulin exhibited a significant reduction in fat content ($p \leq 0.05$), whereas their hardness and shear force were significantly higher than the control group containing fat ($p \leq 0.05$). Sensory evaluation results indicated

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

¹ Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

that the mean overall liking score for chicken nuggets with fat replaced by inulin was not significantly different from the fat-containing control ($p>0.05$), with a mean score of 8.05 (like very much to like extremely).

Keyword : Chicken nuggets, Carrageenan, Konjac flour, Inulin, Quality

บทนำ

นักร้องไก่ (Chicken nuggets) จัดเป็นผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูปที่ได้รับความนิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายในโลก เนื่องจากมีความสะดวกในการบริโภค และเป็นอาหารที่รับประทานง่าย โดยทั่วไปแล้วผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูปจะมีปริมาณไขมันสูงถึง 30% ทั้งนี้เนื่องจากไขมันจะช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์มีลักษณะทางประสาทสัมผัสทางด้านกลิ่นรส (Flavour) ความฉ่ำ (Juiciness) และความรู้สึกภายในปาก (Mouth feel) และยังช่วยทางด้านเนื้อสัมผัส (ความนุ่ม) ของผลิตภัณฑ์ด้วย (Kumar *et al.*, 2004; Yogesh *et al.*, 2013) อย่างไรก็ตามในการบริโภคอาหารที่มีไขมันสูงมากๆ จนเกินความต้องการของร่างกาย จะส่งผลต่อการเป็นโรคต่างๆ เช่น โรคหลอดเลือดหัวใจและสมอง โรคอ้วน โรคไขมันพอกตับ และโรคเมตาบอลิกซินโดรม เป็นต้น (Berizi *et al.*, 2017; Ren *et al.*, 2022) และในปัจจุบันผู้บริโภคได้หันมาใส่ใจเกี่ยวกับสุขภาพกันมากขึ้น จึงทำให้ความต้องการผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพหรือผลิตภัณฑ์อาหารที่มีปริมาณไขมันต่ำเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของการใช้สารทดแทนไขมัน (Fat replacers) ต่อคุณภาพของนักร้องไก่ โดยสารทดแทนไขมัน ได้แก่ คาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลิน มาทดแทนไขมันทั้งหมด (100% โดยน้ำหนัก) ในนักร้องไก่

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลการทดแทนไขมันทั้งหมด (100% โดยน้ำหนัก) ด้วยคาร์ราจีแนน แป้งบุกและอินนูลินต่อคุณภาพของนักร้องไก่

อุปกรณ์และวิธีการ

1. วัตถุดิบ ได้แก่ เนื้ออกไก่สด ไข่ไก่สดเบอร์ 2 (ตราเตสโก้) เกลือป่น (ตราปรุงทิพย์) น้ำตาลทรายขาว (ตรามิตรผล) เครื่องเทศ ได้แก่ ผงกระเทียม ผงพริกไทยดำ และผงหัวหอม (ตรามือที่ 1) ผงปาปริก้า (แม็คคอบิค) เนยสดรสจืด (ตราอลารี่) แป้งสาลี (ตรากรอบ) แป้งข้าวเจ้า (ตราปลาไทย 5 ดาว) เกล็ดขนมปัง (ตราโลโบ) และสารทดแทนไขมัน ได้แก่ คาร์ราจีแนน (Kappa-Carrageenan; บริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด) แป้งบุก (Konjac flour; บริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด) และอินนูลิน (Inulin; Beneo)

2. ขั้นตอนการผลิต

2.1 นำเนื้ออกไก่สดมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดสับ (Tefal รุ่น DPA130) แล้วนำมาใส่ในหม้อผสม (KitchenAid) โดยใช้หัวใบไม้ แล้วใส่เกลือป่น บดผสมเป็นเวลา 3 นาที ที่ระดับความเร็วเบอร์ 6 ใส่ส่วนผสมอื่นๆ ตามลงไป ได้แก่ น้ำตาลทรายขาว ผงพริกไทยดำ ผงหัวหอมใหญ่ ผงกระเทียม ผงปาปริก้า และเนยสดรสจืด หมายเหตุ: เจลคาร์ราจีแนน และเจลบุก (เตรียมโดยบดผสมกับน้ำให้มีความเข้มข้น 1%) ส่วนเจลอินนูลิน



(เตรียมโดยปั่นผสมกับน้ำให้มีความเข้มข้น 40%) จะใส่แทนไขมัน (เนยสดรสจืด) ในขั้นตอนนี้ ปั่นในหม้อผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที ที่ระดับความเร็วเบอร์ 4 ปั่นผสมต่ออีกเป็นเวลา 5 นาที ที่ระดับความเร็วเบอร์ 6

2.2 นำส่วนผสมที่ได้ (ข้อ 2.1) มาใส่ในพิมพ์ซิลิโคนขนาด $3 \times 4 \times 1.5$ เซนติเมตร (24 ช่อง) โดยอัดส่วนผสมลงใส่พิมพ์ให้แน่น แล้วนำไปนึ่งในกระทะไฟฟ้า (HANABISHI รุ่น HGP-160S) ที่อุณหภูมิ 98 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที เมื่อหนึ่งเสร็จแล้ว นำเนื้อไก่ออกจากพิมพ์ซิลิโคนมาวางพักไว้บนตะแกรง โดยทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 20 นาที

2.3 นำเนื้อไก่ที่ได้ (ข้อ 2.2) มาชุบไข่ (ไข่ที่ตีผสมให้เข้ากันแล้ว) จากนั้นชุบผงแป้งผสม (แป้งสาลี และแป้งข้าวเจ้า) จากนั้นชุบไข่อีกครั้ง ชุบด้วยเกล็ดขนมปัง (หลังชุบ; ขึ้นน้ำหนักมีน้ำหนักเฉลี่ย 21.73 ± 0.61 กรัม) แล้วนำไปแช่แข็งที่ตู้แช่แข็ง (-18 ± 2 องศาเซลเซียส) นาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาละลายในตู้แช่เย็น (อุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส) นาน 3 ชั่วโมง แล้วนำไปทอดแบบน้ำมันท่วมในหม้อทอดที่อุณหภูมิ 180 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 วินาที (หลังทอด; ขึ้นน้ำหนักมีน้ำหนักเฉลี่ย 22.28 ± 0.67 กรัม) นำนักเก็ตไก่ที่ทอดเสร็จแล้วมาพักบนตะแกรงให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 นาที ก่อนทำการวิเคราะห์คุณภาพต่างๆ

3. การวิเคราะห์คุณภาพ

3.1 วิเคราะห์ค่า Water activity (a_w) โดยด้วยเครื่องวัด a_w (water activity meter, Aqualab series 4TE)

3.2 วิเคราะห์ค่าสีเนื้อของนักเก็ตไก่ โดยวัดด้วยเครื่อง Color-view spectrophotometer (BYK Gardner Model 9000) ในระบบสี CIE $L^* a^* b^*$

3.3 วิเคราะห์ปริมาณความชื้น และปริมาณไขมัน ตามวิธี AOAC (1990)

3.4 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) โดยนำตัวอย่างนักเก็ตไก่ที่บดละเอียดแล้ว 10 กรัม และน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันในบีกเกอร์ จากนั้นนำมาวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ด้วยเครื่อง pH meter (Mettler Toledo)

3.5 วิเคราะห์เนื้อสัมผัสของนักเก็ตไก่ด้วยเครื่อง Texture Analyzer TAXT2i โดยวัดเนื้อในด้วยหัววัด P/50 (Hardness; g) และวัดทั้งชิ้นรวมเปลือก (Shear force; g) ด้วยหัววัด HDP/BS (ดัดแปลงจาก Jorge *et al.*, 2024)

3.6 ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้าน ลักษณะปรากฏ กลิ่นเครื่องเทศ รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยใช้แบบทดสอบ 9-point hedonic scale (9=ชอบมากที่สุด; 1=ไม่ชอบมากที่สุด) โดยผู้บริโภคนาน 100 คน

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS V.10 (Statistics Package for Social Sciences)



ผลและวิจารณ์

1. ผลของการทดแทนไขมันต่อปริมาณความชื้น ปริมาณไขมัน ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) และค่า Water activity (a_w) ของนักเก็ตไก่

จากการศึกษาผลของสารทดแทนไขมันด้วยคาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลิน (ทดแทน 100% โดยน้ำหนัก) ต่อปริมาณความชื้น ปริมาณไขมัน ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) และค่า Water activity (a_w) ของนักเก็ตไก่ แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า ปริมาณความชื้นของนักเก็ตไก่ที่ทดแทนไขมันด้วยคาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลิน มีค่าสูงกว่านักเก็ตไก่ควบคุม (ใส่ไขมัน) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 51.52-56.55% ทั้งนี้เนื่องจากว่าสารทดแทนไขมันอยู่ในรูปของเจลซึ่งมีน้ำเป็นส่วนประกอบในขั้นตอนการเตรียมเจล และมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำ (Nikolić *et al.*, 2024) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Modi *et al.* (2009) รายงานว่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ประเภทลูกชิ้น (Meat Kofta) ที่ทดแทนไขมันด้วยคาร์ราจีแนนมีค่าสูงกว่าผลิตภัณฑ์ประเภทลูกชิ้น (Meat Kofta) ที่ไม่ได้ทดแทนไขมัน ส่วน Kim *et al.* (2019) รายงานว่าปริมาณความชื้นของไส้กรอกแฟรงเฟอ์เตอร์ที่ทดแทนไขมันด้วยคาร์ราจีแนนมีค่าสูงกว่าไส้กรอกแฟรงเฟอ์เตอร์ที่ไม่ได้ทดแทนไขมัน และ Alaei *et al.* (2018) รายงานว่าปริมาณความชื้นของไส้กรอกไก่ที่ใช้อินนูลินทดแทนไขมันมีค่าสูงกว่าไส้กรอกไก่ที่ไม่ได้ทดแทนไขมัน ส่วนปริมาณไขมันของนักเก็ตไก่ที่ทดแทนไขมันด้วยคาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลิน มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับนักเก็ตไก่ควบคุม (ใส่ไขมัน) แต่มีปริมาณไขมัน (5.36-6.68%) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) กับนักเก็ตไก่ควบคุมที่ไม่ใส่ไขมัน (6.75%) ส่วนค่า Water activity (a_w) และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของนักเก็ตไก่ควบคุม (ทั้งใส่และไม่ใส่ไขมัน) และนักเก็ตไก่ที่ใช้สารทดแทนไขมันมีค่าอยู่ในช่วง 0.97-0.98 และ 6.26-6.32 ตามลำดับ

2. ผลของการทดแทนไขมันต่อค่าสี $L^* a^* b^*$ ของเนื้อมันนักเก็ตไก่

จากการศึกษาผลของสารทดแทนไขมันด้วยคาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลิน (ทดแทน 100% โดยน้ำหนัก) ค่าสี $L^* a^* b^*$ ของเนื้อมันนักเก็ตไก่ แสดงดังตารางที่ 2 และภาพที่ 1 โดยค่าสี L^* บ่งบอกถึงค่าความสว่าง (ขาวถึงดำ) ค่าสี a^* (แดงถึงเขียว) และค่าสี b^* (เหลืองถึงน้ำเงิน) พบว่านักเก็ตไก่ที่ทดแทนไขมันด้วยคาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลินมีค่าความสว่าง (L^*) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับนักเก็ตไก่ควบคุม (ทั้งใส่และไม่ใส่ไขมัน) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 67.92-69.15 ทั้งนี้เนื่องมาจากเจลสีขาวของสารทดแทนไขมัน (คาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลิน) ส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) เพิ่มขึ้น ส่วนค่าสี a^* และ ค่าสี b^* ของนักเก็ตไก่ที่ใช้สารทดแทนไขมันด้วยคาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลิน มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับนักเก็ตควบคุม (ใส่ไขมัน) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 19.25-19.57 และ 28.51-29.67 ตามลำดับ

3. ผลของการทดแทนไขมันต่อค่าเนื้อสัมผัสของนักเก็ตไก่

จากการศึกษาผลของสารทดแทนไขมันด้วยคาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลิน (ทดแทน 100% โดยน้ำหนัก) ต่อค่าเนื้อสัมผัสของนักเก็ตไก่ แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าแรงเฉือน (Shear force) ของนักเก็ตไก่ที่ใช้สารทดแทนไขมันด้วยคาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลิน มีค่าสูงกว่านักเก็ตควบคุม (ใส่ไขมัน) แต่มีค่าต่ำกว่านักเก็ตควบคุม (ไม่ใส่ไขมัน) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนนักเก็ต



ไก่ควบคุม (ไม่ใส่ไขมัน) มีค่าความแข็ง (Hardness) และค่าแรงเฉือน (Shear force) สูงสุด ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 11,099.40 กรัม และ 4,811.51 กรัม ตามลำดับ

4. ผลของการทดแทนไขมันต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของนักเก็ตไก่

จากการศึกษาผลของสารทดแทนไขมันด้วยคาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลิน (ทดแทน 100% โดยน้ำหนัก) ต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของนักเก็ตไก่ แสดงดังตารางที่ 4 โดยผู้บริโภคนับจำนวน 100 คน เป็นเพศหญิง 61 คน (61%) และเพศชาย 39 คน (39%) พบว่า นักเก็ตไก่ควบคุม (ใส่ไขมัน) มีคะแนนเฉลี่ยของความชอบโดยรวม (8.22) ไม่แตกต่างกับนักเก็ตไก่ที่ใช้อินนูลินเป็นสารทดแทนไขมัน (8.05) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับคะแนนเฉลี่ยของคุณลักษณะทางด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส โดยมีคะแนนเฉลี่ยไม่แตกต่างกับนักเก็ตไก่ที่ใช้อินนูลินเป็นสารทดแทนไขมัน ($p > 0.05$)

สรุป

นักเก็ตไก่ที่ทดแทนไขมันด้วยคาร์ราจีแนน แป้งบุก และอินนูลิน ส่งผลให้ปริมาณความชื้น และค่าความสว่าง (L^*) ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าแรงเฉือน (Shear force) เพิ่มขึ้นจากนักเก็ตไก่ควบคุม (ใส่ไขมัน) ส่วนปริมาณไขมันของนักเก็ตไก่ที่ใช้สารทดแทนไขมันจะมีค่าลดลง สำหรับนักเก็ตไก่ที่ทดแทนไขมันด้วยอินนูลินจะได้คะแนนเฉลี่ยความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจากนักเก็ตไก่ควบคุม (ใส่ไขมัน) ดังนั้นนักเก็ตไก่ที่ทดแทนไขมันด้วยอินนูลินจึงเป็นทางเลือกสำหรับผู้บริโภคที่รักสุขภาพที่นิยมบริโภคนักเก็ตไก่

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้



เอกสารอ้างอิง

- Alaei, F., Hojjatoleslami, M., & Hashemi Dehkordi, S.M. (2018). The effect of inulin as a fat substitute on the physicochemical and sensory properties of chicken sausages. *Food Science & Nutrition*, 6(2), 512-519.
- AOAC. (1990). Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Communities International (15th ed.). Washington, DC: AOAC.
- Berizi, E., Shekarforoush, S. S., Mohammadinezhad, S., Hosseinzadeh, S., & Farahnaki, A. (2017). The use of inulin as fat replacer and its effect on texture and sensory properties of emulsion type sausages. *Iranian Journal of Veterinary Research*, 18(4), 253-257.
- Jorge, A.N., Silva, V.F., Silva, M.I., Goes, M.D., Souza, M.L.R., & Goes, E.S.R. (2024). Inclusion of fish meal in the coating of Nile tilapia nuggets. *Food Science and Technology*, 44, e00144.
- Kim, D.H., Shin, D.M., Seo, H.G., & Han, S.G. (2019). Effects of konjac gel with vegetable powders as fat replacers in frankfurter-type sausage. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 32(8), 1195-1204.
- Kumar, M., & Sharma, B.D. (2004). The storage stability and textural, physico-chemical and sensory quality of low-fat ground pork patties with carrageenan as fat replacer. *International Journal of Food Science and Technology*, 39(1), 31-42.
- Modi, V.K., Yashoda, K.P., & Naveen, S.K. (2009). Effect of carrageenan and oat flour on quality characteristics of meat kofta. *International Journal of Food Properties*, 12(1), 228-242.
- Nikolić, I., Šoronja-Simović, D., Zahorec, J., Dokić, L., Lončarević, I., Stožinić, M., & Petrović, J. (2024). Polysaccharide-based fat replacers in the functional food products. *Processes*, 12(12), 2701.
- Ren, Y., Huang, L., Zhang, Y., Li, H., Zhao, D., Cao, J., & Liu, X. (2022). Application of emulsion gels as fat substitutes in meat products. *Foods*, 11(13), 1950.
- Yogesh, K., Ahmad, T., Manpreet, G., Mangesh, K., & Das, P. (2013). Characteristics of chicken nuggets as affected by added fat and variable salt contents. *Journal of Food Science and Technology*, 50(1), 191-196.

ตารางที่ 1 ปริมาณความชื้น ปริมาณไขมัน ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) และค่า Water activity (a_w) ของนักเก็ตไก่

ตัวอย่าง	ความชื้น (%)	ปริมาณไขมัน (%)	pH	Water activity (a_w)
ควบคุม (ไม่ใส่ไขมัน)	53.38±0.27 ^b	6.75±0.80 ^b	6.26±0.02 ^c	0.97±0.001 ^b
ควบคุม (ใส่ไขมัน)	47.18±1.60 ^d	12.28±1.53 ^a	6.32±0.01 ^a	0.97±0.001 ^b
คารัรจีแนน	56.04±0.41 ^a	5.36±0.86 ^b	6.31±0.00 ^{ab}	0.98±0.001 ^a
แป้งบุก	56.55±0.52 ^a	6.68±1.08 ^b	6.31±0.01 ^{ab}	0.98±0.001 ^a
อินนูลิน	51.52±0.38 ^c	5.39±1.26 ^b	6.30±0.01 ^b	0.97±0.002 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 2 ค่าสี L^* a^* b^* ของเนื้นักเก็ตไก่

ตัวอย่าง	L^*	a^*	b^*
ควบคุม (ไม่ใส่ไขมัน)	64.52±1.08 ^c	19.71±0.24 ^b	29.03±0.91 ^{bc}
ควบคุม (ใส่ไขมัน)	64.80±0.82 ^c	20.09±0.64 ^a	30.72±1.80 ^a
คารัรจีแนน	67.92±1.51 ^b	19.57±0.30 ^{bc}	28.52±0.78 ^c
แป้งบุก	68.38±0.79 ^{ab}	19.25±0.21 ^c	28.51±0.92 ^c
อินนูลิน	69.15±2.19 ^a	19.44±0.45 ^{bc}	29.67±1.38 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 3 ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าแรงเฉือน (Shear force) ของนักเก็ตไก่

ตัวอย่าง	Hardness (g)	Shear force (g)
ควบคุม (ไม่ใส่ไขมัน)	11,099.40±1517.10 ^a	4,811.51±337.03 ^a
ควบคุม (ใส่ไขมัน)	6,935.63±990.95 ^c	2,971.83±332.39 ^d
คารัรจีแนน	7,635.53±858.69 ^{bc}	3,340.05±364.70 ^{cd}
แป้งบุก	7,942.63±775.97 ^b	3,559.73±390.99 ^{bc}
อินนูลิน	7,832.73±587.61 ^b	3,882.47±388.04 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4 คะแนนเฉลี่ยการทดสอบทางประสาทสัมผัสของนักเก็ตไก่ (N=100)

ตัวอย่าง	ลักษณะปรากฏ	กลิ่นเครื่องเทศ	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
ควบคุม (ไม่ใส่ไขมัน)	7.85±1.17 ^b	7.48±1.25 ^b	7.66±1.36 ^b	7.58±1.31 ^c	7.82±1.28 ^b
ควบคุม (ใส่ไขมัน)	8.26±0.81 ^a	8.04±0.89 ^a	8.05±0.98 ^a	8.12±0.86 ^a	8.22±0.89 ^a
คาร์ราจีแนน	7.74±1.13 ^b	7.74±1.20 ^{ab}	7.73±1.19 ^{ab}	7.58±1.15 ^c	7.81±1.25 ^b
แป้งบุก	7.93±1.09 ^b	7.77±1.16 ^{ab}	7.78±1.19 ^{ab}	7.77±1.04 ^{bc}	7.85±1.12 ^b
อินนูลิน	8.04±0.93 ^{ab}	7.92±1.11 ^a	7.87±1.05 ^{ab}	7.97±1.03 ^{ab}	8.05±0.98 ^{ab}

หมายเหตุ: ตัวอักษรกำกับที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05)



ภาพที่ 1 นักเก็ตไก่ที่ทดแทนไขมัน (เนื้อด้านใน)



คุณภาพ ความเหมาะสม และมูลค่าทางเศรษฐกิจของการบริจาคยาโรคมะเร็งในช่วงวิกฤตเศรษฐกิจของศรีลังกา: การศึกษาภาคตัดขวางแบบย้อนหลัง

Quality, Appropriateness, and Economic Value of Oncology Drug Donations During Sri Lanka's Economic Crisis: A Retrospective Cross-Sectional Study

ผัสดี มาดุมาดาวี มุนาดีนียา มานาเก¹, สมหญิง พุ่มทอง¹, ศิตาพร ยังคง¹, โรฮินี เฟร์นันโดปุลล์²

Prasadi Madumadavi Munadeniya Manage¹, Somying Pumtong¹, Sitaporn Youngkong¹,

Rohini Fernandopulle²

บทคัดย่อ

วิกฤตเศรษฐกิจครั้งรุนแรงของศรีลังกาในช่วงปี ค.ศ. 2022 ถึง ค.ศ. 2024 ได้ส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อุปทานยา ทำให้กองบริหารเวชภัณฑ์กลาง (Medical Supplies Division: MSD) ของกระทรวงสาธารณสุขต้องพึ่งพายาโรคมะเร็งที่ได้รับบริจาคอย่างมาก เพื่อคงความต่อเนื่องของการดูแลรักษาผู้ป่วยมะเร็ง การศึกษาภาคตัดขวางแบบย้อนหลังนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสอดคล้องตามเกณฑ์คุณภาพ ความเหมาะสม และมูลค่าทางเศรษฐกิจโดยประมาณของการบริจาคยาโรคมะเร็งที่ MSD ได้รับในช่วงวิกฤตระหว่างปี ค.ศ. 2022 ถึง ค.ศ. 2024 การศึกษานี้ประเมินการบริจาคยาโรคมะเร็งทั้งหมด 153 รายการ ซึ่งครอบคลุมผลิตภัณฑ์ยา 77 รายการที่ไม่ซ้ำกัน โดยใช้เกณฑ์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ได้แก่ การได้รับอนุมัติจากหน่วยงานกำกับดูแล ความครบถ้วนของฉลาก ความเพียงพอของอายุคงเหลือ และความสอดคล้องกับบัญชียาโรงพยาบาลปี ค.ศ. 2024 การบริจาคส่วนใหญ่ได้รับในปี ค.ศ. 2022 คิดเป็นร้อยละ 60.78 ซึ่งสะท้อนถึงระยะรุนแรงของวิกฤต มีเพียงร้อยละ 51.63 ของการบริจาคที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพที่กำหนดไว้ล่วงหน้า โดยสาเหตุที่พบบ่อยที่สุดของการไม่ผ่านเกณฑ์ ได้แก่ ฉลากไม่ครบถ้วนและอายุคงเหลือของยาที่ไม่เพียงพอ เมื่อพิจารณาความสอดคล้องตามเกณฑ์คุณภาพร่วมกับความสอดคล้องกับบัญชียา พบว่ามีเพียงร้อยละ 46.41 ของการบริจาคที่ถือว่าเหมาะสม แม้จะมีข้อจำกัดดังกล่าว การบริจาคที่สอดคล้องกับบัญชียายังคงมีมูลค่าทางเศรษฐกิจโดยประมาณสูงถึง 502,379,564.10 รูปีศรีลังกา ตลอดช่วงสามปี ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นช่องว่างสำคัญด้านการกำกับดูแลระบบการบริจาคยาและสนับสนุนความจำเป็นของการมีนโยบายระดับชาติด้านการบริจาคยาอย่างเป็นทางการ ซึ่งต้องกำหนดให้มีการตรวจสอบคุณภาพ การปฏิบัติตามข้อกำหนดด้านกฎระเบียบ และความสอดคล้องกับบัญชียาเป็นภาคบังคับ เพื่อส่งเสริมการใช้ยาโรคมะเร็งที่ได้รับบริจาคอย่างปลอดภัยเหมาะสม และมีประสิทธิผลในภาวะวิกฤตในอนาคต

¹ ภาควิชาเภสัชกรรม คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย

Department of Pharmacy, Faculty of Pharmacy, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

² ภาควิชาเภสัชวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเซอร์จอห์นโคเทลาวาลา รัตมาลانا 10390 ศรีลังกา

Department of Pharmacology, Faculty of Medicine, General Sir John Kotelawala Defence University, Ratmalana

10390, Sri Lanka



คำสำคัญ

การบริจาคยา, ยารักษาโรคมะเร็ง, คุณภาพเภสัชภัณฑ์, ศรีลังกา, วิกฤตเศรษฐกิจ,ห่วงโซ่อุปทานยา

Abstract

Sri Lanka's economic crisis (2022–2024) severely disrupted pharmaceutical supply chains, prompting the Medical Supplies Division (MSD) of Ministry of Health to rely heavily on donated oncology medicines to sustain cancer care. This retrospective cross-sectional study evaluated the quality compliance, appropriateness, and estimated economic value of oncology drug donations received by the MSD during this period.

A total of 153 donations comprising 77 unique drug products were assessed against predefined criteria: regulatory approval, labelling completeness, shelf-life adequacy, and alignment with the Hospital Formulary 2024. Most donations were received in 2022 (60.78%), reflecting the crisis's acute phase. Only 51.63% met quality criteria, with incomplete labelling and inadequate shelf life as the leading causes of non-compliance. When formulary alignment was also considered, only 46.41% were deemed appropriate.

Despite these shortcomings, formulary-compatible donations carried an estimated economic value of LKR 502,379,564.10 over three years. These findings highlight significant governance gaps and underscore the need for a formal national donation policy mandating quality verification, regulatory compliance, and formulary alignment to ensure the safe use of donated oncology medicines in future crises.

Key Words

Drug donations, oncology medicines, pharmaceutical quality, Sri Lanka, economic crisis, supply chain

Introduction

Sri Lanka, a lower-middle-income country, experienced a severe economic crisis between 2022 and 2024, marked by foreign exchange shortages, inflation, and major disruptions in medicine imports. Because the country depends heavily on imported pharmaceuticals, these disruptions led to serious shortages of essential medicines and threatened continuity of care (Mataraarachchi, 2023; Samarakoon, 2024). In response, the Ministry of Health established the Healthcare Donor Activities Unit and coordinated donations through the Medical Supplies Division (MSD), the central body responsible for supplying medicines to public sector institutions.



Oncology medicines were particularly vulnerable in this context because of their high cost, complex handling requirements, and dependence on uninterrupted supply (Simoens Steven, 2011). For cancer patients, treatment interruption can have serious consequences (Seneviratne et al., 2021). Drug donations can therefore provide important support during crises, but poorly managed donations may introduce expired, unsuitable, or inadequately documented medicines into the supply system (Benaragama BVSH, 2007). WHO guidelines emphasize that donated medicines should meet quality standards, have adequate remaining shelf life, and align with recipient-country needs (WHO, 2011; Cañigual-Vila et al., 2015).

Despite the scale of Sri Lanka's crisis, there is limited evidence on the quality compliance, appropriateness, and economic value of oncology drug donations in this setting. This study therefore evaluated oncology drug donations received by the MSD between 2022 and 2024 to support the development of future pharmaceutical donation governance.

Objective

To evaluate the quality compliance, appropriateness, and estimated economic value of oncology drug donations received by the Medical Supplies Division during Sri Lanka's economic crisis from 2022 to 2024.

Methods and Materials

Study design and setting

This retrospective cross-sectional study was conducted at the Medical Supplies Division, Ministry of Health, Sri Lanka, using donation records and the Medical Supplies Management Information System. The study focused on oncology drug donations received during 2022–2024.

Data Collection and Data Analysis

Data extracted included drug name, strength, dosage form, batch number, quantity received, expiry date, donor, year of donation, regulatory approval status, and formulary compatibility. Donations were assessed for quality compliance, appropriateness, and estimated economic value using descriptive statistics in Microsoft Excel.

- A donation was defined as one drug product with one strength, one volume, one dosage form, one batch number, from one donor, donated at one time.
- A drug product was defined as one drug with one strength, one volume, and one dosage form.



- A donation meeting predefined quality criteria was defined as a donation approved for use in Sri Lanka by the National Medicines Regulatory Authority, with complete labelling and product information, at least 12 months of remaining shelf life on arrival at the MSD, and no reported quality complaints during inspection or testing in Sri Lanka.
- Appropriateness was defined as a composite measure of therapeutic relevance and quality compliance. Therapeutic relevance was assessed by comparing each donated medicine with the Hospital Formulary 2024, which served as the reference list of oncology medicines routinely used in Sri Lanka's public healthcare system. Donations were considered formulary-aligned if the medicine appeared on this list. To be deemed appropriate, donated medicines also had to meet the predefined quality criteria, including NMRA registration, complete labelling, adequate remaining shelf life, and no reported quality complaints.
- The economic value of formulary-aligned donated oncology medicines was estimated using annual unit procurement prices obtained from the Medical Supplies Information Management System of the MSD. Total donation value was calculated by multiplying the annual unit price by the donated quantity for each item. The value of non-formulary-compatible donations could not be estimated because standardized local procurement prices for these items were not available in the public sector system.

Ethical approval was obtained from Mahidol University, Thailand (2025/006.2001), and the Sri Lanka Medical Association (ERC/24-003). Administrative clearance was granted by the Education, Training and Research Unit, Ministry of Health, Sri Lanka (ETR/G/AC/21/2025).

Results

Characteristics of Donations

A total of 153 oncology drug donations, comprising 77 unique drug products, were identified. Most donations were received in 2022 (60.78%), followed by 2023 (30.72%) and 2024 (8.50%). Antineoplastic drugs were the predominant category in all three years, whereas other categories contributed only minimally to the overall donation profile. Table 1 summarizes the distribution of donated oncology medicines by therapeutic category and year.



Quality Compliance

Only 79 donations (51.63%) met the predefined quality criteria, while 74 (48.37%) did not. The most common reasons for non-compliance were inadequate remaining shelf life of less than 12 months (n=59), missing essential product information (n=10), and multiple deficiencies (n=3). Reported quality concerns were uncommon (n=1). Most short shelf-life donations were received in 2022 (56.45%), followed by 2023 (38.71%) and 2024 (4.84%). Figure 1 shows the distribution of reasons for non-compliance among oncology drug donations that did not meet predefined quality criteria.

Appropriateness

Of the 153 donations assessed, 120 were compatible with the Hospital Formulary 2024, while 33 were not. Based on combined formulary alignment and quality compliance, only 71 donations (46.41%) were considered appropriate. This indicates that not all formulary-compatible donations met the predefined quality criteria required to be considered appropriate.

Estimated Economic Value

Formulary-compatible donations had an estimated total economic value of LKR 502,379,564.10 over the study period, based on MSD standard procurement prices. Annual estimated values were LKR 255,220,718.40 in 2022, LKR 140,254,950.67 in 2023, and LKR 106,903,895.06 in 2024, showing a decline over time in parallel with donation volume.

Discussion

Oncology drug donations provided important support during Sri Lanka's economic crisis, but many did not meet the predefined quality and appropriateness criteria applied in this study. The concentration of donations in 2022 (60.78%) reflects the acute phase of the crisis, when supply disruptions were most severe. Antineoplastic drugs were the predominant donation category, indicating the importance of donations in maintaining oncology care during severe supply disruption.

Only 51.63% of donations met the predefined quality criteria and only 46.41% were considered appropriate. Missing essential product information, particularly batch number, quantity, and expiry date, together with inadequate remaining shelf life, were the main reasons for non-compliance. This pattern is consistent with previous studies showing that documentation problems and limited remaining shelf life are common weaknesses in pharmaceutical donations during crises (Bero et al., 2010; World Health Organization, 2011). In oncology, short shelf life is particularly problematic because these medicines often require careful handling and timely use. These findings suggest that



the appropriateness of donated medicines depended not only on therapeutic category, but also on practical conditions of use, including adequate remaining shelf life, complete product identification, and alignment with local treatment needs. These conditions are consistent with WHO recommendations that donated medicines should be appropriate to the needs and conditions of the recipient setting.

The proportion of appropriate donations showed a notable improvement over the study period, rising from 45.16% in 2022 to 44.68% in 2023 and 61.54% in 2024. The proportion of appropriate donations was higher in 2024 than in the preceding years. This pattern may indicate improvements in the suitability of donated medicines over time; however, the underlying reasons could not be determined from the available data.

The lower rate of appropriateness compared to quality compliance suggests that a subset of donations, while meeting basic quality standards, were not aligned with the therapeutic priorities of Sri Lanka's public health system. This distinction is important because a donation may meet basic quality-related screening criteria yet still be inappropriate for use if it does not align with the medicines routinely used in the public health system. Off-formulary and non-compliant donations may create storage, administrative, and waste-management burdens rather than fully supporting patient care. This reinforces the importance of defining appropriateness as a composite measure encompassing both quality compliance and formulary alignment, consistent with WHO guidelines emphasizing that donated medicines should respond to the expressed needs of the recipient country and be relevant to local disease patterns and treatment practices (World Health Organization, 2011).

The evaluation criteria applied in this study demonstrated strong alignment with WHO Guidelines for Drug Donations across several dimensions. The requirement for NMRA registration reflected the WHO principle that donated medicines must comply with the regulatory standards of the recipient country. The inclusion of complete labelling supported rational dispensing, pharmacovigilance, and prevention of medication errors considerations of heightened importance given the complexity of oncology regimens. The minimum 12-month shelf-life criterion directly mirrored WHO guidance, minimizing wastage and improving the likelihood of effective utilization. Finally, incorporating post-arrival quality verification through the absence of reported quality complaints added a contextually relevant layer of assurance beyond pre-shipment standards recommended by WHO (World Health Organization, 2011).

Despite these limitations, formulary-compatible donations had substantial estimated economic value, indicating that donations remained an important supplement to national pharmaceutical expenditure during the crisis. Nonetheless, the findings collectively highlight



คณะผู้จัดพิมพ์วารสารบัณฑิตศึกษาระดับชาติฉบับนี้ขอขอบคุณผู้สนับสนุนทุกท่าน

significant governance gaps in the existing donation system. The absence of a formal national donation policy with mandatory quality verification, regulatory compliance checks, and formulary alignment requirements undermined the full potential of these contributions. Establishing such a policy framework would strengthen the safety, efficiency, and therapeutic relevance of oncology medicine donations in future crisis settings.

This study used national-level MSD data and applied explicit criteria to evaluate oncology drug donations; however, several limitations should be acknowledged. The retrospective design and reliance on secondary records may have introduced data gaps or inaccuracies. Additionally, direct hospital-level donations were excluded, which may have led to an underestimation of the total volume and value of oncology medicines donated during the crisis period. Economic value was estimated using standard MSD procurement prices, which may not fully reflect actual market values. Furthermore, the economic value of non-formulary-compatible donations could not be estimated, as standardized local procurement or reference prices for these medicines are absent within the Sri Lankan public healthcare system. Future studies should incorporate hospital-level donation data and examine the utilization and wastage of donated oncology medicines to provide a more comprehensive assessment.

Conclusion

This study found that a substantial proportion of oncology drug donations received during Sri Lanka's economic crisis did not meet the predefined quality and appropriateness criteria applied in this study, despite their considerable estimated economic value to the national supply chain. These findings support the need for a formal national pharmaceutical donation policy with mandatory quality verification, regulatory compliance, and formulary alignment to promote the safe and effective use of donated medicines in future crisis settings.

Acknowledgement

This study was conducted as part of the MSc in Social, Economic, and Administrative Pharmacy programme at Mahidol University and supported by the Thesis Promoting SDGs Scholarship, Faculty of Graduate Studies, Mahidol University. The authors thank the Education, Training and Research Unit, and the Medical Supplies Division, Ministry of Health, Sri Lanka, for their support and cooperation.



References

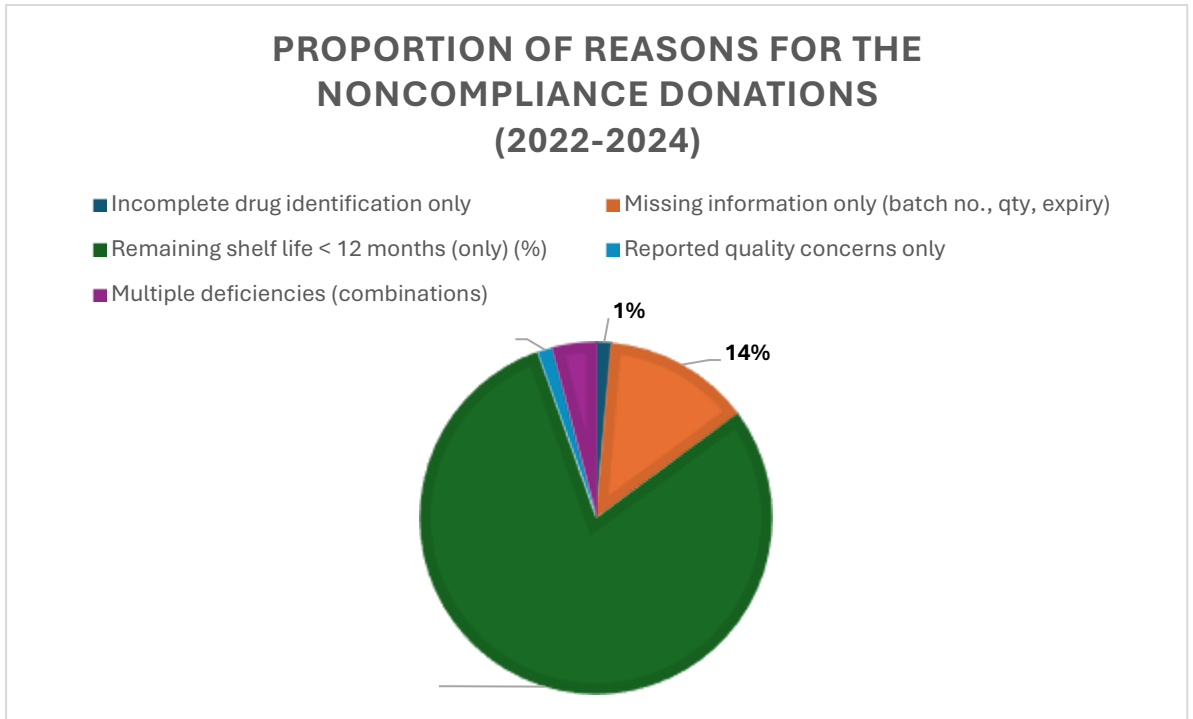
- Bero, L., Carson, B., Moller, H., & Hill, S. (2010). To give is better than to receive: Compliance with WHO guidelines for drug donations during 2000-2008. *Bulletin of the World Health Organization*, 88(12), 922–929. <https://doi.org/10.2471/BLT.10.079764>
- Cañigueral-Vila, N., Chen, J. C., Frenkel-Rorden, L., & Laing, R. (2015). Improvements for international medicine donations: A review of the World Health Organization Guidelines for Medicine Donations, 3rd edition. *Journal of Pharmaceutical Policy and Practice*, 8(1), 1–5. <https://doi.org/10.1186/s40545-015-0045-3>
- Matararachchi, D. (2023). The impact of the economic crisis on health systems, Weekly Epidemiological Report. In *WER Sri Lanka* (Vol. 50).
- Samarakoon, L. P. (2024). What broke the pearl of the Indian ocean? The causes of the Sri Lankan economic crisis and its policy implications. *Journal of Financial Stability*, 70(December 2023), 101213. <https://doi.org/10.1016/j.jfs.2023.101213>
- Seneviratne, S., Jalink, M., Joseph, N., Ariyaratna, Y., Booth, C. M., & Wijeratne, D. T. (2021). Clinical Oncology Workload in Sri Lanka: Infrastructure, Supports, and Delivery of Clinical Care. *JCO Global Oncology*, 7, 1703–1710.
- Simoens S. (2011). Pricing and reimbursement of orphan drugs: the need for more transparency. *Orphanet Journal of Rare Diseases*, 6.
- WHO, (World Health Organization). (2011). *Guidelines for Medicine Donations Revised 2010*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241501989>

Table 1. Distribution of donated oncology drug products by therapeutic category and year

Drug category	2022, n (%)	2023, n (%)	2024, n (%)	Total, n (%)
Antineoplastic drugs	75 (80.65)	45 (95.74)	12 (92.31)	132 (86.27)
Hormone antagonists and related agents	12 (12.90)	2 (4.26)	1 (7.69)	15 (9.80)
Vitamins and trace elements	6 (6.45)	0 (0.00)	0 (0.00)	6 (3.92)
Total	93 (100.00)	47 (100.00)	13 (100.00)	153 (100.00)



Figure 1. Distribution of reasons for non-compliance among oncology drug donations that did not meet predefined quality criteria (n=74)



การเตรียมและการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ เพื่อใช้เป็นโฟโตคะตะลิสต์ภายใต้แสงวิสิเบิล

Preparation and Characterization of a Magnetic $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ Composite for Visible-Light Photocatalysis

มณิรวา บุญคำ¹ และ พรทิพย์ ทองยั้ง^{1*}

Maniwaru Boonkam¹ and Ponthip Tongying^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเตรียมวัสดุคอมโพสิตแม่เหล็ก $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ ศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุ และประเมินการใช้งานเบื้องต้นในฐานะโฟโตคะตะลิสต์ที่ตอบสนองต่อแสงวิสิเบิล โดยเตรียม Fe_3O_4 ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม เตรียม $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล และตกแต่งผิว $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ด้วย Au ก่อนนำมาประกอบเป็นคอมโพสิตร่วมกับ Fe_3O_4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ SEM-EDS แสดงให้เห็นว่าในคอมโพสิตมี Fe_3O_4 , $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ และ Au อยู่ร่วมกัน ขณะที่ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis DRS ที่ว่าวัสดุยังตอบสนองต่อแสงในช่วงวิสิเบิลได้ และผลการวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กพบว่า แม้ค่าการเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวของคอมโพสิตจะลดลงเมื่อเทียบกับ Fe_3O_4 แต่วัสดุยังสามารถแยกออกจากสารละลายได้ด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อประเมินประสิทธิภาพเบื้องต้นในการย่อยสลายเตตราไฮคลีนภายใต้แสงวิสิเบิล พบว่า $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่า $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ โดยให้ค่าการกำจัดเท่ากับ 49% และ 34% ตามลำดับ หลังการฉายแสง 180 นาที ผลการศึกษานี้จึงสนับสนุนว่า $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ เหมาะสำหรับการพัฒนาต่อเป็นโฟโตคะตะลิสต์ที่ตอบสนองต่อแสงวิสิเบิลและสามารถแยกออกจากสารละลายได้ด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก

คำสำคัญ : $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$, วัสดุคอมโพสิตแม่เหล็ก, โฟโตคะตะลิสต์, แสงวิสิเบิล, เตตราไฮคลีน

Abstract

This study aimed to prepare a magnetic $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ composite, characterize the material, and evaluate its preliminary use as a visible-light-responsive photocatalyst. Fe_3O_4 was synthesized by co-precipitation, $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ was prepared by a hydrothermal method, and Au was deposited onto $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ prior to composite assembly with Fe_3O_4 . XRD and SEM-EDS analyses showed the coexistence of Fe_3O_4 , $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, and Au in the composite. UV-Vis DRS indicated that the material retained visible-light response, while magnetic measurements showed that although the

¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

Department of Chemistry, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

*Email: tongying_p@su.ac.th

saturation magnetization of the composite decreased relative to Fe_3O_4 , the material could still be separated from solution using an external magnetic field. Preliminary evaluation of tetracycline degradation under visible-light irradiation showed that $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ outperformed $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, with removal efficiencies of 49% and 34%, respectively, after 180 min of irradiation. These results support the further development of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ as a visible-light-responsive photocatalyst that can be magnetically separated from solution.

Keyword : $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$, magnetic composite, photocatalyst, visible light, tetracycline

บทนำ

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจในการทำจัดการมลพิษอินทรีย์ในน้ำ เนื่องจากอาศัยพลังงานแสงในการกระตุ้นปฏิกิริยารีดอกซ์บนผิวของสารกึ่งตัวนำ อย่างไรก็ตาม การพัฒนาวัสดุสำหรับใช้งานจริงยังมีข้อจำกัดสำคัญ ได้แก่ การตอบสนองต่อแสงวิสิเบิลที่ยังไม่เพียงพอ การกลับมารวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮลอย่างรวดเร็วภายหลังการได้รับแสง และความไม่สะดวกในการแยกวัสดุออกจากระบบหลังการใช้งาน ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีผลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาและการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ (Dong et al., 2015; Lee et al., 2023)

คอปเปอร์ซิงค์ทินซัลไฟด์ ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$; CZTS) เป็นสารกึ่งตัวนำที่น่าสนใจสำหรับงานโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงวิสิเบิล เนื่องจากมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy band gap) ค่อนข้างแคบ โดยทั่วไปอยู่ในช่วงประมาณ 1.4–1.5 eV ซึ่งเอื้อต่อการตอบสนองต่อแสงในช่วงวิสิเบิล (Das et al., 2024) อย่างไรก็ตาม CZTS เพียงชนิดเดียวยังมีข้อจำกัดด้านการแยกพาหะประจุ (charge carrier) ทำให้การนำพาหะประจุที่เกิดขึ้นภายใต้การฉายแสงยังไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้น การเติมองค์ประกอบร่วมจึงเป็นแนวทางสำคัญในการปรับปรุงการตอบสนองต่อแสงและการแยกพาหะประจุของ CZTS (Das et al., 2024)

การตกแต่งผิวของสารกึ่งตัวนำด้วยโลหะมีตระกูล เช่น ทองคำ (Au) เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำสามารถช่วยส่งเสริมการแยกพาหะประจุและลดการกลับมารวมตัวของพาหะประจุได้ โดย Au มักทำหน้าที่เป็นบริเวณรับอิเล็กตรอนในระบบดังกล่าว (Kumari et al., 2022; Yu et al., 2014) ขณะเดียวกัน การรวมองค์ประกอบที่มีสมบัติแม่เหล็ก เช่น Fe_3O_4 เข้ากับระบบ จะช่วยให้สามารถแยกวัสดุออกจากสารละลายได้สะดวกขึ้นด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญต่อการใช้งานและการนำวัสดุกลับมาใช้ซ้ำในทางปฏิบัติ (Nguyen et al., 2021)

แม้จะมีรายงานการปรับปรุงสมบัติของวัสดุที่มี CZTS เป็นองค์ประกอบหลักด้วยองค์ประกอบร่วมหลายรูปแบบ แต่การออกแบบคอมโพสิตที่รวมองค์ประกอบกึ่งตัวนำที่ตอบสนองต่อแสงวิสิเบิล องค์ประกอบที่ช่วยส่งเสริมการแยกพาหะประจุ และองค์ประกอบแม่เหล็กไว้ในระบบเดียว ยังเป็นประเด็นที่ควรศึกษาเพิ่มเติม ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเตรียมวัสดุคอมโพสิตแม่เหล็ก $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ และศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุในด้านโครงสร้างผลึก สัณฐานวิทยา องค์ประกอบ สมบัติการดูดกลืนแสง และสมบัติทางแม่เหล็ก เพื่อใช้เป็น

ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบวัสดุโฟโตคะตะลิสต์ที่ตอบสนองต่อแสงวิสิเบิลและสามารถแยกออกจากระบบได้ด้วยสนามแม่เหล็ก

วัตถุประสงค์

เพื่อเตรียมวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ ศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุ และประเมินความเหมาะสมเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาต่อเป็นโฟโตคะตะลิสต์ที่ตอบสนองต่อแสงวิสิเบิลและสามารถแยกออกจากระบบได้ด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การสังเคราะห์อนุภาค Fe_3O_4

เตรียมอนุภาค Fe_3O_4 ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (Petcharoen & Sirivat, 2012) โดยละลาย $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ในน้ำปราศจากไอออน ในอัตราส่วนโมล $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$ เท่ากับ 1:2 แล้วให้ความร้อนที่ 80°C พร้อมกวนอย่างต่อเนื่อง จากนั้นเติมสารละลาย KOH ความเข้มข้น 3 M แบบหยดช้า ๆ จนเกิดตะกอนสีดำ ปล่อยให้เย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วแยกตะกอน ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน และอบแห้งที่ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. การสังเคราะห์ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

สังเคราะห์อนุภาค $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้กรดโอเลอิกเป็นสารช่วยควบคุมลักษณะอนุภาค (Ansari et al., 2017) โดยละลาย CuCl_2 , ZnCl_2 , SnCl_2 และไทโอยูเรียในเอทิลีนไกลคอล ในอัตราส่วนโมล $\text{Cu}:\text{Zn}:\text{Sn}:\text{S}$ เท่ากับ 2:1:1:4 แล้วเติมกรดโอเลอิกและกวนจนได้สารละลายเนื้อเดียว จากนั้นถ่ายลงภาชนะปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มอลชนิดสแตนเลสที่บุด้วยเทฟลอน และให้ความร้อนที่ 200°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง หลังจากปล่อยให้เย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง จึงแยกผลิตภัณฑ์ ล้างด้วยเอทานอล และอบแห้งที่ 80°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3. การเตรียมวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$

เตรียม $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ โดยกระจาย $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ในสารละลาย HAuCl_4 ความเข้มข้น 50 mg L^{-1} และเขย่าเป็นเวลา 10 นาทีเพื่อให้เกิดการตกตะกอนด้วย Au จากนั้นนำ Fe_3O_4 และ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ มากระจายแยกกันในสารละลายไคโตซานความเข้มข้น 0.2 mg mL^{-1} แล้วผสมเข้าด้วยกันและเขย่าเป็นเวลา 12 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดการรวมตัวเป็นคอมโพสิต ก่อนแยกผลิตภัณฑ์ ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน และทำให้แห้งที่ 80°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยกำหนดอัตราส่วนมวลของ Fe_3O_4 ต่อ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ เท่ากับ 1:1 สำหรับวัสดุ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ใช้วิธีเดียวกัน แต่ใช้ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ แทน $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$

4. การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุ

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ศึกษาพื้นฐานวิทยาและองค์ประกอบธาตุด้วย field-emission scanning electron microscopy ร่วมกับ energy-dispersive X-ray spectroscopy (FE-SEM/EDS) วัดสมบัติการดูดกลืนแสงด้วย UV-Vis diffuse reflectance spectroscopy



(UV-Vis DRS) และประมาณค่าช่องว่างแถบพลังงานจาก Tauc plot ส่วนสมบัติทางแม่เหล็กวิเคราะห์ด้วย vibrating sample magnetometry (VSM)

5. การประเมินประสิทธิภาพเบื้องต้นในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ประเมินการย่อยสลายเตตราไฮดรอลิกด้วยแสงโดยใช้วัสดุ 60mg ในสารละลายเตตราไฮดรอลิกความเข้มข้น 40 mg L^{-1} ปริมาตร 100 mL ก่อนการฉายแสง เขย่าในที่มืดเป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุลการดูดซับ-คายซับ จากนั้นฉายแสงด้วยหลอดซีนอนกำลัง 300 W โดยใช้แผ่นกรองแสงให้ได้ช่วงความยาวคลื่น 390–770 nm และติดตามความเข้มข้นคงเหลือของเตตราไฮดรอลิกตลอดระยะเวลาการฉายแสง 180 นาที ด้วย UV-Vis spectrophotometry ที่ความยาวคลื่น 357 nm การทดลองทำอย่างน้อย 3 ซ้ำ และรายงานผลในรูปค่าเฉลี่ยร่วมกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลและวิจารณ์

1. โครงสร้างและสมบัติของวัสดุ

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) แสดงดังรูปที่ 1 โดยพบพีคที่สอดคล้องกับ Fe_3O_4 และ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ แสดงว่าเฟสหลักหลักของวัสดุยังคงอยู่หลังการประกอบเป็นคอมโพสิต พีคของ Fe_3O_4 ปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 30.27° 35.68° 43.30° 57.21° และ 62.90° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก (220) (311) (400) (511) และ (440) ตามลำดับ ขณะที่พีคของ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 28.43° 32.78° 47.27° และ 56.04° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก (112) (200) (220) และ (312) ของโครงสร้างแบบ kesterite (Ansari et al., 2017) นอกจากนี้ยังพบพีคความเข้มต่ำที่ 38.59° ซึ่งสัมพันธ์กับระนาบผลึก (111) ของ Au บ่งชี้ว่ามี Au อยู่ในระบบ แม้ว่าพีคของ Au ในตำแหน่งอื่นจะไม่ปรากฏเด่นชัด ซึ่งอาจเป็นผลจากปริมาณ Au ที่ค่อนข้างต่ำหรือการกระจายตัวอย่างละเอียดบนผิวของวัสดุ โดยรวมผลการวิเคราะห์แสดงว่า การประกอบเป็นคอมโพสิตยังคงรักษาเฟสหลักหลักของ Fe_3O_4 และ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ไว้ได้ และพีคของ Au สนับสนุนการมีอยู่ของ Au ในระบบ

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่า อนุภาค $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ กระจายอยู่ร่วมกับ Fe_3O_4 ในคอมโพสิต โดย Fe_3O_4 ปรากฏเป็นกลุ่มอนุภาคขนาดค่อนข้างใหญ่ ซึ่งแสดงด้วยลูกศรสีเหลืองในรูปที่ 2ก ลักษณะดังกล่าวอาจเกิดจากการรวมตัวของอนุภาค Fe_3O_4 ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของอนุภาคแม่เหล็กที่มีแนวโน้มเกาะกลุ่มกันได้ง่าย (Petcharoen & Sirivat, 2012) นอกจากนี้ยังพบจุดสว่างขนาดเล็กบางตำแหน่งบนผิวของ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ซึ่งสัมพันธ์กับบริเวณที่มี Au อยู่ร่วมด้วย (รูปที่ 2ข) ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS และแผนที่การกระจายตัวของธาตุ (รูปที่ 2ค, ง) ยืนยันการมีอยู่ของ Cu Zn Sn และ S จาก $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ร่วมกับ Fe และ O จาก Fe_3O_4 รวมถึง Au โดยพบ Au กระจายอยู่บริเวณผิวของอนุภาค $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์จาก XRD และ SEM-EDS ร่วมกัน จึงสนับสนุนว่า $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ และ Au อยู่ในวัสดุคอมโพสิต

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วย UV-Vis diffuse reflectance spectroscopy (UV-Vis DRS) แสดงให้เห็นว่า $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ตอบสนองต่อแสงในช่วงวิสิเบิลได้ดี (รูปที่ 3ก) เมื่อประมาณค่าช่องว่างแถบพลังงานจาก Tauc plot พบว่า $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ และ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ ให้ค่าประมาณ 1.48 และ 1.40 eV ตามลำดับ (รูปที่ 3ข) ซึ่งบ่งชี้ว่าการตกแต่งด้วย Au สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ประมาณได้ ขณะที่วัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ ยังคงตอบสนองต่อแสงในช่วงวิสิเบิล (รูปที่ 3ก) อย่างไรก็ตาม ในงานนี้ไม่ได้ประมาณค่าช่องว่างแถบพลังงานของวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ จาก Tauc plot เนื่องจากสเปกตรัมของระบบหลายองค์ประกอบอาจได้รับอิทธิพลจากการดูดกลืนแสงของ Fe_3O_4 ร่วมด้วย

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กพบว่า Fe_3O_4 มีค่าการเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวเท่ากับ 59.33 emu g^{-1} ขณะที่วัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ มีค่า 33.53 emu g^{-1} การลดลงของค่าการเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว สัมพันธ์กับการมีองค์ประกอบที่ไม่เป็นแม่เหล็ก ได้แก่ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Au และโคโคซาน อยู่ร่วมในคอมโพสิต ซึ่งเป็นแนวโน้มที่พบได้ทั่วไปในวัสดุคอมโพสิตแม่เหล็ก (Nguyen et al., 2021) แม้ว่าค่าการเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวจะลดลง แต่วัสดุยังคงตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กและสามารถแยกออกจากสารละลายได้ด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก

2. การประเมินประสิทธิภาพเบื้องต้นในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

เมื่อประเมินประสิทธิภาพเบื้องต้นในการย่อยสลายเตตราไฮโดรคลอโรควินายด์ภายใต้แสงวิสิเบิล พบว่า $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ ให้ประสิทธิภาพการกำจัดเตตราไฮโดรคลอโรควินายด์สูงกว่า $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ภายใต้สภาวะเดียวกัน (รูปที่ 4) โดยหลังการฉายแสงเป็นเวลา 180 นาที $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ให้ประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 34% ขณะที่ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ ให้ค่า 49% ผลดังกล่าวแสดงว่า การตกแต่งด้วย Au ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเบื้องต้นในการย่อยสลายเตตราไฮโดรคลอโรควินายด์ภายใต้แสงวิสิเบิลได้

เมื่อพิจารณาร่วมกับผลการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ การที่ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ ให้ผลดีกว่าวัสดุที่ไม่มี Au น่าจะเกี่ยวข้องกับผลของ Au ต่อสมบัติทางแสงของ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ รวมทั้งบทบาทของ Au ในการส่งเสริมการแยกพาหะประจุและลดการกลับมารวมตัวของพาหะประจุที่รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานเกี่ยวกับระบบรอยต่อชนิด Schottky-like (Kumari et al., 2022) ขณะเดียวกัน การมีอยู่ของ Fe_3O_4 ยังช่วยให้วัสดุสามารถแยกออกจากระบบปฏิกิริยาได้สะดวกด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก ดังนั้น ผลการศึกษานี้จึงเป็นข้อมูลสนับสนุนเบื้องต้นว่า $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ มีความเหมาะสมสำหรับการพัฒนาต่อเป็นวัสดุโฟโตคะตะลิสต์ที่ตอบสนองต่อแสงวิสิเบิลและสามารถแยกกลับได้ด้วยสนามแม่เหล็ก

สรุป

งานวิจัยนี้สามารถเตรียมวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ ได้ โดยผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ SEM-EDS แสดงให้เห็นว่า ในวัสดุคอมโพสิตมี Fe_3O_4 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ และ Au อยู่ร่วมกัน ขณะที่ผลการวิเคราะห์ด้วย UV-Vis DRS ชี้ว่าวัสดุยังคงตอบสนองต่อแสงในช่วงวิสิเบิลได้ ส่วนการวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กพบว่า แม้ค่าการเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวของคอมโพสิตจะลดลงเมื่อเทียบกับ Fe_3O_4 แต่วัสดุยังสามารถ



แยกออกจากสารละลายได้ด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อประเมินประสิทธิภาพเบื้องต้นในการย่อยสลายเตตราไฮคลีนภายใต้แสงวิสิเบิล พบว่า $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่า $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ภายใต้สภาวะเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าการตกแต่งด้วย Au ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของวัสดุได้ ดังนั้น ผลการศึกษานี้จึงสนับสนุนว่า $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ มีความเหมาะสมสำหรับการพัฒนาต่อเป็นวัสดุโฟโตคะตะลิสต์ที่ตอบสนองต่อแสงวิสิเบิลและสามารถแยกออกจากสารละลายได้ด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก

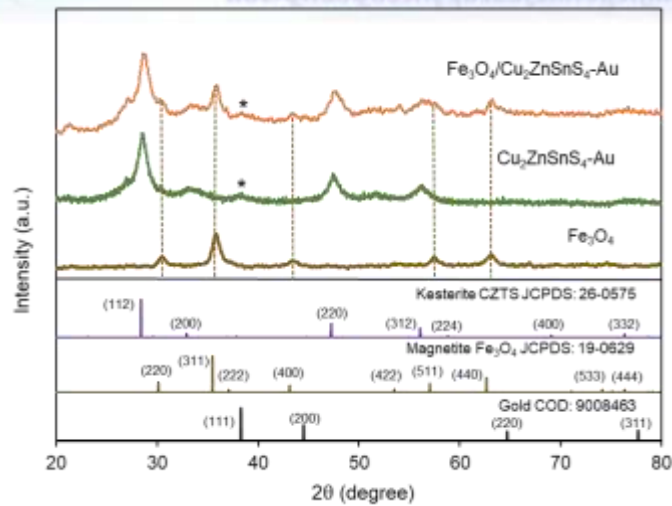
คำขอบคุณ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนสนับสนุนการวิจัย นวัตกรรมและการสร้างสรรค์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร (SRIF-JRG-2568-07)

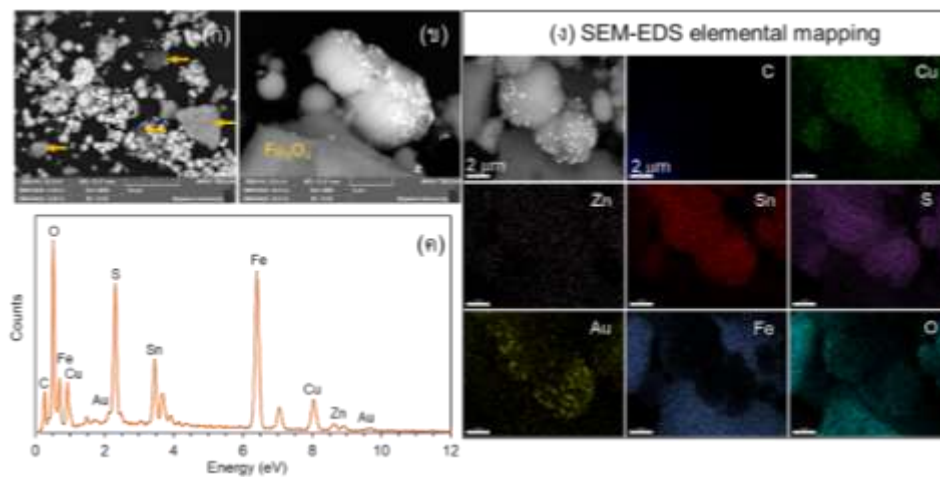


เอกสารอ้างอิง

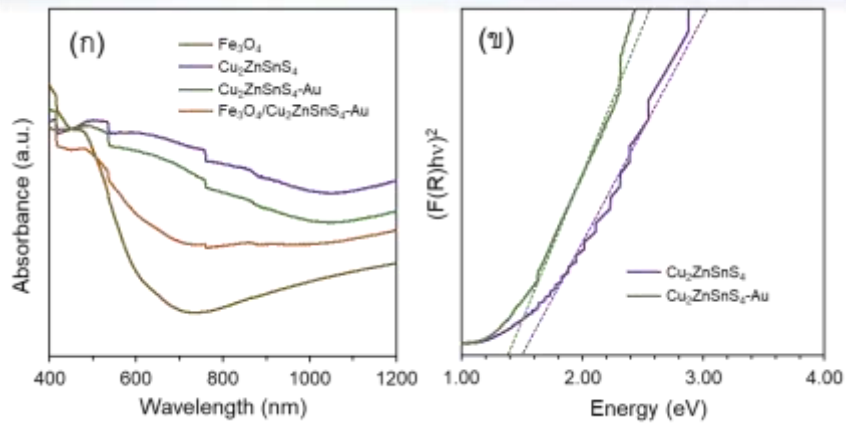
- Ansari, M. Z., Faraz, M., Munjal, S., Kumar, V., & Khare, N. (2017). Highly dispersible and uniform size $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ nanoparticles for photocatalytic application. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2402–2409.
- Das, H. T., Dutta, S., Gaurav, K., Giri, A. K., Mondal, A., Jena, R. K., & Das, N. (2024). CZTS ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$)-based nanomaterials in photocatalytic and hydrogen production applications: a recent progress towards sustainable environment. *Chemistry - An Asian Journal*, 19, e202300813. <https://doi.org/10.1002/asia.202300813>
- Dong, S., Feng, J., Fan, M., Pi, Y., Hu, L., Han, X., Liu, M., Sun, J., & Sun, J. (2015). Recent developments in heterogeneous photocatalytic water treatment using visible-light-responsive photocatalysts: a review. *RSC Advances*, 5, 14610–14630. <https://doi.org/10.1039/C4RA13734E>
- Kumari, P., Bahadur, N., Kong, L., O'Dell, L. A., Merenda, A., & Dumée, L. F. (2022). Engineering Schottky-like and heterojunction materials for enhanced photocatalysis performance: a review. *Materials Advances*, 3(5), 2309–2323. <https://doi.org/10.1039/D1MA01062J>
- Lee, D. E., Kim, M. K., Danish, M., & Jo, W. K. (2023). State-of-the-art review on photocatalysis for efficient wastewater treatment: attractive approach in photocatalyst design and parameters affecting the photocatalytic degradation. *Catalysis Communications*, 183, 106764. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2023.106764>
- Nguyen, M. D., Tran, H.-V., Xu, S., & Lee, T. R. (2021). Fe_3O_4 Nanoparticles: Structures, Synthesis, Magnetic Properties, Surface Functionalization, and Emerging Applications. *Applied Sciences*, 11(23), 11301.
- Petcharoen, K., & Sirivat, A. (2012). Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles via the chemical co-precipitation method. *Materials Science and Engineering: B*, 177(5), 421–427.
- Yu, X., Shavel, A., An, X., Luo, Z., Ibáñez, M., & Cabot, A. (2014). $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ -Pt and $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ -Au heterostructured nanoparticles for photocatalytic water splitting and pollutant degradation. *Journal of the American Chemical Society*, 136(26), 9236–9239.



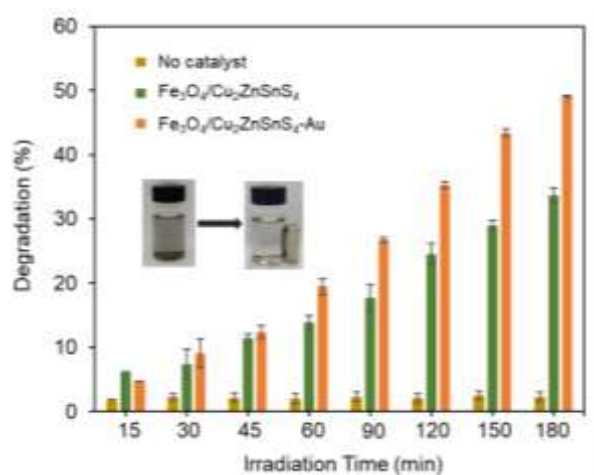
รูปที่ 1 XRD pattern ของ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ และวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ โดยสัญลักษณ์ * แสดงตำแหน่งพีคของ Au (111) ที่ 2θ เท่ากับ 38.59°



รูปที่ 2 (ก-ข) ภาพถ่าย SEM ของวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ โดยลูกศรสีเหลืองแสดงบริเวณที่พบอนุภาค Fe_3O_4 กระจายอยู่ในคอมโพสิต (ค) EDS spectrum และ (ง) แผนที่การกระจายตัวของธาตุจากการวิเคราะห์ด้วย EDS ของวัสดุคอมโพสิต



รูปที่ 3 (ก) สเปกตรัม UV-Vis DRS ของ Fe_3O_4 , $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ และวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ และ (ข) Tauc plot ของ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ และ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเบื้องต้นในการย่อยสลายเตตราไฮคลีนภายใต้แสงวิสิเบิลของ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ และ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Au}$ โดยมีระบบไม่ใส่วัสดุเป็นตัวควบคุม ภาพแทรกแสดงการแยกวัสดุคอมโพสิตออกจากสารละลายด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก



ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ของการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ราม่า

Confidence Intervals for the Parameter of the Double X Rama Distribution

อัษฎาวรรณ สอนสนาม¹ และ วราฤทธิ์ พานิชกิจโกศลกุล¹
Atcharawan Sonsanam¹ and Wararit Panichkitkosolkul¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval: CI) สำหรับพารามิเตอร์ของการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ราม่า (Double X Rama Distribution) การแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ราม่าเป็นการแจกแจงผสมรูปแบบใหม่ที่มีความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้กับข้อมูลอายุการใช้งาน (Lifetime data) และข้อมูลเกี่ยวกับความน่าเชื่อถือได้ (Reliability data) ในการศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation: MLE) เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์แบบจุด สำหรับช่วงความเชื่อมั่นที่นำเสนอมี 4 วิธี ได้แก่ ช่วงความเชื่อมั่นฐานภาวะน่าจะเป็น (Likelihood-based CI), ช่วงความเชื่อมั่นแบบวัลด์ (Wald-type CI), ช่วงความเชื่อมั่นบูตสทริป-ที (Bootstrap-t CI) และ ช่วงความเชื่อมั่นบูตสทริปแบบปรับแก้ความเอนเอียงและความเร่ง (Bias-Corrected and Accelerated Bootstrap CI: BCa) ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของช่วงความเชื่อมั่นแต่ละวิธีจะใช้การจำลองแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) โดยใช้พิจารณาค่าความน่าจะเป็นคัมรวม (Coverage Probability: CP) และค่าเฉลี่ยความกว้างของช่วง (Average Length: AL) พร้อมทั้งประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริง ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าวิธี Wald-type และ Likelihood-based ให้ผลที่มีความเสถียรและค่า CP ใกล้เคียงระดับความเชื่อมั่นที่กำหนดมากที่สุด และการประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลด้านความน่าเชื่อถือและอายุการใช้งาน

คำสำคัญ: ช่วงความเชื่อมั่น, การแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ราม่า, ภาวะน่าจะเป็นสูงสุด, วิธีบูตสทริป

Abstract

This study presents and compares confidence interval (CI) methods for the parameter of the Double X Rama distribution. The Double X Rama distribution is a newly developed mixture distribution that demonstrates flexibility and effectiveness in modeling lifetime and reliability data. Parameter estimation is performed using the maximum likelihood estimation (MLE) method. Four confidence interval approaches are considered: likelihood-based CI, Wald-type CI, bootstrap-t CI, and bias-

¹ ภาควิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120 ประเทศไทย
Department of Applied Statistics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathum Thani 12120, Thailand.

corrected and accelerated (BCa) bootstrap CI. The performance of these methods is evaluated through Monte Carlo simulation based on coverage probability (CP) and average length (AL). An application to real data is also provided to illustrate practical applicability. The results indicate that Wald-type and likelihood-based CIs are the most stable and achieve CP values closest to the nominal level in almost all scenarios, supporting the application of the Double X Rama distribution to the analysis of lifetime and reliability data.

Keyword: Double X Rama Distribution, Confidence Interval, Maximum Likelihood Estimation, Bootstrap Method

บทนำ

การแจกแจงความน่าจะเป็นมีบทบาทสำคัญในการจำลองและวิเคราะห์ข้อมูลอายุการใช้งาน (Lifetime data) ในหลากหลายสาขา เช่น วิศวกรรมความน่าเชื่อถือ ชีวสถิติ และวิทยาการประกันภัย โดยข้อมูลลักษณะนี้มักมีความเบ้ (skewed) และมีหางยาว (heavy-tailed) ส่งผลให้การแจกแจงแบบดั้งเดิม เช่น การแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง (Exponential distribution) การแจกแจงลินด์ลีย์ (Lindley distribution) และการแจกแจงรามามา (Rama distribution) ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของข้อมูลได้อย่างยืดหยุ่นเพียงพอ

ด้วยเหตุนี้ นักสถิติจึงได้พัฒนาการแจกแจงแบบผสม (Mixture distribution) ขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง Shanker (2015) ได้เสนอการแจกแจงแซงเกอร์ (Shanker distribution) และต่อมา Shanker (2017) ได้พัฒนาการแจกแจงรามามา (Rama distribution) ซึ่งเป็นการผสมระหว่างการแจกแจงแบบเลขชี้กำลังและการแจกแจงแกมมา (Gamma distribution) แสดงให้เห็นว่าสามารถอธิบายข้อมูลอายุการใช้งานได้ดีกว่าการแจกแจงแบบดั้งเดิม หลังจากนั้น Abebe et al. (2019) ได้เสนอการแจกแจงรามามาสองพารามิเตอร์แบบยกกำลัง (Two-parameter power Rama distribution) และ Eyob and Shanker (2019) ได้นำเสนอการแจกแจงรามามาแบบถ่วงน้ำหนักสองพารามิเตอร์ (Two-parameter weighted Rama distribution) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของแบบจำลอง นอกจากนี้ Onyekwere et al. (2021) ได้เสนอการแจกแจงรามามาแบบยกกำลัง (Exponentiated Rama distribution) ซึ่งมีสมบัติทางสถิติที่น่าสนใจและสามารถประยุกต์ใช้กับข้อมูลหลากหลายรูปแบบ

ในการพัฒนาต่อยอดจากการแจกแจงรามามา Etaga et al. (2023) ได้นำเสนอการแจกแจงเอ็กซ์รามามา (XRama distribution) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับข้อมูลอายุการใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นทั้งในกรณีข้อมูลสมบูรณ์และกรณีข้อมูลที่ถูกตัดปลาย (Censored data) ต่อมา Gideon et al. (2024) ได้เสนอการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์รามามา (Double XRama distribution) ซึ่งเป็นการขยายแนวคิดจากการแจกแจงเอ็กซ์รามามา โดยเป็นการผสมระหว่างการแจกแจงแบบเลขชี้กำลังและการแจกแจงรามามา ส่งผลให้การแจกแจงมีความยืดหยุ่นสูงขึ้นและสามารถอธิบายข้อมูลที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ Elangovan (2024) ได้ศึกษาการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์รามามาในเชิงของการประยุกต์ใช้งานโดยใช้โปรแกรม R เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของการแจกแจงดังกล่าว

สำหรับการประมาณค่าแบบช่วง (Interval estimation) ของพารามิเตอร์ในการแจกแจงประเภทนี้ มีการศึกษาที่เกี่ยวข้องหลายงาน เช่น Alakus and Erilli (2019) ได้ศึกษาการประมาณค่าแบบจุดและช่วง ความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ของการแจกแจงลินดลีย์ (Lindley distribution) ภายใต้ข้อมูลที่ถูกลดทอนและ ข้อมูลสมบูรณ Al-Omari et al. (2021) ได้นำเสนอการประมาณค่าพารามิเตอร์และการทดสอบสมมติฐาน สำหรับการแจกแจงรานี (Rani distribution) ในกรณีข้อมูลถูกลดทอน และ Panichkitkosolkul et al. (2025) ได้นำเสนอช่วงความเชื่อมั่นที่ปรับปรุงแล้วสำหรับพารามิเตอร์ของการแจกแจงราม่า พร้อมกับ การประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริง นอกจากนี้ Sungboonchoo (2025) ได้ศึกษาตัวประมาณภาวะน่าจะเป็นสูงสุดที่ ปรับปรุงแล้วสำหรับการแจกแจงราม่าแบบขยาย (Extended Rama distribution)

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีงานวิจัยที่นำเสนอสมบัติทางสถิติและการประมาณค่าพารามิเตอร์ของ การแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ราม่า แต่ยังคงขาดการศึกษาเชิงเปรียบเทียบเกี่ยวกับช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Intervals: CIs) สำหรับพารามิเตอร์ของการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ราม่า ดังนั้น การศึกษาและ เปรียบเทียบวิธีการเหล่านี้เมื่อข้อมูลมีการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ราม่า จึงมีความสำคัญทั้งในเชิงทฤษฎีและการ ประยุกต์ใช้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ราม่าโดยใช้ภาวะน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation: MLE)
2. เพื่อสร้างช่วงความเชื่อมั่นของพารามิเตอร์ด้วยวิธี ได้แก่ ช่วงความเชื่อมั่นฐานภาวะน่าจะเป็น (Likelihood-based CI), ช่วงความเชื่อมั่นแบบวัลด์ (Wald-type CI), ช่วงความเชื่อมั่นบูตสทราป-ที (Bootstrap-t CI) และช่วงความเชื่อมั่นบูตสทราปแบบปรับแก้ความเอนเอียงและความเร่ง (Bias-Corrected and Accelerated Bootstrap CI)
3. เพื่อประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของช่วงความเชื่อมั่นทั้ง 4 วิธี โดยใช้การจำลองแบบมอนติ คาร์โล (Monte Carlo Simulation) โดยพิจารณาค่าความน่าจะเป็นคัมรวม (Coverage Probability: CP) และค่าเฉลี่ยความกว้างของช่วง (Average Length: AL)
4. เพื่อประยุกต์ใช้ช่วงความเชื่อมั่นดังกล่าวกับข้อมูลจริง และทดสอบความเหมาะสมและความเป็นไปได้ ในเชิงปฏิบัติ

การแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ราม่า

การแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ราม่า เป็นการแจกแจงแบบต่อเนื่องที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการจำลอง ข้อมูลอายุการใช้งาน (Lifetime data) ที่มีลักษณะซับซ้อน โดยเฉพาะข้อมูลที่มีความเบ้และหางยาว ซึ่ง ไม่สามารถอธิบายได้ดีด้วยการแจกแจงแบบดั้งเดิม การแจกแจงนี้ถูกสร้างขึ้นจากแนวคิดของการแจกแจง แบบผสม โดยเป็นการรวมระหว่างการแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง ที่มีพารามิเตอร์ θ และการแจกแจงเอ็กซ์ราม่า

ทำให้การแจกแจงมีความยืดหยุ่นสูงในการปรับให้เข้ากับข้อมูลจริง ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ปอนเนนเชียล สามารถเขียนได้เป็น

$$f(x; \theta) = \frac{\theta^4}{(\theta^3 + 6)^3} [\theta^6 + 18\theta^3 + 108 + 36x^3] e^{-\theta x}; x > 0, \theta > 0$$

ขณะที่ฟังก์ชันการอยู่รอด (survival function) ซึ่งมีความสำคัญในการวิเคราะห์ข้อมูลอายุการใช้งาน สามารถเขียนได้เป็น

$$S(x) = (1 + \frac{36x\theta(6 + 3x\theta + \theta^2 x^2)}{(\theta^3 + 6)^3}) e^{-\theta x}$$

ค่าคาดหวัง (Mean) และความแปรปรวน (Variance) ของการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ปอนเนนเชียลสามารถแสดงในรูปของพารามิเตอร์ θ ได้ ซึ่งสมบัติเหล่านี้ทำให้การแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ปอนเนนเชียลมีความยืดหยุ่นในการจำลองข้อมูลที่มีลักษณะแตกต่างกันได้อย่างหลากหลาย โดยพารามิเตอร์ $\theta > 0$ เป็นพารามิเตอร์อัตรา (rate parameter) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมทั้งขนาดและรูปร่างของการแจกแจง กล่าวคือ เมื่อค่า θ มีขนาดใหญ่ขึ้น การแจกแจงจะมีค่าเฉลี่ยลดลงและมีการกระจายตัวน้อยลง ในทางกลับกัน เมื่อ θ มีขนาดเล็กลง การแจกแจงจะมีค่าเฉลี่ยสูงขึ้นและกระจายตัวมากขึ้น ค่าคาดหวังของการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ปอนเนนเชียลสามารถแสดงในรูปปิดได้เป็น

$$E(X) = \frac{(\theta^3 + 6)^3 + 648}{\theta(\theta^3 + 6)^3}$$

โดยค่าคาดหวังนี้เป็นฟังก์ชันของ θ เพียงตัวเดียว และมีความสัมพันธ์แบบผกผัน กล่าวคือ ค่า θ ที่มากขึ้นจะส่งผลให้ $E(X)$ มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติของพารามิเตอร์อัตรา

การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ปอนเนนเชียล ในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้วิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ฟังก์ชันภาวะน่าจะเป็นมีค่าสูงสุด ภายใต้กรณีข้อมูลสมบูรณ์ให้ $x_1, x_2, \dots, x_n$ เป็นตัวอย่างสุ่มจากการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์ปอนเนนเชียล ฟังก์ชันลอการิทึมภาวะน่าจะเป็น (Log-likelihood function) สามารถเขียนได้เป็น

$$\log L(x_i; \theta) = 4n \ln \theta - 3n \ln(\theta^3 + 6) - \theta \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n \ln(\theta^6 + 18\theta^3 + 108 + 36x_i^3)$$

จากนั้นทำการหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันดังกล่าวเทียบกับ θ และกำหนดให้เท่ากับศูนย์ จะได้สมการสกออร์ (score function) ซึ่งเป็นสมการไม่เชิงเส้น (Nonlinear Equation) และไม่สามารถหาคำตอบในรูปแบบปิดได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) เช่น วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) ในการหาค่าประมาณ $\hat{\theta}$

ช่วงความเชื่อมั่นฐานภาวะน่าจะเป็น

ช่วงความเชื่อมั่นฐานภาวะน่าจะเป็น เป็นวิธีการประมาณช่วงของพารามิเตอร์ที่อาศัยอัตราส่วนของฟังก์ชันภาวะน่าจะเป็น โดยมีพื้นฐานจากทฤษฎีของวิลกส์ (Wilks' theory) ซึ่งระบุว่าสถิติอัตราส่วนภาวะน่าจะเป็น จะมีการแจกแจงประมาณแบบไค-สแควร์ (Chi-square) เมื่อขนาดตัวอย่างมีค่ามาก

ภายใต้กรณีข้อมูลสมบูรณ์ ให้ $L(\theta|x)$ เป็นฟังก์ชันภาวะความน่าจะเป็น และ $\hat{\theta}_{ML}$ เป็นค่าประมาณแบบภาวะน่าจะเป็นสูงสุด ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ θ ที่ระดับความเชื่อมั่น $(1 - \alpha)100\%$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\{\theta \mid -2 \log \frac{L(\theta|x)}{L(\hat{\theta}_{ML}|x)} \leq \chi^2_{1-\alpha,1}\}$$

ซึ่งหมายถึงการพิจารณาค่าของ θ ที่ทำให้ค่าลอการิทึมภาวะน่าจะเป็น ไม่แตกต่างจากค่าสูงสุดมากเกินไปภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยในทางปฏิบัติ มักใช้รูปของลอการิทึมภาวะน่าจะเป็น ดังนี้

$$-2[l(\theta) - l(\hat{\theta}_{ML})] \leq \chi^2_{1-\alpha,1}$$

ช่วงความเชื่อมั่นแบบวัลด์

ช่วงความเชื่อมั่นแบบวัลด์ เป็นวิธีการประมาณช่วงของพารามิเตอร์ที่อาศัยสมบัติการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) ของตัวประมาณแบบภาวะน่าจะเป็นสูงสุด ภายใต้ทฤษฎีบทขีดจำกัดส่วนกลาง (Central Limit Theorem) โดยเมื่อขนาดตัวอย่างมีค่ามากเพียงพอ ค่าประมาณ $\hat{\theta}$ จะมีการแจกแจงประมาณเป็นปกติด้วยค่าเฉลี่ย θ และความแปรปรวนเท่ากับผกผันของสารสนเทศฟิชเชอร์ (inverse Fisher's information) ดังนั้น ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ θ ที่ระดับความเชื่อมั่น $(1 - \alpha)100\%$ สามารถเขียนได้เป็น

$$CI_W = [\hat{\theta} - z_{1-\alpha/2} \sqrt{I^{-1}(\hat{\theta})}, \hat{\theta} + z_{1-\alpha/2} \sqrt{I^{-1}(\hat{\theta})}]$$

โดยที่ $z_{1-\alpha/2}$ คือค่าควอนไทล์ของการแจกแจงปกติมาตรฐาน และคือค่าสารสนเทศฟิชเชอร์ ซึ่งนิยามจากอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันลอการิทึมภาวะน่าจะเป็น ดังนี้

$$I(\hat{\theta}) = -\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \log L(\theta|x)|_{\theta=\hat{\theta}}$$

สำหรับการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียล ค่าสารสนเทศฟิชเชอร์ที่สังเกตได้ สามารถคำนวณได้จากอนุพันธ์อันดับสองของลอการิทึมภาวะน่าจะเป็น และนำมาใช้ในการประมาณค่าความแปรปรวนของ $\hat{\theta}$ เพื่อสร้างช่วงความเชื่อมั่นตามแนวคิดของวัลด์ได้โดยตรง

ช่วงความเชื่อมั่นบูตสแตรป์-ที

ช่วงความเชื่อมั่นบูตสแตรป์-ที หรือที่เรียกว่า บูตสแตรป์แบบปรับให้อยู่ในรูปมาตรฐาน (studentized bootstrap) เป็นวิธีการประมาณช่วงของพารามิเตอร์ที่อาศัยเทคนิคการสุ่มตัวอย่างซ้ำ (bootstrap resampling) ร่วมกับการปรับให้อยู่ในรูปมาตรฐานของตัวประมาณ เพื่อให้สามารถประมาณการแจกแจงของสถิติได้แม่นยำมากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่การแจกแจงของตัวประมาณมีความเบ้หรือไม่เป็นไปตามสมมติฐานการแจกแจงปกติ ให้ $\hat{\theta}$ เป็นค่าประมาณของพารามิเตอร์จากข้อมูลจริง และ $s.e.(\hat{\theta})$ เป็นค่าประมาณของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากนั้นทำการสุ่มตัวอย่างซ้ำจำนวน B ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าประมาณ $\hat{\theta}_j^*$ และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน $s.e.(\hat{\theta}_j^*)$ สำหรับแต่ละตัวอย่างที่ $j = 1, 2, \dots, B$ แล้วคำนวณค่าสถิติในรูปมาตรฐาน ดังนี้

$$R_j^* = \frac{\hat{\theta}_j^* - \hat{\theta}}{s.e.(\hat{\theta}_j^*)}, \quad j = 1, 2, \dots, B$$

เมื่อได้การแจกแจงของ R_j^* แล้ว ให้ t_q^* แทนควอนไทล์ที่ q ของการแจกแจงดังกล่าว ช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ $(1 - \alpha)100\%$ สามารถเขียนได้เป็น

$$CI_{B-t} = [\hat{\theta} - t_{1-\alpha/2}^* \times s.e.(\hat{\theta}), \hat{\theta} + t_{\alpha/2}^* \times s.e.(\hat{\theta})]$$

ซึ่งวิธีนี้สามารถสะท้อนความไม่สมมาตรของการแจกแจงของตัวประมาณได้ดีกว่าวิธีที่อาศัยสมมติฐานแบบปกติ โดยเฉพาะเมื่อขนาดตัวอย่างมีขนาดเล็ก

ช่วงความเชื่อมั่นบูตสแตรป์แบบปรับแก้ความเอนเอียงและความเร่ง

ช่วงความเชื่อมั่นบูตสแตรป์แบบปรับแก้ความเอนเอียงและความเร่ง เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงความแม่นยำของช่วงความเชื่อมั่น โดยคำนึงถึงทั้งความเอนเอียง (bias) และความไม่สมมาตร (skewness) ของการแจกแจงของตัวประมาณ ซึ่งมักเกิดขึ้นในกรณีข้อมูลจริงหรือการแจกแจงที่มีความซับซ้อน ให้ $\hat{\theta}$ เป็นค่าประมาณจากข้อมูลจริง และ $\hat{\theta}^*$ เป็นค่าประมาณจากตัวอย่างบูตสแตรป์ จำนวน B ครั้ง ค่าปรับแก้ความเอนเอียง (bias-correction factor) สามารถคำนวณได้จาก

$$\hat{z}_0 = \phi^{-1}\left(\frac{\#\{\hat{\theta}^* \leq \hat{\theta}\}}{B}\right)$$

เมื่อ $\#\{\hat{\theta}^* \leq \hat{\theta}\}$ แทนจำนวนค่าประมาณบูตสแตรป์ที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าประมาณจากข้อมูลจริง $\hat{\theta}$

จากการสุ่มซ้ำทั้งหมด B ครั้ง และ $\phi^{-1}(\cdot)$ คือฟังก์ชันส่วนกลับของการแจกแจงสะสมของการแจกแจงปกติมาตรฐานขณะที่ค่าปรับความเร่ง (acceleration factor) $\hat{a}$ ได้จากวิธีแจ็กไนฟ์ (jackknife method) โดยคำนวณจากค่าประมาณที่ได้จากการลบข้อมูลที่ละหนึ่งหน่วย ดังนี้

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=0}^n (\hat{\theta}_{(-i)} - \hat{\theta}_{(-i)})^3}{6[\sum_{i=0}^n (\hat{\theta}_{(-i)} - \hat{\theta}_{(-i)})^2]^{3/2}}$$

เมื่อ $\hat{\theta}_{(-i)}$ เป็นค่าเฉลี่ยของค่าประมาณจากแจ็กไนฟ์ และ $\hat{\theta}_{(-i)}$ เป็นค่าประมาณเมื่อเอาข้อมูลลำดับที่ i ออก จากนั้นสามารถคำนวณค่าระดับเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ปรับแล้ว $\alpha_1 = \phi\{z_0 + \frac{z_0 + z_{\alpha/2}}{1 - \hat{a}(z_0 + z_{\alpha/2})}\}$ และ $\alpha_2 = \phi\{z_0 + \frac{z_0 + z_{1-(\alpha/2)}}{1 - \hat{a}(z_0 + z_{1-(\alpha/2)})}\}$ เพื่อนำไปกำหนดขอบเขตของช่วงความเชื่อมั่น โดยใช้ควอนไทล์ของการแจกแจงเชิงประจักษ์ของค่าประมาณพารามิเตอร์จากตัวอย่างบูตสแตรป์ $\hat{\theta}^*$ ดังนั้น ช่วงความเชื่อมั่นแบบ BCa สามารถเขียนได้เป็น

$$CI_{BCa} = [\hat{\theta}_{(\alpha_1)}^*, \hat{\theta}_{(\alpha_2)}^*]$$

โดยที่ $\hat{\theta}_{(\alpha_1)}^*$ และ $\hat{\theta}_{(\alpha_2)}^*$ คือควอนไทล์ลำดับที่ α_1 และ α_2 ของการแจกแจงบูตสแตรป์ของค่าประมาณพารามิเตอร์ $\hat{\theta}^*$ ตามลำดับ ทั้งนี้ ϕ คือฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของการแจกแจงปกติมาตรฐาน และ $z_{\alpha/2}$ คือควอนไทล์ของการแจกแจงปกติมาตรฐาน

การจำลองมอนติคาร์โล

ในการศึกษานี้ ได้ออกแบบการจำลองมอนติคาร์โล เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ของการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียล โดยใช้โปรแกรมสถิติ R เป็นเครื่องมือใน



การดำเนินการ โดยการจำลองด้วยวิธีมอนติคาร์โลจำนวน 1,000 รอบ สำหรับขนาดตัวอย่าง $n = 10, 20, 30, 50, 100, 200$ และ 500 ที่ค่าพารามิเตอร์จริง $\theta = 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0$ และ 2.5 การสุ่มตัวอย่างจากการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียลมาดำเนินการโดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบปฏิเสธ (Rejection sampling) โดยใช้การแจกแจงแบบเลขชี้กำลังเป็นการแจกแจงเสนอ (Proposal distribution) สำหรับวิธีบูตสแตรป์ทุกวิธี ใช้จำนวนการสุ่มซ้ำ $B = 1,000$ ครั้ง ตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ได้แก่ ค่าความน่าจะเป็นคัมรวม (Coverage Probability: CP) ซึ่งเป็นสัดส่วนของช่วงความเชื่อมั่นที่คลุมค่าพารามิเตอร์จริง ช่วงความเชื่อมั่นที่ดีควรมีค่า CP ใกล้เคียงหรือไม่ต่ำกว่าระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด $(1 - \alpha)100\%$ และค่าเฉลี่ยความกว้างของช่วง (Average Length: AL) ซึ่งวัดความแม่นยำของช่วงความเชื่อมั่น เมื่อ CP มีค่าเท่ากัน ช่วงความเชื่อมั่นที่สั้นกว่าจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า

ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์

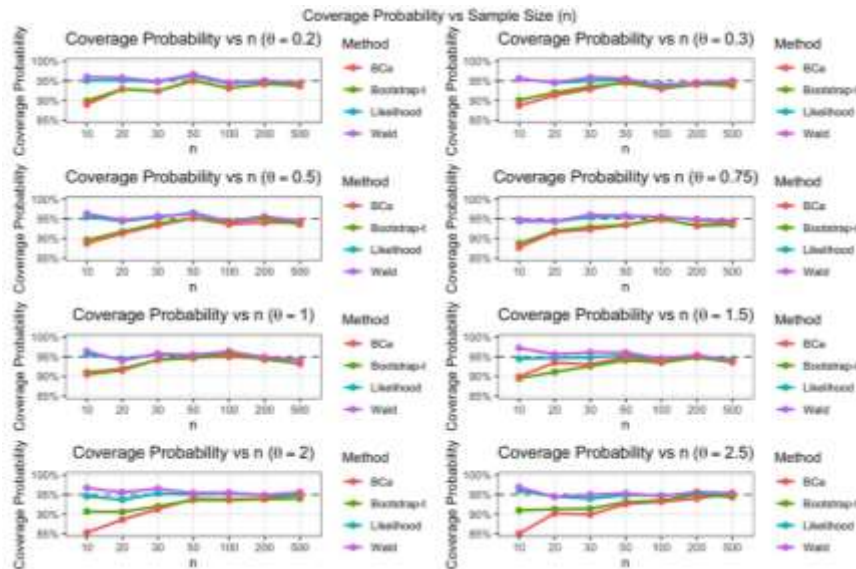
จากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียล โดยใช้วิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุดกับข้อมูลตัวอย่างสุ่มขนาด $n = 50$ ที่สร้างจากการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียลที่ $\theta = 1$ พบว่า ค่าประมาณพารามิเตอร์ $\hat{\theta} = 1.013577$ โดยมีค่า $SE = 0.05993$ และค่า $\log\text{-likelihood} = -99.470$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าประมาณพารามิเตอร์มีความเสถียรและใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์จริง โดยพารามิเตอร์ θ ในการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียลเป็นพารามิเตอร์อัตรา (rate parameter) ที่ควบคุมรูปร่างและสเกลของการแจกแจง กล่าวคือค่า $\hat{\theta} = 1.013577$ บ่งชี้ว่าค่าเฉลี่ย (mean) ของการแจกแจงที่ประมาณได้มีค่าประมาณ 2.817 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าคาดหวังของการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียลที่ $\theta = 1$ ผลการเปรียบเทียบช่วงความเชื่อมั่น 95% จากทุกวิธีแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าช่วงความเชื่อมั่นจากทุกวิธีมีความสอดคล้องกัน และคลุมค่าพารามิเตอร์จริง

ตารางที่ 1 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์และช่วงความเชื่อมั่น 95% ทั้ง 4 วิธี

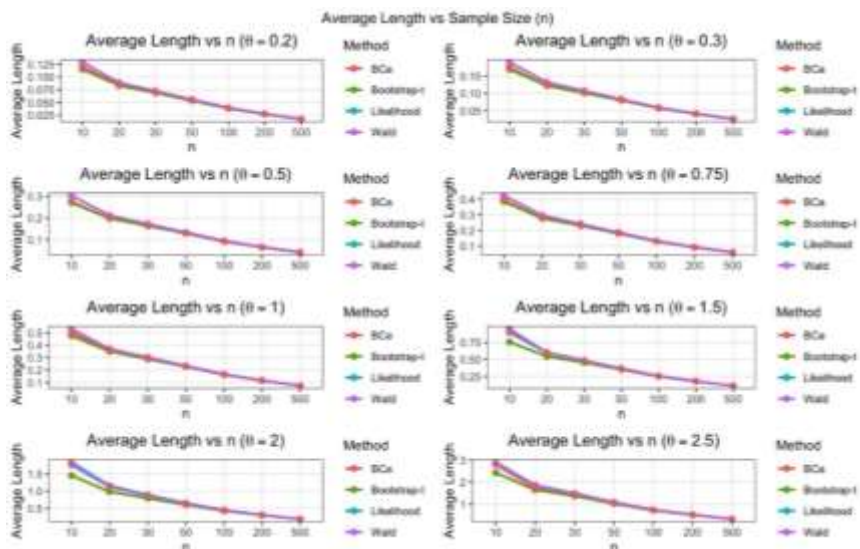
Wald	Likelihood	Bootstrap-t	BCa
[0.896, 1.131]	[0.900, 1.134]	[0.894, 1.130]	[0.918, 1.142]

ผลการจำลองมอนติคาร์โล

ในส่วนนี้นำเสนอผลการจำลองมอนติคาร์โลเพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ของการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 1 ผลการจำลองมอนติคาร์โล ค่าความน่าจะเป็นคัมรวม (Coverage Probability: CP)



รูปที่ 2 ผลการจำลองมอนติคาร์โล ค่าเฉลี่ยความกว้างของช่วง (Average Length: AL)

จากรูปที่ 1 พบว่า เมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น ค่า CP ของทุกวิธีมีแนวโน้มเข้าใกล้ระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด (0.95) อย่างชัดเจน โดยเฉพาะวิธี Wald-type และ Likelihood-based ซึ่งให้ค่า CP ที่มีความเสถียรและสม่ำเสมอมากที่สุด ในเกือบทุกสถานการณ์ ขณะที่วิธี Bootstrap-t และ BCa อาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในกรณีขนาดตัวอย่างเล็ก แต่มีแนวโน้มปรับตัวดีขึ้นเมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น ในส่วนของ AL จากรูปที่ 2 พบว่า ทุกวิธีมีแนวโน้มให้ความยาวของช่วงความเชื่อมั่นลดลงเมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีทาง

สถิติ โดยวิธี Wald-type และ Likelihood-based ให้ช่วงที่มีความสม่ำเสมอมากกว่า ในขณะที่วิธี bootstrap โดยเฉพาะ Bootstrap-t และ BCa มีแนวโน้มให้ช่วงที่กว้างกว่าในกรณีตัวอย่างขนาดเล็ก แต่จะมีความใกล้เคียงกับวิธีอื่นเมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อค่า θ มีขนาดใหญ่ขึ้น AL ของทุกวิธีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงความยากในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่จากตัวอย่างขนาดเล็ก

การประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริง: ปริมาณน้ำฝน

ในการศึกษานี้ ได้ทำการประยุกต์ใช้วิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่นสำหรับพารามิเตอร์ของการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียลกับข้อมูลจริง เพื่อแสดงประสิทธิภาพของแบบจำลองในสถานการณ์เชิงปฏิบัติ ข้อมูลที่ใช้ในการประยุกต์ใช้จริงคือข้อมูลปริมาณน้ำฝน ($n = 72$) ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 2.450 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.055 ค่าต่ำสุด 0.010 และค่าสูงสุด 8.370 สะท้อนลักษณะข้อมูลที่มีความเบ้และความแปรปรวนสูง ซึ่งเป็นลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียล

ตารางที่ 2 ผลการประมาณค่าข้อมูลปริมาณน้ำฝน

n	$\hat{\theta}$	SE	log-likelihood
72	1.0904	0.0532	-135.420

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าตัวประมาณมีความเสถียร และค่า SE ที่น้อยสะท้อนถึงความแม่นยำของการประมาณค่าพารามิเตอร์ ค่า $\hat{\theta} = 1.0904$ เป็นค่าของพารามิเตอร์อัตรา (rate parameter) ที่ประมาณได้จากข้อมูลปริมาณน้ำฝน ซึ่งบ่งชี้ว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนที่ประมาณได้จากแบบจำลองดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียลมีค่าประมาณ 2.446 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยตัวอย่าง 2.450 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายข้อมูลปริมาณน้ำฝนได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียลกับการแจกแจงอื่น ๆ (ข้อมูลปริมาณน้ำฝน)

Distribution	theta	SE	LogLik	AIC	BIC
DXRama*	1.0904372	0.05323086	-135.4202	272.8405	275.1172
Komal	0.6133628	0.05176188	-135.6368	273.2737	275.5503
XShanker	0.6215265	0.04611524	-135.6473	273.2946	275.5712
DXShanker	0.5779854	0.04260509	-135.6810	273.3621	275.6387
Lindley	0.6547188	0.05682942	-135.8151	273.6302	275.9069
Shanker	0.6906781	0.05260727	-136.1777	274.3554	276.6321
Expo	0.4080946	0.04809441	-136.5306	275.0612	277.3378
XRani	1.4467884	0.05237110	-137.4709	276.9419	279.2185
Rama	1.3027262	0.06891481	-138.6307	279.2614	281.5381
XRama	1.5394239	0.07377429	-212.7457	427.4914	429.7680

หมายเหตุ: * หมายถึงการแจกแจงที่ดีที่สุดสำหรับข้อมูลนี้ตามเกณฑ์ AIC และ BIC

จากตารางที่ 3 พบว่า การแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียล ให้ค่า AIC และ BIC ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการแจกแจงอื่นทั้งหมดที่พิจารณา แสดงให้เห็นว่าการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียล มีความสามารถในการอธิบายข้อมูลปริมาณน้ำฝนได้ดีที่สุดในกลุ่มแบบจำลองที่นำมา

ตารางที่ 4 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์และช่วงความเชื่อมั่น 95% ทั้ง 4 วิธี (ข้อมูลปริมาณน้ำฝน)

Wald	Likelihood	Bootstrap-t	BCa
[0.986, 1.195]	[0.989, 1.198]	[0.990, 1.190]	[0.992, 1.194]

จากตารางที่ 4 พบว่า ช่วงความเชื่อมั่นจากทุกวิธีมีความใกล้เคียงกันอย่างมาก โดยวิธี Likelihood-based และ Wald-type ให้ช่วงที่มีความสมมูล ขณะที่วิธี Bootstrap-t และ BCa ให้ช่วงที่มีการปรับตามลักษณะของการแจกแจงข้อมูล โดย BCa มีแนวโน้มให้ค่าขอบล่างสูงขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการปรับแก้ ความเอนเอียง ช่วงความเชื่อมั่นทั้ง 4 วิธีต่างคลุมค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้ $\hat{\theta} = 1.0904$ ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพที่ดีของทุกวิธีในการประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริง การตีความค่าประมาณ $\hat{\theta} = 1.0904$ มีดังนี้ เมื่อแทนค่าลงในสูตรค่าคาดหวัง $E(X)$ จะได้ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝนที่ประมาณได้จากแบบจำลองเท่ากับประมาณ 2.447 ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยตัวอย่างเท่ากับ 2.450 นอกจากนี้ ช่วงความเชื่อมั่น 95% ของ θ จากวิธี Wald [0.986, 1.195] สอดคล้องกับช่วงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝนที่ประมาณ [2.022, 2.965] กล่าวคือ เรามีความเชื่อมั่น 95% ว่าค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝนที่แท้จริงของประชากรอยู่ในช่วงดังกล่าว ทั้งนี้ ช่วงความเชื่อมั่น 95% สำหรับพารามิเตอร์ θ ที่ได้จากทุกวิธีไม่ครอบคลุมค่า 1.0 แสดงให้เห็นว่าอัตราการแจกแจงของปริมาณน้ำฝนชุดข้อมูลนี้แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากค่า 1.0 และการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียลที่ประมาณได้สามารถให้ช่วงความเชื่อมั่นที่สอดคล้องกันจากทุกวิธี

สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอและเปรียบเทียบวิธีการสร้างช่วงความเชื่อมั่นจำนวน 4 วิธี สำหรับพารามิเตอร์ของการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียล ได้แก่ Likelihood-based CI, Wald-type CI, Bootstrap-t CI และ Bias-Corrected and Accelerated (BCa) Bootstrap CI

ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า วิธี Wald-type และ likelihood-based ให้ผลลัพธ์ที่มีความเสถียรและมีค่า CP ใกล้เคียงระดับความเชื่อมั่นที่กำหนดมากที่สุด ขณะที่วิธี bootstrap มีความยืดหยุ่นสูงและเหมาะสมในกรณีที่สมมติฐานทางสถิติไม่เป็นไปตามเงื่อนไข แต่ควรใช้ด้วยความระมัดระวังในกรณีตัวอย่างขนาดเล็ก เนื่องจากอาจให้ค่า CP ต่ำกว่าระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด นอกจากนี้ พบว่าประสิทธิภาพของทุกวิธีดีขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น



สำหรับการประยุกต์ใช้กับข้อมูลปริมาณน้ำฝน แสดงให้เห็นว่าการแจกแจงดับเบิลเอ็กซ์โพเนนเชียลมีความเหมาะสมในการอธิบายข้อมูล โดยสรุป งานวิจัยนี้ช่วยเติมเต็มองค์ความรู้ด้านการประมาณค่าแบบช่วงสำหรับการแจกแจงแบบผสม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิเคราะห์ข้อมูลอายุการใช้งานได้อย่างเหมาะสม



เอกสารอ้างอิง

- Abebe B, Tesfay M, Eyob T, Shanker R. (2019). A two-parameter power Rama distribution with properties and applications. *Biometrics & Biostatistics International Journal*, 8, 6-11.
- Alakus K, Erilli A. (2019). Point and Confidence Interval Estimation of the Parameter and Survival Function for Lindley Distribution Under Censored and Uncensored Data. *Turkiye Klinikleri Journal of Biostatistics*, 11, 198-212.
- Al-Omari Al, Aidi K, Seddik-Ameur N. (2021). A Two Parameters Rani Distribution: Estimation and Tests for Right Censoring Data with an Application. *Pakistan Journal of Statistics and Operation Research*, 17, 1037-1049.
- Elangovan R. (2024). A New Abstraction of Double XRAMA Distribution and its Applications using R. *International Conference on Innovations in Communications, Electrical and Computer Engineering (ICICEC)*, 1-5.
- Etage HO, Onyekwere CK, Lydia OI, Nwankwo MP, Oramulu DO, Obulezi OJ. (2023). Estimation of the Xrama Distribution Parameter Under Complete and Progressive Type-II Censored Schemes. *Sch Scholars Journal of Physics Mathematics and Statistics*, 10, 203-219.
- Eyob T, Shanker R. (2019). A Two-Parameter Weighted Rama Distribution with Properties and Application. *Universal Journal of Mathematics and Applications*, 2, 48-58.
- Gideon DU, Ibeakuzie PO, Ekemezie N, Nwankwo MP, Oramulu DO, Etage HO. (2024). The Double XRAMA Distribution: Theory and Applications. *Earthline Journal of Mathematical Sciences*, 14, 477-500.
- Onyekwere CK, Osuji GA, Enogwe SU, Okoro MC, Ihedioha VN. (2021). Exponentiated Rama Distribution: Properties and Application. *Mathematical Theory and Modeling*, 11, 19-31.
- Panichkitkosolkul W, Khruachalee K, Volodin A. (2025). Enhancing Inference for Rama Distribution: Confidence Intervals and Their Applications. *Journal of Statistical Research*, 59, 107-129.
- Shanker R. (2015). Shanker distribution and its Applications. *International Journal of Statistics and Applications*, 5, 338-348.
- Shanker R. (2017). Rama Distribution and Its Application. *International Journal of Statistics and*



Applications.,7, 26-35.

Sungboonchoo C. (2025). Improved Maximum Likelihood Estimator of the Extended Rama Distribution with

Application to Lifetime Data. Science and Technology Indonesia.,10, 80-87.

การวัดคุณภาพชีวิตด้านสุขภาพในผู้ป่วยเด็กโรคไตระยะสุดท้ายที่ได้รับการรักษาด้วยการฟอกเลือดด้วยเครื่องไตเทียมและการล้างไตทางช่องท้องในประเทศเวียดนาม

Measurement of Health-related Quality of Life in Vietnamese Children with End-stage Kidney Disease on Hemodialysis and Peritoneal Dialysis

แองห์ เหงียน ไทย เวือง¹, คีตาพร ยังคง¹, อาทอร์ ริวไพบูลย์¹, จุง กวาง โว²

Anh Nguyen Thai Vuong¹, Sitaporn Youngkong¹, Arthorn Riewpaiboon¹, Trung Quang Vo²

บทคัดย่อ

โรคไตเรื้อรังระยะสุดท้ายในเด็ก (ESKD) และการบำบัดทดแทนไต (RRT) ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อการพัฒนาการของเด็ก อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเปรียบเทียบคุณภาพชีวิตที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพ (HRQoL) ระหว่างการบำบัดทดแทนไตในรูปแบบต่าง ๆ ในประเทศเวียดนามยังมีอยู่อย่างจำกัด การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินและเปรียบเทียบคุณภาพชีวิต ระหว่างเด็กที่ได้รับการฟอกเลือดด้วยเครื่องไตเทียม (HD) และการล้างไตทางช่องท้อง (PD) รวมถึงระบุปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพชีวิตของเด็กกลุ่มนี้ การศึกษานี้เป็นการศึกษาแบบภาคตัดขวาง (Cross-sectional study) ณ โรงพยาบาลเด็ก 2 นครโฮจิมินห์ ข้อมูลพื้นฐานและข้อมูลทางคลินิกถูกรวบรวมจากเวชระเบียน ขณะที่ข้อมูลด้านเศรษฐกิจและสังคมรวมถึงคุณภาพชีวิต ได้จากการสัมภาษณ์ผู้ปกครองหรือผู้ดูแลหลัก โดยใช้แบบประเมิน PedsQL 4.0 ฉบับภาษาไทยเวียดนาม ผลการศึกษา พบว่า จากกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 68 ราย (HD 37 ราย และ PD 31 ราย) มีอายุเฉลี่ย 12.6 ปี และมีระยะเวลาการบำบัดทดแทนไตเฉลี่ย 1.9 ปี คะแนนรวมคุณภาพชีวิตเฉลี่ยอยู่ที่ 45.2 ± 18.6 ซึ่งบ่งชี้ถึงภาวะสุขภาพโดยรวมที่อยู่ในระดับต่ำ โดยด้านการเรียนเป็นด้านที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด รองลงมาคือด้านสุขภาพกาย ทั้งนี้ ผู้ป่วยกลุ่ม PD มีคะแนนรวมคุณภาพชีวิตสูงกว่ากลุ่ม HD เล็กน้อย (46.0 เทียบกับ 44.6) แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณพบว่า สาเหตุของโรคที่เกิดจากพยาธิสภาพของหน่วยไต (Glomerular disease), โรคปอดอักเสบ และผู้ดูแลหลักที่ไม่ได้ประกอบอาชีพ เป็นปัจจัยหลักที่ทำนายถึงคุณภาพชีวิตที่ลดลง นอกจากนี้ระยะเวลาการบำบัดทดแทนไตที่ยาวนานยังมีความสัมพันธ์กับคุณภาพชีวิตที่ต่ำลงอีกด้วย อาจสรุปได้ว่า ผู้ป่วยเด็กโรคไตเรื้อรังระยะสุดท้ายในประเทศเวียดนามมีคุณภาพชีวิตอยู่ในระดับต่ำมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการมีส่วนร่วมในโรงเรียน

¹ ภาสัชศาสตร์สังคม เศรษฐกิจ และการบริหาร ภาควิชาเภสัชกรรม คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

Social, Economic, and Administrative Pharmacy Programme, Faculty of Pharmacy, Mahidol University, Bangkok, Thailand

² ภาควิชาเภสัชศาสตร์บริหารและเศรษฐศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยแพทยศาสตร์ฟามห่งกัทซ์ นครโฮจิมินห์ ประเทศเวียดนาม

Department of Administrative and Economic Pharmacy, Faculty of Pharmacy, Pham Ngoc Thach University of Medicine, Ho Chi Minh City, Vietnam



แม้จะไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างรูปแบบการบำบัด แต่กลุ่ม PD มีแนวโน้มของคุณภาพชีวิตที่ดีกว่า ดังนั้นการเลือกวิธีการฟอกไตไม่ควรพิจารณาเฉพาะตัวชี้วัดทางการแพทย์เท่านั้น แต่ควรใช้กระบวนการตัดสินใจร่วมกันโดยคำนึงถึงความท้าทายทางจิตสังคมและปัจจัยเชิงปฏิบัติที่เด็กและครอบครัวต้องเผชิญ

คำสำคัญ: คุณภาพชีวิต, โรคไตระยะสุดท้าย, การฟอกเลือดด้วยเครื่องไตเทียม, การล้างไตทางช่องท้อง, ผู้ป่วยเด็ก, ประเทศเวียดนาม

Abstract

Pediatric end-stage kidney disease (ESKD) and its subsequent renal replacement therapies (RRT) impose significant burdens on children's development. In Vietnam, data comparing health-related quality of life (HRQoL) between different dialysis modalities remains scarce. This study aimed to assess and compare HRQoL between children receiving hemodialysis (HD) and peritoneal dialysis (PD), and to identify factors associated with their HRQoL. A cross-sectional study was conducted at Children's Hospital 2, Ho Chi Minh City. Demographic and clinical data were extracted from medical records, while caregiver interviews collected socioeconomic information and HRQoL using the Vietnamese version of the Pediatric Quality of Life Inventory (PedsQL 4.0). Among 68 participants (37 HD, 31 PD), the mean age was 12.6 years, and the average dialysis duration was 1.9 years. The mean total HRQoL score was 45.2 ± 18.6 , indicating poor overall well-being. School functioning was the most affected domain, followed by physical health. PD patients showed slightly higher total HRQoL scores than HD patients (46.0 vs. 44.6), although the differences were not statistically significant. Multivariate regression analysis identified glomerular disease etiology, pneumonia, and unemployed primary caregiver as significant predictors of lower HRQoL, while longer dialysis duration was also associated with poorer outcomes. Pediatric ESKD patients in Vietnam experience critically low HRQoL, particularly regarding school participation. Although no statistically significant difference was found between modalities, the trend favored PD. Dialysis modality prescription should move beyond medical indicators to incorporate shared decisions that address the psychosocial and practical challenges faced by these children and their families.

Keyword: Quality of life, End-stage kidney disease, hemodialysis, peritoneal dialysis, children, Vietnam



Introduction

Chronic kidney disease (CKD) is characterized by persistent structural or functional kidney abnormalities that can progress to end-stage kidney disease (ESKD). It represents the terminal stage of renal failure, where kidney function is insufficient to sustain life without renal replacement therapy (RRT). Globally, CKD affects over 850 million individuals, with a disproportionately high burden in low- and lower-middle-income countries (LLMICs). In these settings, limited public awareness and delayed diagnoses often lead to rapid progression to ESKD and increased mortality rates (Thurlow et al., 2021). Among the pediatric populations, the impact is particularly severe; children with ESKD face a 30- to 60-fold higher risk of mortality compared to their healthy peers. While epidemiological data remain scarce in developing regions, registration data from Europe and the United States indicate a prevalence of 15 to 75 cases per million children, with incidence rates projected to rise over the next two decades (Harada et al., 2022).

To maintain life in pediatric ESKD, RRT modalities, including hemodialysis (HD), peritoneal dialysis (PD), and kidney transplantation, are essential. Although transplantation is the gold standard for long-term outcomes, HD and PD remain the primary sustainable treatments due to chronic organ shortages. Globally, and especially in LLMICs, HD is the predominant modality because late-stage clinical presentations often necessitate urgent, in-center stabilization. Conversely, home-based PD is widespread only in several countries with established supportive policies and early-detection programs (Thurlow et al., 2021). Regardless of the modality, long-term dialysis imposes substantial challenges on children, including frequent hospitalizations, school disruption, and restricted daily activities, all of which may adversely affect health-related quality of life (HRQoL).

In Vietnam, CKD has emerged as a critical public health concern, affecting over 10 million individuals with approximately 8,000 new cases and high mortality rates reported annually. Children's Hospital 2, the sole tertiary healthcare facility accredited for pediatric dialysis in southern Vietnam, manages a significant cohort of these patients, with over half progressing to ESKD requiring dialysis (Vietnam, 2023). Historically and contextually, HD is the favored modality in this setting, while PD is considered a second-line therapy. While HD requires multiple weekly in-center sessions that may restrict social and school participation, PD offers the flexibility of home-based care but requires multiple daily exchanges and may cause physical discomfort or body image concerns. Despite these distinct clinical and lifestyle implications, there is currently a dearth of evidence directly comparing the HRQoL of pediatric patients undergoing HD versus PD within the Vietnamese context. Understanding these impacts is vital for optimizing patient-centered care and informing policy decisions regarding RRT modality distribution.



Objective

To evaluate and compare the HRQoL among pediatric patients with ESKD undergoing HD versus PD, and to identify the factors associated with their quality of life in Vietnam.

Materials and Method

Study design, study site, and study population

This cross-sectional study was conducted at the Department of Nephrology–Endocrinology, Children's Hospital 2, in Ho Chi Minh City, Vietnam. The study enrolled pediatric patients (and their primary caregivers) who received HD or PD between January 1st, 2024, and December 31st, 2024. All pediatric patients aged less than 16 years and primarily diagnosed with ESKD (ICD-10 code N18.5) were included in this study. Patients with incomplete medical records or missing clinical data, and patients or primary caregivers who declined to participate or were unable to provide informed consent, were omitted.

Data collection and data analysis

Patient demographic and clinical data, including gender, age, dialysis duration, ESKD etiology, and presence of complications, were retrospectively extracted from their medical records. Concurrently, face-to-face interviews were performed with primary caregivers to obtain their socioeconomic data (gender, age, household income) and assess quality of life. HRQoL was assessed using the Vietnamese version of the Pediatric Quality of Life Inventory (PedsQL) 4.0 Generic Core Scale (Varni et al., 2003). A validated instrument consists of 21–23 items across four domains: physical, emotional, social, and school functioning. Items were rated on a five-point Likert scale (0=never, 1=almost never, 2=sometimes, 3=often, 4=almost always) and linearly transformed to a 0–100 scale, where higher scores represent superior HRQoL. Total HRQoL scores were calculated as the sum of items divided by the number of questions answered.

Statistical analysis

Data were analyzed using IBM SPSS Statistics version 20.0. Descriptive statistics were used to summarize participant characteristics. Data normality was assessed using the Shapiro–Wilk test, which indicated a non-normal distribution ($p < 0.05$). Hence, the Mann–Whitney U test and Chi-square test were employed to compare demographic, clinical, and socioeconomic characteristics, as well as HRQoL scores between dialysis modalities. To identify factors associated with HRQoL, a multivariate entered linear regression with natural logarithm transformation of total HRQoL score was conducted, in which categorical variables were converted into dummy variables. Dialysis modality, clinical characteristics, and socioeconomic variables were included as independent variables in the regression model to determine their impact on the total HRQoL score.



Ethical consideration

This study protocol received ethical approval from the Institutional Review Board of Mahidol University (No.78.0319/EC.0215) and the Biomedical Research Ethics Committee of Children's Hospital 2 (No.62/GCN-BVND2). Formal written informed consent was obtained from all caregivers before the interview.

Result and Discussion

Participant characteristics

A total of 82 pediatric patients with ESKD undergoing dialysis were identified, of whom 68 (82.9%) consented to participate. As shown in Table 1, no significant differences in baseline characteristics were observed between the HD and PD groups. The majority of the cohort was male, with a mean age of 12.6 years and a mean dialysis duration of 1.9 years. Notably, the HD group had a significantly higher proportion of unemployed primary caregivers and lower socioeconomic status compared to the PD group ($p < 0.05$).

Health-related quality of life (HRQoL)

The overall cohort reported a mean total HRQoL score of 45.2 ± 18.6 , reflecting a relatively poor level of perceived well-being (Table 2). Among the specific domains, school functioning was the most severely impaired, followed by physical health. While patients in the PD group showed slightly higher scores across most HRQoL domains versus the HD group, these differences were not statistically significant ($p > 0.05$).

Factors associated with HRQoL

Several clinical and socioeconomic factors were found to be associated with lower total HRQoL scores, comprising of glomerular disease etiology ($\Delta = -15.24$), lower household income ($\Delta = -12.88$), unemployed primary caregiver ($\Delta = -12.84$), pneumonia ($\Delta = -12.12$), hypertension ($\Delta = -12.07$), and cardiopulmonary disease ($\Delta = -11.71$). The final multivariate regression model with a moderately acceptable model fit satisfied all statistical assumptions, i.e., homoscedasticity, absence of multicollinearity, and normal distribution of residuals. Glomerular disease etiology, presence of pneumonia, and having an unemployed primary caregiver remained significant independent predictors of reduced HRQoL (Table 3). In addition, longer dialysis duration was significantly associated with a decline in HRQoL, reflecting the terminal severity and chronicity of ESKD.



Discussion

To our knowledge, this study is the first to evaluate and compare HRQoL among pediatric ESKD patients undergoing HD and PD in Vietnam. Our findings reveal a critically low HRQoL in this population (mean 45.2 ± 18.6 , which is substantially lower than the scores reported for healthy Vietnamese children (mean 84.0 ± 10.0). This disparity underscores the profound psychosocial and physical burden that ESKD and its required treatments impose on the pediatric population. Consistent with previous research findings in northern Vietnam, which reported a mean HRQoL score of 60.4 ± 20.1 among ESKD children, our study identified school and physical functioning as the most severely affected domains (Duy et al., 2025). The particularly low school functioning scores in our cohort likely reflect severe educational disruption, as over 90% of our participants had discontinued formal schooling. This high rate of school attrition is a concerning indicator of the long-term disease burden and the inflexible demands of dialysis schedules in the Vietnamese healthcare context. Furthermore, linear regressions demonstrated that prolonged dialysis duration was associated with poorer HRQoL, reflecting the persistent psychosocial and functional consequences of ESKD in children. These findings supplementally highlight the importance of multidimensional supportive interventions, such as psychosocial counseling, educational support, and social welfare assistance, to facilitate children's adaptation to daily life to maximize quality of life outcomes given long-term healthcare administration.

Although PD patients demonstrated slightly higher HRQoL scores across most domains compared to HD patients excepting the social dimension, these differences were not statistically significant. This trend aligns with the hypothesis that home-based PD may offer greater lifestyle flexibility and less disruption to daily activities than in-center HD. Notably, our findings mirror a broader pattern in the literature. While a recent systematic review using disease-specific PedsQL 3.0 ESRD module found a significant HRQoL advantage for PD (standardized mean difference 0.86; 95% CI: 0.27–1.45), studies using the generic PedsQL 4.0, as in the present study, have shown less pronounced differences. This suggests that while generic instruments are valuable for cross-population comparison, they may lack the sensitivity required to capture specific clinical nuances that differentiate dialysis modalities (Doshi et al., 2024). Our findings showed that poorer HRQoL scores were linked to patients with socioeconomic disadvantages, such as unemployed caregivers and lower household income, more likely observed in the HD group. Due to frequent in-center HD sessions, affected families may impose substantial caregiving and financial burdens, detrimentally influencing long-term treatment adherence, nutritional support, and overall care capacity, particularly among rural households.

Several limitations should be considered when interpreting these results. First, the single-center design and relatively small sample size at a tertiary facility may limit the generalizability of our findings to the broader Vietnamese population. Second, the cross-sectional nature of the study



คณะผู้ทรงคุณวุฒิระดับชาติด้านวิชาการและการวิจัย

precludes the determination of causal relationships between dialysis modalities and HRQoL outcomes. Future research should prioritize multicenter longitudinal cohorts and incorporate a combination of both generic and disease-specific instruments to provide a more comprehensive assessment of HRQoL in this vulnerable population, facilitating routine clinical practice and health policy planning.

Conclusion

Pediatric end-stage kidney disease and long-term dialysis exert a profound negative impact on the daily functioning and psychosocial well-being of children in Vietnam, particularly school participation and physical activity. Although our study found no statistically significant difference between modalities, the higher scores observed in the peritoneal dialysis group suggest that home-based therapy may offer greater lifestyle flexibility and reduce social disruption compared to in-center HD. As health-related quality of life is an important patient-reported outcome, the selection of a dialysis modality should not be based on clinical indicators alone. Instead, it should be the result of a shared decision-making process among clinicians, patients, and caregivers that carefully balances medical necessity with the psychosocial and practical realities of the child's life.

Acknowledgement

This study was conducted as part of the Master's Degree in Social, Economic, and Administrative Pharmacy (International Program), Faculty of Pharmacy, Mahidol University, and was supported by the 2023 Mahidol Postgraduate Scholarship from the Faculty of Graduate Studies, Mahidol University. The authors would like to express their sincere gratitude to the administrative staff and healthcare professionals at Children's Hospital 2 for their valuable support and cooperation throughout the study.



Reference

- Doshi, K., Raina, R., Ng, K. H., Koch, V., Bhatt, G. C., Nada, A., Foresi, B., Kamalakkannan, S. S., McCulloch, M., Sethi, S., & de Ferris, M. D.-G. (2024). Health-related quality of life for pediatric patients with end-stage kidney disease: A systematic review and meta-analysis of the Pediatric Quality of Life Inventory (PedsQL). *Hemodialysis International*, 28(2), 198-215. <https://doi.org/10.1111/hdi.13138>
- Duy, T.V., Trinh, N.D., Huong, N.T., Khai, N.X., Hoang, T., Hanh, N.T.M. (2025). Assessment of health-related quality of life in patients with end-stage kidney disease at the National Children's Hospital. *Vietnam Medical Journal*, 550(2). <https://doi.org/10.51298/vmj.v546i2.12628>
- Harada, R., Hamasaki, Y., Okuda, Y., Hamada, R., & Ishikura, K. (2022). Epidemiology of pediatric chronic kidney disease/kidney failure: learning from registries and cohort studies. *Pediatric nephrology*, 37(6), 1215-1229. <https://doi.org/10.1007/s00467-021-05145-1>
- Thurlow, J. S., Joshi, M., et al. (2021). Global Epidemiology of End-Stage Kidney Disease and Disparities in Kidney Replacement Therapy. *American Journal of Nephrology*, 52(2), 98-107. <https://doi.org/10.1159/000514550>
- Varni, J. W., Burwinkle, et al. (2003). The PedsQL™ * 4.0 as a pediatric population health measure: feasibility, reliability, and validity. *Ambulatory pediatrics*, 3(6), 329-341. [https://doi.org/10.1367/1539-4409\(2003\)003<0329:tpaapp>2.0.co;2](https://doi.org/10.1367/1539-4409(2003)003<0329:tpaapp>2.0.co;2)
- Socialist Republic of Vietnam (2023). The importance of early diagnosis and intervention of CKD. Online Newspaper Communist Party of Vietnam.

Table 1. Participant characteristics

	All patients (N = 68)		HD patients (N=37)		PD patients (N=31)		P value
	N	(%)	N	(%)	N	(%)	
Gender (Male)	38	55.88	22	59.46	16	51.61	0.516
Age (years), Mean±SD	12.6±2.2		12.7±1.9		12.4±2.6		0.955
Etiology of ESKD as glomerular diseases	15	22.06	8	21.62	7	22.58	0.983
Dialysis duration (years), Mean±SD	1.9±1.2		1.9±1.2		2.0±1.1		0.777
Anemia	54	79.41	32	86.48	22	70.97	0.115
Hypertension	45	62.17	28	75.68	17	54.84	0.070
Cardiopulmonary disease	37	54.41	20	54.05	17	54.84	0.948
Pneumonia	21	30.88	11	29.73	10	32.26	0.822
Epilepsy/ Seizure	17	25.00	10	27.03	7	22.58	0.673
Primary caregiver (PC) is the mother	52	76.47	29	78.38	23	74.19	0.914
PC's age (years), Mean±SD	43.4±10.1		45.0±10.8		41.5±8.9		0.164
PC being unemployed/retired	39	57.36	24	64.86	15	48.39	0.037
Monthly household income < USD 413.82	39	57.35	27	72.97	12	38.71	0.005

Table 2. Health-related quality of life score between pediatric ESKD patients treated with dialysis

	All patients (N = 68)		HD patients (N = 37)		PD patients (N = 31)		P value
	Mean±SD	95% CI	Mean±SD	95% CI	Mean±SD	95% CI	
Physical health	36.36±26.48	29.85- 42.87	35.47±26.55	26.62- 44.33	37.50±26.82	27.30- 47.70	0.801
Psychological health	49.97±17.08	45.78- 54.17	49.50±17.05	43.82- 55.19	50.57±17.40	43.96- 57.19	0.729
Emotional dimension	63.64±23.85	57.77- 69.50	61.89±23.70	53.99- 69.79	65.86±24.28	56.63- 75.10	0.456
Social dimension	61.29±23.38	55.54- 67.03	62.16±25.10	53.79- 70.53	60.17±21.36	52.05- 68.30	0.803
School dimension	25.00±18.81	20.38- 29.62	24.46±17.51	18.62- 30.30	25.69±20.65	17.84- 33.54	0.907
Total HRQoL score	45.24±18.59	40.67- 49.81	44.62±18.74	38.38- 50.87	46.03±18.69	38.92- 53.14	0.670



Table 3. Factors associated with reduced health-related quality of life

Variables (N = 68)	Total HRQoL score			
	Coefficient	SE	95% CI	P value
Intercept	4.309	0.110	4.088-4.529	<0.001
Dialysis duration (years)	-0.138	0.040	-0.217-(-0.058)	0.001
Dialysis modality as HD (Ref: PD)	-0.008	0.092	-0.193-(-0.177)	0.931
Etiology of ESKD as glomerular diseases (Ref: Others)	-0.442	0.110	-0.661-(-0.222)	<0.001
Pneumonia (Ref: No)	-0.297	0.105	-0.506-(-0.088)	<0.006
Primary caregiver being unemployed/retired (Ref: Informal/ Formal)	-0.246	0.095	-0.436-(-0.057)	0.007

Note: The regression was applied by Enter method; Y = Natural log of health-related quality of life of ESKD children treated with dialysis modality; Adjusted $R^2 = 0.417$, p-value of F-test less than 0.001, with Durbin-Watson = 2.248, Leverage statistics = 0.076, Cook's distance = 0.017, VIF < 1.197.



การพัฒนาระบบยืม-คืน ครุภัณฑ์ออนไลน์โดยใช้ AppSheet โครงการจัดตั้งวิทยาเขต อำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล

The Development of Online Asset Borrowing and Returning System using AppSheet for
Amnatcharoen Campus Project, Mahidol University

เทวราช ทิพบุตร¹ และ อานนท์ ยอดหอ¹
Tewarat Thipaut¹ and Anon Yodho¹

บทคัดย่อ

งานสื่อสารองค์กร กลุ่มอำนวยการ โครงการจัดตั้งวิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล เป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่สนับสนุนการเรียนการสอน การวิจัย และการบริการวิชาการ ซึ่งมีการยืมครุภัณฑ์ด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ เพื่อนำไปใช้กับพันธกิจต่าง ๆ ของส่วนงาน การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาระบบยืม-คืนครุภัณฑ์ออนไลน์ของโครงการจัดตั้งวิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล และเพื่อประเมินความพึงพอใจของบุคลากรและนักศึกษา โครงการจัดตั้งวิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล หลังการใช้ระบบยืม-คืนครุภัณฑ์ออนไลน์ กลุ่มประชากรคือ บุคลากรสายวิชาการ บุคลากรสายสนับสนุน และนักศึกษา โครงการจัดตั้งวิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล ซึ่งเป็นผู้ใช้งานระบบ จำนวน 104 คน คณะผู้วิจัยได้พัฒนาระบบยืม-คืนครุภัณฑ์ออนไลน์โดยประยุกต์ใช้แอปพลิเคชัน AppSheet เชื่อมต่อกับเป็นแหล่งข้อมูล และใช้ Barcode เลขครุภัณฑ์บนตัวเครื่องในการสแกนเพื่อยืมและคืน ผลการศึกษาพบว่า การพัฒนาระบบยืม-คืนครุภัณฑ์ออนไลน์สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้เป็นอย่างดี จากการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ พบว่า มีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 4.33$, S.D. = 0.57)

คำสำคัญ : ระบบยืม-คืน ครุภัณฑ์, แอปชีต, บาร์โค้ด

Abstract

The Corporate Communication Unit and General Administration Division of Amnatcharoen Campus Project, Mahidol University, serve to provide support for teaching, learning, research, and academic services. The unit also manages the borrowing of durable articles, especially IT equipment, to support the various missions. The objectives of this research are: 1) to develop an online durable articles borrowing and returning system for Amnatcharoen Campus Project, Mahidol University and 2) to evaluate the satisfaction of the involved staff and students after using the system. The population

¹ โครงการจัดตั้งวิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล อำนาจเจริญ 37000 ประเทศไทย
Amnatcharoen Campus Project, Mahidol University, Amnatcharoen 37000, Thailand.



consisted of 104 system users, including academic staff, support staff, and students of Amnatcharoen Campus Project, Mahidol University. The researchers developed an online durable articles borrowing and returning system via AppSheet application integrated with data source. Furthermore, durable article number barcodes were used for scanning within the borrowing and returning system. The results revealed that the developed online durable article borrowing and returning system was effectively implemented. Additionally, the satisfaction of users was at a high level ($\bar{x} = 4.33$, S.D. = 0.57).

Keywords : Durable article borrowing and returning system, AppSheet, Barcode

บทนำ

การบริหารจัดการครุภัณฑ์ภายในองค์กรถือเป็นภารกิจสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดำเนินงานขององค์กร โดยเฉพาะอุปกรณ์เทคโนโลยีสารสนเทศ เช่น โน้ตบุ๊ก ชุดกระจายเสียงเคลื่อนที่ และอุปกรณ์ต่อสัญญาณภาพและเสียง ล้วนเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญยิ่งในการสนับสนุนการปฏิบัติงานของบุคลากร การจัดการเรียนการสอน การดำเนินงานวิจัย และการให้บริการวิชาการ การบริหารจัดการครุภัณฑ์เหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งที่องค์กรสมัยใหม่ต้องให้ความสำคัญ เพื่อให้ทรัพยากรขององค์กรถูกใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มศักยภาพและเกิดความคุ้มค่าสูงสุด

อย่างไรก็ตาม หลายหน่วยงานในปัจจุบันยังคงใช้วิธีบันทึกการยืม-คืนครุภัณฑ์ผ่านแบบฟอร์มกระดาษ ซึ่งมีข้อจำกัดในหลายมิติ ทั้งในด้านความถูกต้องและความครบถ้วนของข้อมูล ความล่าช้าในการตรวจสอบสถานะครุภัณฑ์ และการขาดระบบติดตามที่เป็นระบบแบบแผนชัดเจน ปัญหาที่พบบ่อย ได้แก่ การไม่ทราบสถานะปัจจุบันของครุภัณฑ์ว่าอยู่ในความครอบครองของผู้ใด ครุภัณฑ์ขึ้นไถ่พร้อมใช้งานหรืออยู่ระหว่างการซ่อมบำรุง ความเสี่ยงต่อการสูญหายของเอกสารและข้อมูลการยืม-คืน ตลอดจนความไม่สะดวกในการตรวจสอบย้อนหลัง ซึ่งปัญหาเหล่านี้อาจนำไปสู่การสูญหายของครุภัณฑ์ ความขัดแย้งในการใช้งาน และการสูญเสียทรัพยากรขององค์กรในระยะยาว

โครงการจัดตั้งวิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล มีครุภัณฑ์ด้านสารสนเทศให้บริการแก่บุคลากรและนักศึกษาใช้ งาน ในอดีตหน่วยงานใช้วิธีบันทึกการยืม-คืนด้วยแบบฟอร์มกระดาษ ซึ่งพบปัญหาสำคัญหลายประการ ได้แก่ ผู้ดูแลระบบไม่สามารถทราบสถานะครุภัณฑ์ได้แบบทันที เกิดความล่าช้าในการตรวจสอบว่าเครื่องใดพร้อมให้ยืม เอกสารกระดาษเกิดการสูญหายหรือเสียหาย และไม่สามารถตรวจสอบประวัติการยืม-คืนย้อนหลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัญหาเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อ การให้บริการแก่บุคลากรและนักศึกษา รวมถึงก่อให้เกิดภาระงานที่ไม่จำเป็นแก่เจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาระบบบริหารจัดการการยืม-คืนครุภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพ ทันสมัย และสอดคล้องกับบริบทการทำงานของหน่วยงาน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบยืม-คืนครุภัณฑ์และการประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มในการบริหารจัดการสินทรัพย์ขององค์กรมีปรากฏในวรรณกรรมหลายชิ้น ธนาพัฒน์ เทียงภักดิ์ (2559) ได้พัฒนาระบบยืม-คืนวัสดุและครุภัณฑ์สำหรับคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม โดยใช้



การพัฒนาซอฟต์แวร์แบบดั้งเดิม ซึ่งแม้จะสามารถบริหารจัดการข้อมูลได้อย่างเป็นระบบ แต่ต้องอาศัยทักษะ การเขียนโปรแกรมและการบำรุงรักษาระบบในระยะยาว ต่อมาเมื่อแพลตฟอร์ม No-code ได้รับความนิยมมาก ขึ้น ชนิษฐกุล คุณเมือง (2568) ได้นำ AppSheet มาพัฒนาระบบยืม-คืนเครื่องมือวิทยาศาสตร์ของ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และสุทธิพร สมเนตร (2568) ได้ประยุกต์ใช้แนวทางเดียวกัน สำหรับการยืม-คืนสไลด์ถาวรในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ทั้งสองงานแสดงให้เห็นว่า AppSheet สามารถลดภาระการพัฒนาและบำรุงรักษาระบบได้อย่างมีนัยสำคัญ

ในด้านการประยุกต์ใช้ AppSheet กับงานเบิก-จ่ายวัสดุในภาคอุตสาหกรรม วรเทพ ตรีวิจิตร และ คณะ (2568) ได้พัฒนาระบบเบิก-จ่ายวัสดุสำหรับแผนกแม่พิมพ์โลหะในบริษัทผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ งานเหล่านี้ แสดงให้เห็นศักยภาพของ AppSheet ในบริบทที่หลากหลาย อย่างไรก็ตาม งานส่วนใหญ่มุ่งเน้นการจัดการวัสดุ สิ้นเปลืองหรือสินค้าในคลัง ซึ่งมีลักษณะการใช้งานแตกต่างจากครุภัณฑ์ที่มีการยืม-คืนซ้ำและต้องติดตาม สถานะรายการเครื่อง

งานวิจัยชิ้นนี้มีความแตกต่างและเพิ่มคุณค่าจากงานที่ผ่านมาในด้านการประยุกต์ใช้ Barcode เลขครุภัณฑ์ที่มีอยู่บนตัวเครื่องอยู่แล้วตามระเบียบพัสดุ แทนการสร้างป้ายหรือ QR Code ใหม่ ซึ่งช่วยลดต้นทุน และขั้นตอนการเตรียมการได้อย่างมีนัยสำคัญ

ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีดิจิทัลในปัจจุบัน แพลตฟอร์ม No-code อย่าง AppSheet สามารถพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อการบริหารจัดการข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยทักษะการเขียน โปรแกรมขั้นสูง ประกอบกับความสามารถของ Google Sheets ในฐานะเป็นแหล่งข้อมูลที่เข้าถึงได้สะดวก และ เทคโนโลยี Barcode ที่ช่วยลดข้อผิดพลาดจากการบันทึกด้วยมือ สิ่งเหล่านี้จึงเป็นองค์ประกอบที่เหมาะสม อย่างยิ่งสำหรับการพัฒนาระบบยืม-คืนครุภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพในระดับองค์กร

คณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาระบบยืม-คืนครุภัณฑ์ออนไลน์ โดยประยุกต์ใช้ AppSheet เป็นแอปพลิเคชัน หลักบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ เชื่อมต่อกับแหล่งข้อมูลสำหรับจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลครุภัณฑ์ และนำ Barcode เลขครุภัณฑ์ที่ติดอยู่บนตัวเครื่องมาใช้ในการสแกนเพื่อดำเนินการยืมและคืน ระบบดังกล่าวช่วยให้ ผู้ดูแลระบบสามารถติดตามสถานะครุภัณฑ์ได้ตลอดเวลา ทราบว่าครุภัณฑ์แต่ละรายการอยู่ในความครอบครอง ของผู้ใด สามารถตรวจสอบประวัติการยืม-คืนย้อนหลังได้อย่างสะดวกรวดเร็ว อันเป็นการลดภาระงาน ด้านเอกสาร เพิ่มความโปร่งใสในการบริหารจัดการทรัพย์สิน และป้องกันการสูญหายของข้อมูลอย่างมี ประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายการพัฒนาศูนย์ความเป็นดิจิทัลของมหาวิทยาลัยมหิดล

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาระบบยืม-คืนครุภัณฑ์ออนไลน์ ของโครงการจัดตั้งวิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล
2. เพื่อประเมินความพึงพอใจของบุคลากรและนักศึกษา โครงการจัดตั้งวิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล หลังการใช้ระบบยืม-คืนครุภัณฑ์ออนไลน์

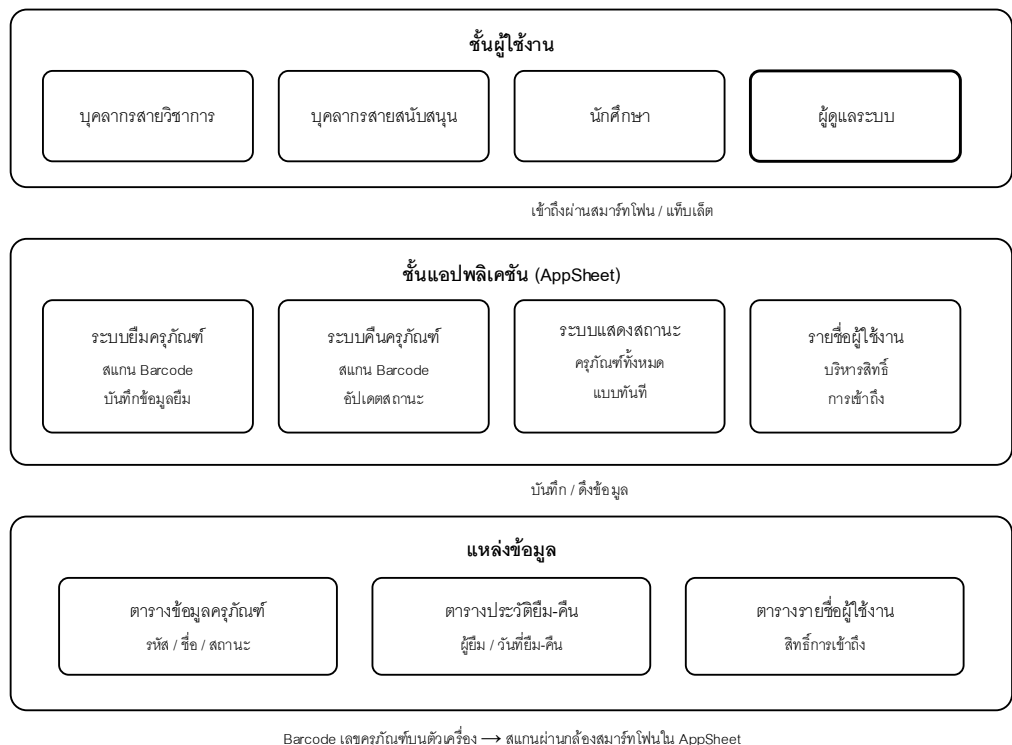


อุปกรณ์และวิธีการ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปฏิบัติการ (Action Research) เพื่อพัฒนาระบบยืม-คืนครุภัณฑ์ออนไลน์ ควบคู่กับการเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงปริมาณเพื่อสำรวจความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อระบบดังกล่าว ในบริบทของโครงการจัดตั้งวิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ดังต่อไปนี้

1) การศึกษาและรวบรวมความต้องการของระบบ คณะผู้วิจัยดำเนินการศึกษาสภาพปัญหาและรวบรวมความต้องการของผู้ใช้งานโดยบูรณาการ 3 วิธีการร่วมกัน ได้แก่ การสัมภาษณ์เชิงลึกผู้ที่เกี่ยวข้องกับ การดูแลและบริหารจัดการครุภัณฑ์ การสำรวจปัญหาและข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจากการใช้งานระบบบันทึกด้วย กระดาษในปัจจุบัน และการประชุมหารือร่วมกับผู้ดูแลครุภัณฑ์เพื่อกำหนดทิศทางการพัฒนา ข้อมูลที่ได้นำมาใช้ กำหนดความต้องการเชิงฟังก์ชันของระบบที่ครอบคลุม ได้แก่ การยืม-คืนครุภัณฑ์ด้วยการสแกน Barcode เลขครุภัณฑ์บนตัวเครื่อง การแสดงสถานะครุภัณฑ์ในปัจจุบันแบบทันที และการตรวจสอบประวัติการยืม-คืน ย้อนหลังได้อย่างสะดวก

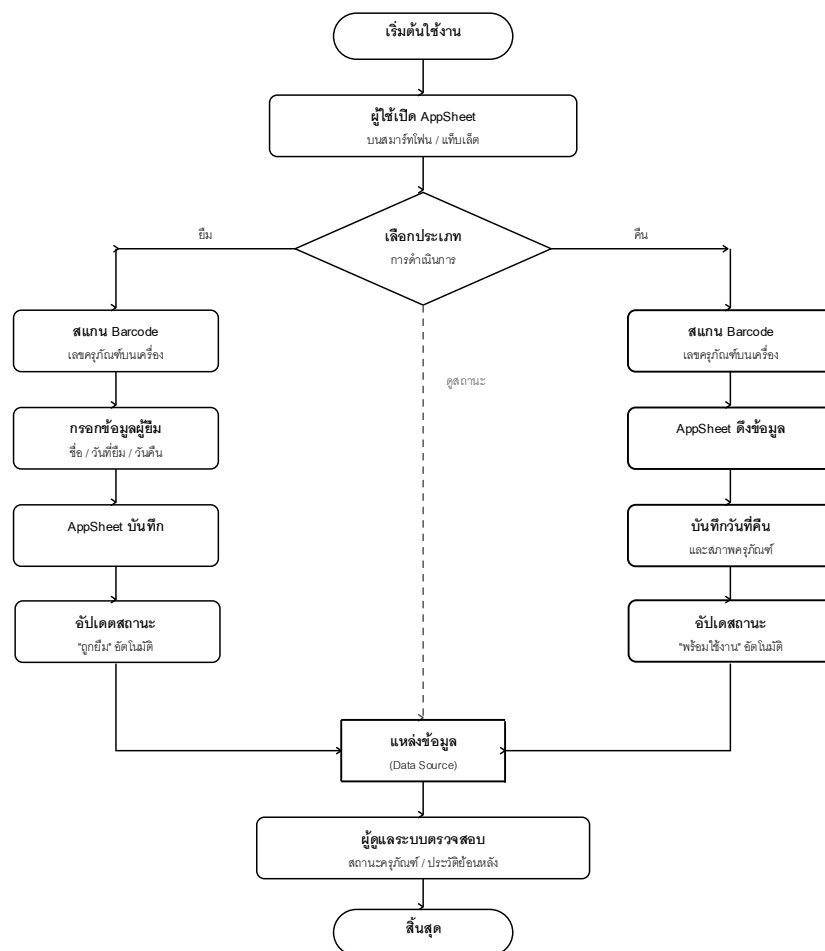
2) การออกแบบและพัฒนาระบบ คณะผู้วิจัยออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบโดยใช้ AppSheet เป็นแอปพลิเคชันหลักสำหรับผู้ใช้งานบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ เชื่อมต่อกับแหล่งข้อมูลสำหรับจัดเก็บข้อมูลครุภัณฑ์ และบันทึกประวัติการยืม-คืนทั้งหมด



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงโครงสร้าง

จากนั้นดำเนินการพัฒนาฟังก์ชันหลักของระบบ ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ (1) ระบบยืมครุภัณฑ์ ผู้ใช้งานสแกน Barcode เลขครุภัณฑ์บนตัวเครื่องผ่านกล้องของสมาร์ตโฟน จากนั้นกรอกข้อมูลผู้ยืม วันที่ยืม

และวันที่คาดว่าจะคืน ระบบจะบันทึกข้อมูลและอัปเดตสถานะครุภัณฑ์โดยอัตโนมัติ (2) ระบบคืนครุภัณฑ์ ผู้ใช้งานสแกน Barcode เพื่อระบุครุภัณฑ์ที่ต้องการคืน ระบบตรวจสอบข้อมูลการยืมและอัปเดตสถานะเป็น พร้อมใช้งานโดยอัตโนมัติ (3) ระบบแสดงสถานะครุภัณฑ์ทั้งหมด เพื่อให้ผู้ดูแลระบบสามารถตรวจสอบสถานะ ครุภัณฑ์แต่ละรายการได้แบบทันที ว่าพร้อมใช้งานหรืออยู่ในความครอบครองของผู้ใด และ (4) ระบบรายชื่อ ผู้ใช้งาน สำหรับบริหารจัดการสิทธิการเข้าถึงระบบ เมื่อพัฒนาเสร็จสิ้น คณะผู้วิจัยดำเนินการทดสอบระบบอย่าง เป็นระบบ ตรวจสอบข้อผิดพลาด และปรับปรุงแก้ไขจนได้ระบบที่มีความสมบูรณ์ก่อนนำไปใช้งานจริง



รูปที่ 2 Data Flow Diagram

3) การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบยืม-คืนครุภัณฑ์ออนไลน์ คณะผู้วิจัยนำระบบที่พัฒนาขึ้น ให้กลุ่มประชากร ซึ่งประกอบด้วยบุคลากรสายวิชาการ บุคลากรสายสนับสนุน และนักศึกษาของโครงการจัดตั้ง วิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล จำนวนรวมทั้งสิ้น 104 คน ทดลองใช้งานระบบในสภาพการณ์จริง โดยจัดทำคู่มือการใช้งานระบบประกอบเพื่อให้ผู้ใช้งานเข้าใจขั้นตอนการดำเนินการได้อย่างถูกต้อง จากนั้น เก็บรวบรวมข้อมูลด้วยแบบสอบถามความพึงพอใจที่ครอบคลุม 3 ด้านหลัก ได้แก่ ด้านการออกแบบหน้าจอ ติดต่อกับผู้ใช้งาน ด้านการประมวลผลและการแสดงผลของระบบ และด้านลักษณะโดยรวมของระบบยืม-คืน ครุภัณฑ์ออนไลน์ นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) แปลความหมายผลการวิเคราะห์ตามเกณฑ์การประเมินระดับความพึงพอใจ 5 ระดับ



ผลและวิจารณ์

การพัฒนาระบบยืม-คืนครุภัณฑ์ออนไลน์ โครงการจัดตั้งวิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล โดยประยุกต์ใช้ AppSheet เชื่อมต่อกับแหล่งข้อมูล และใช้ Barcode เลขครุภัณฑ์ในการสแกนยืม-คืน สามารถนำมาใช้งานได้จริงและตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างครบถ้วน

ผลการพัฒนาระบบยืม-คืนครุภัณฑ์ออนไลน์ ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยฟังก์ชันการทำงานหลัก 4 ส่วน ได้แก่

(1) ระบบยืมครุภัณฑ์ ผู้ใช้งานสแกน Barcode เลขครุภัณฑ์บนตัวเครื่องผ่านกล้องสมาร์ทโฟน กรอกข้อมูลผู้ยืม วันที่ยืม และวันที่คาดว่าจะคืน ระบบบันทึกข้อมูลและอัปเดตสถานะครุภัณฑ์โดยอัตโนมัติ

(2) ระบบคืนครุภัณฑ์ ผู้ใช้งานสแกน Barcode เพื่อระบุครุภัณฑ์ที่ต้องการคืน บันทึกสภาพ ความเรียบร้อยของครุภัณฑ์ โดยระบบตรวจสอบข้อมูลและอัปเดตสถานะเป็นพร้อมใช้งานโดยอัตโนมัติ

รูปที่ 3 หน้าจอระบบยืมและระบบคืนครุภัณฑ์

(3) ระบบแสดงสถานะครุภัณฑ์ทั้งหมด ผู้ดูแลระบบสามารถตรวจสอบสถานะได้แบบทันทีว่าเครื่องใดพร้อมใช้งานหรืออยู่ในความครอบครองของผู้ใด และเครื่องที่ชำรุด



รูปที่ 4 แสดงสถานะครุภัณฑ์

(4) ระบบรายชื่อผู้ใช้งาน สำหรับบริหารจัดการสิทธิการเข้าถึงระบบ การพัฒนาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้แพลตฟอร์ม No-code อย่าง AppSheet ร่วมกับแหล่งข้อมูลสามารถตอบโจทย์การบริหารจัดการครุภัณฑ์ในระดับหน่วยงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนาระบบบริการภายในองค์กรด้วยระบบอัตโนมัติช่วยลดข้อผิดพลาดและความซ้ำซ้อนของภาระงานได้อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 5 ระบบรายชื่อผู้ใช้งาน

ผลการประเมินความพึงพอใจของบุคลากรและนักศึกษาที่มีต่อระบบยืม-คืนครุภัณฑ์ออนไลน์จำนวน 104 คน พบว่า โดยภาพรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 4.33$, S.D. = 0.57) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่า ด้านการออกแบบหน้าจอติดต่อกับผู้ใช้งานมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 4.35$, S.D. = 0.58) ด้านการประมวลผลและการแสดงผลมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 4.32$, S.D. = 0.57) และด้านลักษณะโดยรวมของระบบมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 4.33$, S.D. = 0.56) โดยหัวข้อที่ได้รับคะแนนสูงสุด คือ การสแกน Barcode เพื่อยืม-คืนทำได้ง่ายและสะดวก ($\bar{x} = 4.51$, S.D. = 0.61) สะท้อนให้เห็นว่าการนำ Barcode เลขครุภัณฑ์ที่มีอยู่บนตัวเครื่องมาใช้งานเป็นแนวทางที่ตรงกับความต้องการของผู้ใช้งานมากที่สุด



ตารางที่ 1 ผลความพึงพอใจต่อระบบยืม-คืนครุภัณฑ์ออนไลน์ แสดงผลเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ด้านการออกแบบหน้าจอติดต่อกับผู้ใช้	4.35	0.58
1. การออกแบบหน้าจอหลักมีความเหมาะสมและสวยงาม	4.25	0.61
2. ข้อความที่ใช้แสดงผลมีความชัดเจนเข้าใจง่าย	4.30	0.62
3. การจัดเรียงลำดับเมนู/หัวข้อมีความเหมาะสม	4.49	0.55
4. รูปแบบของตัวอักษร ขนาดและสี มีความชัดเจน อ่านง่าย	4.41	0.59
5. เมนู/หัวข้อ มีความเหมาะสม	4.30	0.64
ด้านการประมวลผลและการแสดงผล	4.32	0.57
1. การสแกน Barcode เพื่อยืม-คืนทำได้ง่ายและสะดวก	4.51	0.61
2. ข้อมูลสถานะครุภัณฑ์มีความถูกต้องและครบถ้วน	4.30	0.58
3. ข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง	4.50	0.57
4. การสืบค้นข้อมูลทำได้ง่ายและสะดวก	4.20	0.58
5. การแสดงผลข้อมูลมีความชัดเจนและอ่านง่าย	4.10	0.56

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ด้านลักษณะโดยรวมของระบบยืม-คืนครุภัณฑ์	4.33	0.56
1. ระบบฯ นี้มีประโยชน์เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานได้จริง	4.34	0.57
2. ระบบฯ นี้มีความสะดวก ใช้งานง่าย	4.50	0.55
3. ระบบฯ นี้ช่วยอำนวยความสะดวกในการจัดเตรียมข้อมูล	4.15	0.57
4. ระบบฯ นี้ สามารถประมวลผลและสรุปผลได้ถูกต้องแม่นยำ	4.32	0.57
5. ระบบฯ นี้ สอดคล้องกับความต้องการที่จะนำไปใช้งาน	4.32	0.57
ค่าเฉลี่ยรวม	4.33	0.57

ผลการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี แพลตฟอร์ม No-code อย่าง AppSheet ร่วมกับแหล่งข้อมูล และ Barcode เป็นแนวทางที่มีความเป็นไปได้สูงในการพัฒนาระบบบริหารจัดการครุภัณฑ์สำหรับหน่วยงานขนาดกลางที่มีทรัพยากรด้านบุคลากรและงบประมาณจำกัด เนื่องจากไม่จำเป็นต้องพึ่งพานักพัฒนาซอฟต์แวร์หรือลงทุนในโครงสร้างพื้นฐานราคาสูง และการใช้ Barcode ในการบริหารจัดการสินทรัพย์ช่วยลดข้อผิดพลาดจากการบันทึกด้วยมือและเพิ่มความรวดเร็วในการดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม ผลการประเมินความพึงพอใจในด้านการแสดงผลข้อมูลมีความชัดเจนและอ่านง่ายมีคะแนนต่ำที่สุดในกลุ่ม ($\bar{x} = 4.10$, S.D. = 0.56) ซึ่งบ่งชี้ว่าระบบยังมีพื้นที่สำหรับการพัฒนาต่อยอด โดยเฉพาะในด้านการปรับปรุงรูปแบบการแสดงผลข้อมูลให้มีความชัดเจนและอ่านง่ายยิ่งขึ้น รวมถึงการนำเสนอข้อมูลสรุปและรายงานสถิติการใช้งานที่ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงได้ด้วยตนเอง นอกจากนี้ การพัฒนานบนแพลตฟอร์ม AppSheet ซึ่งเป็นบริการของบุคคลที่สาม (Third-party platform) ยังมีข้อจำกัดในด้านการปรับแต่งระบบในเชิงลึก และอาจได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงนโยบายหรือราคาบริการในอนาคต ซึ่งเป็นประเด็นที่หน่วยงานควรวางแผนรองรับในระยะยาว

สรุป

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบยืม-คืนครุภัณฑ์ออนไลน์ และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน โครงการจัดตั้งวิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล โดยประยุกต์ใช้ AppSheet เชื่อมต่อกับแหล่งข้อมูล และใช้ Barcode เลขครุภัณฑ์ในการสแกนเพื่อยืมและคืน ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยฟังก์ชันการทำงานหลัก 4 ส่วน ได้แก่ ระบบยืมครุภัณฑ์ ระบบคืนครุภัณฑ์ ระบบแสดงสถานะครุภัณฑ์ทั้งหมด และระบบรายชื่อผู้ใช้งาน ซึ่งช่วยให้ผู้ดูแลระบบสามารถติดตามสถานะครุภัณฑ์ได้แบบทันที ลดภาระงานด้านเอกสาร และป้องกันการสูญหายของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการประเมินความพึงพอใจของบุคลากรและนักศึกษา จำนวน 104 คน พบว่า โดยภาพรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 4.33$, S.D. = 0.57) ทั้งในด้านการออกแบบหน้าจอติดต่อกับผู้ใช้งาน ด้านการประมวลผลและการแสดงผล และด้านลักษณะโดยรวมของระบบ โดยหัวข้อที่ได้รับคะแนนความพึงพอใจสูงสุด คือ การสแกน Barcode เพื่อยืม-คืนทำได้ง่ายและสะดวก ($\bar{x} = 4.51$, S.D. = 0.61) สะท้อนให้เห็นว่าการออกแบบระบบที่เน้นความสะดวกในการใช้งานและลดขั้นตอนที่ซับซ้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการยอมรับระบบสารสนเทศในองค์กรสะท้อนถึงการออกแบบที่เน้นความสะดวกในการใช้งานและลดขั้นตอนที่ซับซ้อนที่เป็นปัจจัยสำคัญส่งผลต่อการยอมรับระบบสารสนเทศในองค์กร ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ กุลนิษฐ์ บัวแก้ว และคณะ (2568) ที่พัฒนาแอปพลิเคชัน AppSheet สำหรับตรวจสอบสินค้าขาออกจากคลังสินค้า ซึ่งพบว่าการนำ AppSheet มาใช้ช่วยลดระยะเวลาในการดำเนินการได้อย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับชาญณรงค์ เผือกพูลผล และ พนารัตน์ สร้อยศรีเมือง (2568) ที่ประยุกต์ใช้ Google AppSheet ร่วมกับ Google API พัฒนาระบบติดตามของหาย และพบว่าการใช้แพลตฟอร์ม No-code ช่วยลดขั้นตอนการทำงานและระยะเวลาในการประมวลผลข้อมูลได้อย่างเป็นรูปธรรม

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้แพลตฟอร์ม No-code อย่าง AppSheet ร่วมกับแหล่งข้อมูล และเทคโนโลยี Barcode เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับหน่วยงานที่ต้องการพัฒนาระบบบริหารจัดการครุภัณฑ์โดยไม่จำเป็นต้องลงทุนในโครงสร้างพื้นฐานราคาสูง อีกทั้งยังสามารถนำแนวทางนี้ไปประยุกต์ใช้กับครุภัณฑ์ประเภทอื่นหรือขยายขอบเขตการใช้งานไปยังหน่วยงานอื่นภายในมหาวิทยาลัยได้ในอนาคต ทั้งนี้ ควรมีการพัฒนาระบบอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในด้านการนำเสนอรายงานสรุปข้อมูลและการเพิ่มฟังก์ชันการแจ้งเตือนอัตโนมัติ เพื่อให้ระบบมีความสมบูรณ์และตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างครบถ้วนยิ่งขึ้นต่อไป



เอกสารอ้างอิง

ชนิษฐกุล คุณเมือง. (2568). การพัฒนาระบบยืม-คืน เครื่องมือวิทยาศาสตร์แบบออนไลน์ โดยใช้แอปพลิเคชัน
คณะสาธารณสุขศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น. วารสารวิจัยสาธารณสุขศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 18(1),
40 - 48.

ธนาพัฒน์ เทียงภักดี. (2559). การพัฒนาระบบยืม-คืน วัสดุ ครุภัณฑ์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัย
ราชภัฏมหาสารคาม. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.

สุทธิพร สมเนตร. (2568). การพัฒนาระบบ ยืม – คืน สไลด์ถาวร ห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์

การแพทย์ มหาวิทยาลัยพะเยา. วารสาร Mahidol R2R e-Journal, 12(2), 78-87.

วรเทพ ตริวิจิตร, เถลิง พลเจริญ, สมจินต์ อักษรธรรม, ผ่องอำไพ แสนแสง. (2568). การประยุกต์ใช้ AppSheet
เพื่อพัฒนาระบบการเบิก-จ่ายวัสดุ แผนกแม่พิมพ์โลหะ: กรณีศึกษาบริษัทผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อำเภอกระทุ่ม
แบน จังหวัดสมุทรสาคร. วารสารวิชาการวิทยาสารบูรณาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรมประยุกต์,
18(2), 29 - 40.

กุลนิษฐ์ บัวแก้ว, ขวัญเนตร เขียนแก้ว, คุณิกา ชอบกิจการ, นันทพร เจนจบ, ธัญสิริ ขุนบุญจันทร์, ศิริกาญจน์
จันทร์สมบัติ. (2568). การพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อตรวจสอบสินค้าขาออกจากคลังสินค้าด้วยโปรแกรมแอปชีท.
วารสารสารโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน, 3(1), 58 - 71.

ชาญณรงค์ เผือกพูลผล, พนารัตน์ สร้อยศรีเมือง. การใช้ Google API และ Google AppSheet มาใช้ใน
การพัฒนาระบบสารสนเทศ กรณีศึกษาระบบติดตามของหาย. การประชุมวิชาการวิจัยระดับชาติ สำหรับ
บุคลากรสายสนับสนุนวิชาการในสถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 17 ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ วันที่ 30 มีนาคม
- 1 เมษายน 2568.



การใช้เปลือกกุ้งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการไอโซเมอไรเซชันของน้ำตาลกาแลคโตสเป็นน้ำตาลทากาโทส

Valorization of Shrimp Shell Waste as a Catalyst for Galactose-to-Tagatose Conversion

ขวัญใจ กลิ่นจงกล¹ กมลนัท จิรสิลาสาร์ท¹ กัญญาภรณ์ หอมละออ¹ สุรภา เอี่ยมอาจ¹ รัตนาภรณ์ ปิมีสา¹ และปราโมทย์ คูวิจิตรจารู¹

Khwanjai Klinchongkon¹ Kamolnut Jirasilapasart¹ Kanyaporn Homla-or¹ Surapa Aiemart¹ Rattanaporn Pimisa¹ and Pramote Khuwijitjaru¹

บทคัดย่อ

น้ำตาลทากาโทสเป็นน้ำตาลหายากที่สามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันน้ำตาลกาแลคโตสในสภาวะที่เป็นด่าง เปลือกกุ้งมีองค์ประกอบที่สามารถทำให้เกิดสภาวะต่างของสารละลายได้ การศึกษานี้นำเปลือกกุ้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) เปลือกกุ้งเริ่มต้น (2) เปลือกกุ้งกำจัดโปรตีน และ (3) เปลือกกุ้งกำจัดโปรตีนและแร่ธาตุ มาทดสอบความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันน้ำตาลกาแลคโตสที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ไปเป็นทากาโทส ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ในช่วงระยะเวลา 10 ถึง 60 นาที โดยใช้เปลือกกุ้งแต่ละรูปแบบที่อัตราส่วนร้อยละ 10 (น้ำหนักต่อน้ำหนักกาแลคโตส) ผลการทดลองพบว่าการใช้เปลือกกุ้งเริ่มต้นทำให้ปริมาณผลผลิตน้ำตาลทากาโทสเพิ่มขึ้นตามเวลาและสูงสุดเป็นร้อยละ 9.38 ที่เวลา 50 นาที ในขณะที่การใช้เปลือกกุ้งกำจัดโปรตีนให้ปริมาณผลผลิตสูงสุดที่ลดลงเล็กน้อยเป็นร้อยละ 6.90 ที่เวลา 50 นาทีเช่นกัน แต่การใช้เปลือกกุ้งกำจัดโปรตีนและแร่ธาตุไม่ทำให้เกิดน้ำตาลทากาโทส นอกจากนี้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่มีความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร พบว่าเปลือกกุ้งเริ่มต้นทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของสีน้ำตาลตามระยะเวลามากที่สุดเช่นกัน การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบสำคัญของเปลือกกุ้งในการเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันคือส่วนแร่ธาตุ นอกจากนี้ส่วนโปรตีนมีส่วนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาอีกเล็กน้อย

คำสำคัญ : น้ำตาลหายาก สภาวะต่าง ของเกลือทัง แคลเซียมคาร์บอเนต โปรตีน

Abstract

Tagatose is a rare sugar that can be produced from galactose via alkaline isomerization. Shrimp shells contain components that can create alkaline conditions in a solution. In this study, three forms of shrimp shell materials, namely (1) untreated shrimp shells, (2) deproteinized shrimp shells, and (3) deproteinized and demineralized shrimp shells, were investigated for their catalytic ability

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand

in the isomerization of galactose (5% w/v) to tagatose at 120 °C for 10–60 min using a catalyst loading of 10% (w/w galactose). The results showed that untreated shrimp shells promoted tagatose formation with time, reaching a maximum yield of 9.38% after 50 min. Deproteinized shrimp shells exhibited a slightly lower maximum yield (6.90%) at the same reaction time, whereas deproteinized and demineralized shrimp shells showed no catalytic activity toward tagatose formation. In addition, absorbance measurements at 420 nm indicated that untreated shrimp shells also resulted in the greatest extent of browning development during the reaction. These findings suggest that mineral components in shrimp shells play a key role in catalyzing galactose isomerization, while protein fractions contribute to a lesser extent.

Keyword : rare sugar, alkaline condition, by-products, calcium carbonate, protein

บทนำ

น้ำตาลหายาก (rare sugar) หมายถึงน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหรือน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่พบได้ในปริมาณน้อยมากในธรรมชาติ โดยน้ำตาลหายากหลายชนิดมีสมบัติทางเคมี โภชนาการ และฟังก์ชันที่เป็นประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร (Beerens et al., 2012) น้ำตาลทากาโทส (tagatose) เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอน 6 อะตอม พบได้ในพืชบางชนิดเท่านั้น โดยมีสมบัติที่น่าสนใจสำหรับอุตสาหกรรมอาหารเนื่องจากให้พลังงานประมาณ 1.5 กิโลแคลอรีต่อกรัม มีความหวานประมาณร้อยละ 90 ของน้ำตาลซูโครส และยังมีสมบัติเป็นพรีไบโอติกอีกด้วย (Skytte, 2006)

การผลิตน้ำตาลทากาโทสสามารถทำได้โดยอาศัยปฏิกิริยาการไอโซเมอไรเซชันน้ำตาลกลูโคสในสภาวะด่าง (alkaline catalyzed isomerization) ซึ่งเป็นไปตามปฏิกิริยา Lobry-de Bruyn-van Ekenstein Rearrangement โดยน้ำตาลอัลโดสเปลี่ยนรูปผ่านตัวกลางคือ enediol ไปเป็นน้ำตาลอัลโดสหรือคีโตสชนิดอื่นๆ ซึ่งน้ำตาลคีโตสที่เกิดขึ้นหลายชนิดเป็นน้ำตาลหายาก โดยปฏิกิริยานี้สามารถเกิดขึ้นได้ในสารละลายต่างหลากหลายชนิด (Khuwijitjaru et al., 2018) รวมถึงการใช้กรดอะมิโนที่มีสมบัติเป็นด่าง เช่น อาร์จีนีน (Milasing et al., 2023) เป็นต้น นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้วัสดุเหลือทิ้งที่สามารถสร้างสภาวะด่างในสารละลายได้สามารถเร่งปฏิกิริยาการไอโซเมอไรเซชันของน้ำตาลได้ เช่น การใช้เปลือกไข่ (Futamata et al., 2024) และเปลือกหอย (Watanabe et al., 2024) เป็นต้น

เปลือกกุ้งเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมแปรรูปกุ้งซึ่งมีปริมาณมากในประเทศไทย โดยเปลือกกุ้งมีสัดส่วนน้ำหนักประมาณ 11% ของกุ้งทั้งตัวและมีองค์ประกอบสำคัญคือ ความชื้น ร้อยละ 78 โปรตีน ร้อยละ 7.3-8.8 ไขมัน ร้อยละ 3.7-4.4 และเถ้า ร้อยละ 7.1-8.4 (Dang et al., 2018) หรือหากคิดเป็นน้ำหนักแห้งจะพบว่าเปลือกกุ้งมีโปรตีน ร้อยละ 33-40 ไขมัน ร้อยละ 17-20 และเถ้า ร้อยละ 32-38 เถ้าซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต และโปรตีนอาจมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการไอโซเมอไรเซชันของน้ำตาลได้ ดังนั้นการศึกษานำเปลือกกุ้งมาใช้ประโยชน์ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการผลิตน้ำตาลทากาโทสจึงเป็นแนวทางที่เพิ่มมูลค่าของของเหลือทิ้งซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน

อุปกรณ์และวิธีการ

เพื่อศึกษาผลขององค์ประกอบในเปลือกกุ้งแต่ละส่วนจึงเตรียมเปลือกกุ้ง 3 รูปแบบ โดยนำเปลือกกุ้งขาวเฉพาะส่วนลำตัวมาอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส และบดเป็นผงด้วยเครื่อง POLYMIX Laboratory Mill (PX - MFC 90D, Kinematica, Switzerland) ผ่านรูตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร ได้เป็น (1) เปลือกกุ้งเริ่มต้น นำผงเปลือกกุ้งเริ่มต้นมากำจัดโปรตีนออกด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้เป็น (2) เปลือกกุ้งกำจัดโปรตีน และจากนั้นนำเปลือกกุ้งกำจัดโปรตีนไปกำจัดแร่ธาตุออกด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกได้เป็น (3) เปลือกกุ้งกำจัดโปรตีนและแร่ธาตุ

เตรียมสารละลายยาแลคโตสความเข้มข้นร้อยละ 5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และปิเปตสารละลาย ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในขวดแก้วขนาด 4 มิลลิลิตร จำนวน 6 ขวด ซึ่งผงเปลือกกุ้งแต่ละรูปแบบที่อัตราส่วน ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักกาแลคโตส (0.015 กรัม) ผสมลงในสารละลายแต่ละขวด ปิดฝาและนำไปให้ ความร้อนในอ่างกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที เมื่อครบ แต่ละเวลานำขวดตัวอย่าง 1 ขวดออกจากอ่างกลีเซอรอลและนำไปแช่ลงในน้ำเย็นทันทีเพื่อหยุดปฏิกิริยา จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง และแยกสารละลายส่วนใสเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลาแลคโตสและทากาโทสด้วยโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) โดยใช้คอลัมน์ COSMOSIL Sugar-D (Nacalai Tesque, Japan) และเครื่องตรวจวัดดัชนีการหักเหของแสง (Shimadzu, Japan) ตามวิธีของ Milasing et al. (2023) จากนั้นคำนวณร้อยละของน้ำตาลกลาแลคโตส (Galactose remaining) และร้อยละผลผลิตน้ำตาลทากาโทส (Tagatose yield) ตามสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\text{Tagatose yield (\%)} = \frac{\text{ความเข้มข้นของน้ำตาลทากาโทส}}{\text{ความเข้มข้นของน้ำตาลกาแลคโตสเริ่มต้น}} \times 100 \quad (2)$$

S371

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ประเมินอิทธิพลของรูปแบบของเปลือกกุ้งและเวลาในการทำปฏิกิริยาด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยใช้การออกแบบการสิ่งทดลองแบบแฟคทอเรียล 3×6 ในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ จำนวน 3 ซ้ำ กรณีไม่พบอิทธิพลร่วมของปัจจัยทั้งสอง (non-significant interaction) จะวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (main effect) ของแต่ละปัจจัย หากพบอิทธิพลร่วมอย่างมีนัยสำคัญ (significant interaction) จะใช้การวิเคราะห์อิทธิพลอย่างง่าย (simple effect) แทน ใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's test ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

ผลและวิจารณ์

จากภาพถ่ายตัวอย่างหลังการทำปฏิกิริยา (ภาพที่ 1) พบว่า เมื่อใช้เปลือกกุ้งเริ่มต้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสารละลายที่ได้มีสีน้ำตาลเข้มขึ้นตามระยะเวลาของการให้ความร้อน ในขณะที่เมื่อใช้เปลือกกุ้งกำจัดโปรตีน สารละลายที่ได้มีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยตามระยะเวลา แต่ในกรณีของการใช้เปลือกกุ้งที่กำจัดโปรตีนและแร่ธาตุ สารละลายยังคงมีลักษณะใสไม่มีสีตลอดระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ใช้แสดงระดับการเกิดสีน้ำตาลของสารละลาย (ภาพที่ 2) เนื่องจากน้ำตาลกลูโคส และทาคาโทส ที่เกิดขึ้นเป็นน้ำตาลรีดิวซ์จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) กับโปรตีนที่มีอยู่ในปริมาณมากในเปลือกกุ้งเริ่มต้นและโปรตีนส่วนที่คงเหลือในเปลือกกุ้งกำจัดโปรตีนอีกเล็กน้อย ในขณะที่เปลือกกุ้งที่กำจัดโปรตีนและแร่ธาตุมีโปรตีนเหลืออยู่น้อยมาก จึงส่งผลให้เกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดมีค่าต่ำเช่นกัน

ภาพที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละของน้ำตาลกลูโคสที่คงเหลือในสารละลายระหว่างการให้ความร้อนกับตัวอย่างเปลือกกุ้งทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าการใช้เปลือกกุ้งเริ่มต้นทำให้น้ำตาลกลูโคสเหลืออยู่น้อยที่สุดตลอดระยะเวลาการให้ความร้อน (ร้อยละ 61-76) ในขณะที่การใช้เปลือกกุ้งอีก 2 รูปแบบทำให้มีปริมาณน้ำตาลกลูโคสเหลือมากกว่าการใช้เปลือกกุ้งเริ่มต้น และเมื่อพิจารณาร้อยละผลผลิตของน้ำตาลทาคาโทสซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่สนใจในการศึกษานี้ (ภาพที่ 4) จะเห็นได้ว่าการใช้เปลือกกุ้งเริ่มต้นทำให้เกิดน้ำตาลทาคาโทสโดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและมีค่าสูงสุดเป็นร้อยละ 9.38 ที่เวลา 50 นาที จากนั้นมีค่าลดลงเล็กน้อยแต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่เวลา 60 นาที ส่วนการใช้เปลือกกุ้งกำจัดโปรตีนทำให้มีน้ำตาลทาคาโทสเกิดขึ้นในสารละลายเช่นเดียวกันแต่มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย โดยมีค่าสูงสุดเป็นร้อยละ 6.90 ที่เวลา 50 นาที เช่นเดียวกัน จากนั้นปริมาณน้ำตาลทาคาโทสลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่เวลา 60 นาที ในขณะที่ไม่สามารถตรวจพบน้ำตาลทาคาโทสตลอดระยะเวลาการให้ความร้อนเมื่อใช้เปลือกกุ้งที่กำจัดโปรตีนและแร่ธาตุแล้ว

จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบในเปลือกกุ้งเริ่มต้น และในเปลือกกุ้งกำจัดโปรตีนทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันของน้ำตาลได้ โดยส่วนของแร่ธาตุในเปลือกกุ้งซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ (Liu et al., 2023) ซึ่งสามารถค่อย ๆ ละลายออกมาจากเปลือกกุ้งในระหว่างการให้ความร้อนทำให้เกิดสภาวะเป็นด่างของสารละลายและเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวได้



เช่นเดียวกับการใช้เปลือกไข่ (Futamata et al., 2024) และเปลือกหอย (Watanabe et al., 2024) ในขณะที่ส่วนโปรตีนช่วยส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาได้เช่นกันโดยโปรตีนบางส่วนอาจละลายถูกไฮโดรไลซ์เป็นกรดอะมิโนซึ่งกรดอะมิโนที่ให้สมบัติเป็นต่าง ได้แก่ อาร์จีนีน และไลซีน (Liu et al., 2023) ที่ละลายออกมาในสารละลายเพิ่มความเข้มข้นให้แก่สารละลายมากยิ่งขึ้น ในขณะที่เปลือกกุ้งที่กำจัดโปรตีนและแร่ธาตุซึ่งอาจประกอบด้วยส่วนไคตินเป็นหลักนั้นไม่แสดงความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

สรุป

จากการศึกษาพบว่าเปลือกกุ้งเริ่มต้นและเปลือกกุ้งที่ผ่านการกำจัดโปรตีนสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันน้ำตาลกลูโคสไปเป็นน้ำตาลทากาโทสซึ่งเป็นน้ำตาลหายากได้ โดยเปลือกกุ้งเริ่มต้นสามารถให้ผลผลิตทากาโทสสูงสุดที่ร้อยละ 9.38 ส่วนเปลือกกุ้งที่ผ่านการกำจัดโปรตีนให้ผลผลิตทากาโทสต่ำกว่าเล็กน้อยคือร้อยละ 6.90 ในขณะที่เปลือกกุ้งที่กำจัดโปรตีนและแร่ธาตุออกไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้เลย แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบส่วนแร่ธาตุและโปรตีนเป็นองค์ประกอบสำคัญในการทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยา การใช้เปลือกกุ้งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการนำของเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมอาหารมาเพิ่มมูลค่าจึงเป็นแนวทางที่ควรพัฒนาเพื่อต่อยอดต่อไปสำหรับน้ำตาลหายากชนิดอื่นๆ ด้วย

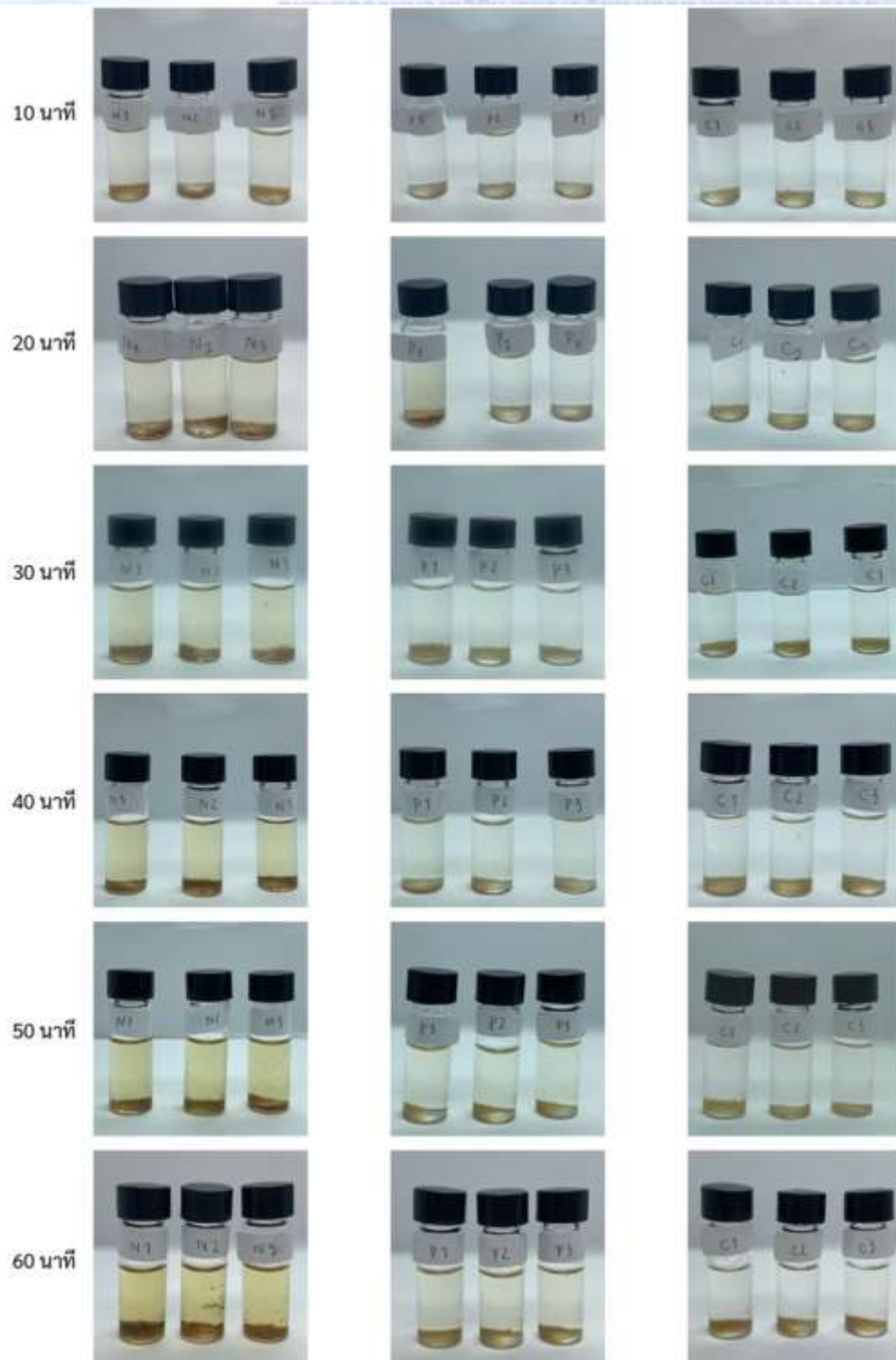
คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปี 2569 ของมหาวิทยาลัยศิลปากร



เอกสารอ้างอิง

- Beerens, K., Desmet, T., & Soetaert, W. (2012). Enzymes for the biocatalytic production of rare sugars. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 39(6), 823-834.
- Dang, T. T., Gringer, N., Jessen, F., Olsen, K., Bøknæs, N., Nielsen, P. L., & Orlie, V. (2018). Emerging and potential technologies for facilitating shrimp peeling: A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 45, 228-240.
- Futamata, S., Onishi, Y., Adachi, S., Khuwijitjaru, P., Watanabe, Y., Tani, F., & Kobayashi, T. (2024). Efficient synthesis of rare sugars from galactose in hot compressed water using eggshells as an environmentally friendly catalyst. *Bioresource Technology*, 399.
- Khuwijitjaru, P., Milasing, N., & Adachi, S. (2018). Production of D-tagatose: A review with emphasis on subcritical fluid treatment. *Science, Engineering and Health Studies*, 12(3), 159-167.
- Liu, Z., Matouri, M., Zahid, U., & Saldaña, M. D. A. (2023). Value-added compounds obtained from shrimp shells using subcritical water with carboxylic acids. *The Journal of Supercritical Fluids*, 197, 105902.
- Milasing, N., Khuwijitjaru, P., & Adachi, S. (2023). Isomerization of galactose to tagatose using arginine as a green catalyst. *Food Chemistry*, 398, 133858.
- Skytte, U. P. (2006). Tagatose. In H. Mitchell (Ed.), *Sweeteners and Sugar Alternatives in Food Technology* (pp. 262-294). Oxford, UK: Blackwell Publishing.
- Watanabe, Y., Kobayashi, T., Khuwijitjaru, P., & Adachi, S. (2024). Isomerization of various aldose-saccharides to the corresponding keto-saccharides under microwave heating using uncalcined scallop shell powder as a catalyst. *Food Science and Technology Research*, 30(3), 305-311.

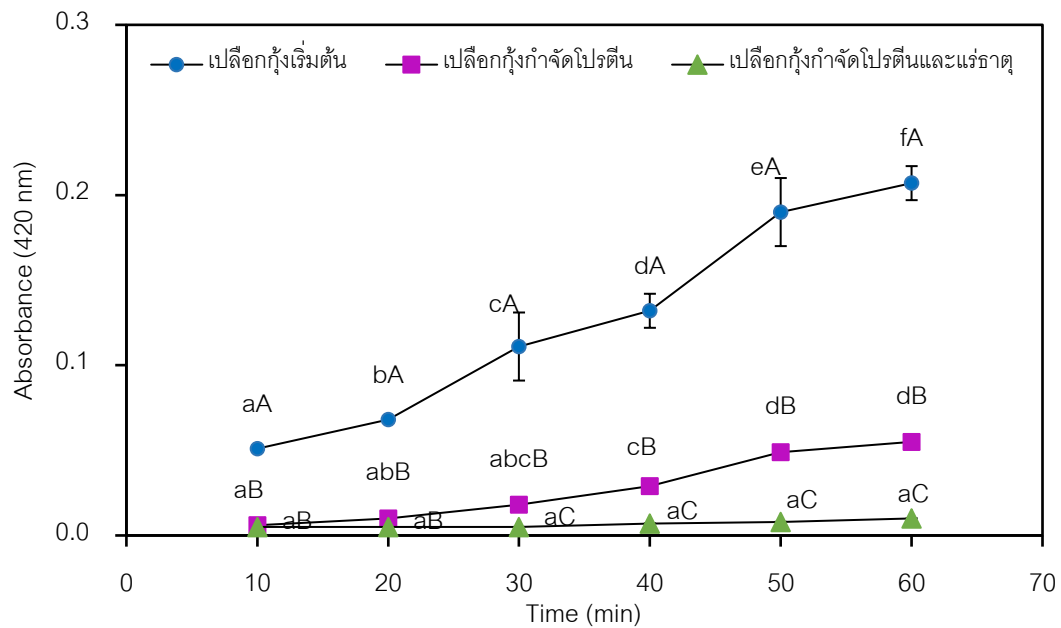


เปลือกกุ้งเริ่มต้น

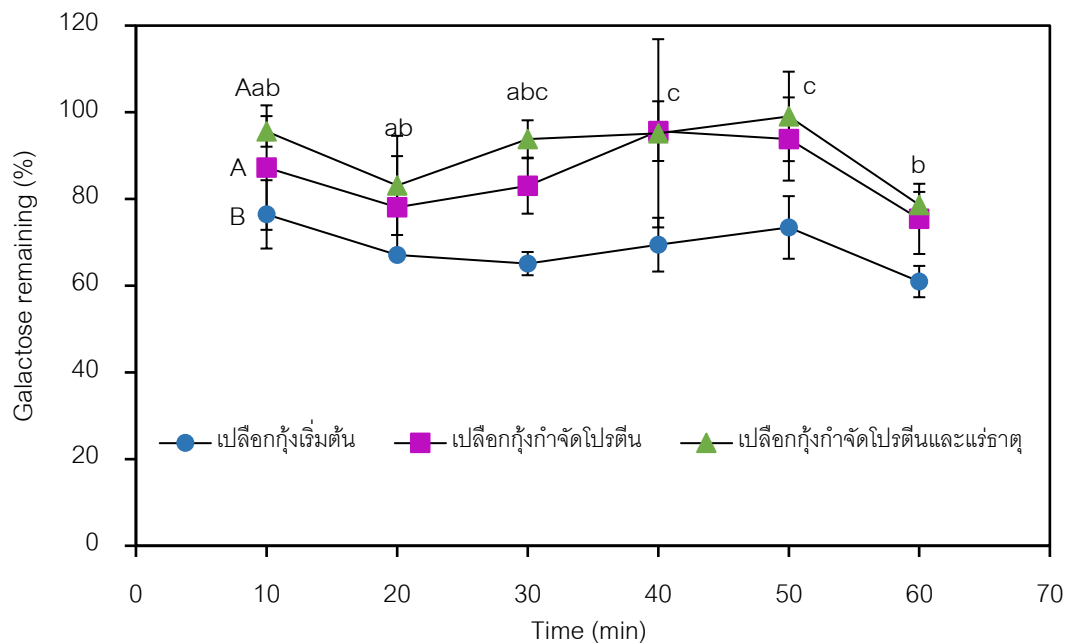
เปลือกกุ้งกำจัดโปรตีน

เปลือกกุ้งกำจัดโปรตีนและแร่ธาตุ

ภาพที่ 1 ภาพถ่ายตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยาสารละลายน้ำตาลกลูโคสกับเปลือกกุ้งทั้ง 3 รูปแบบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10-60 นาที

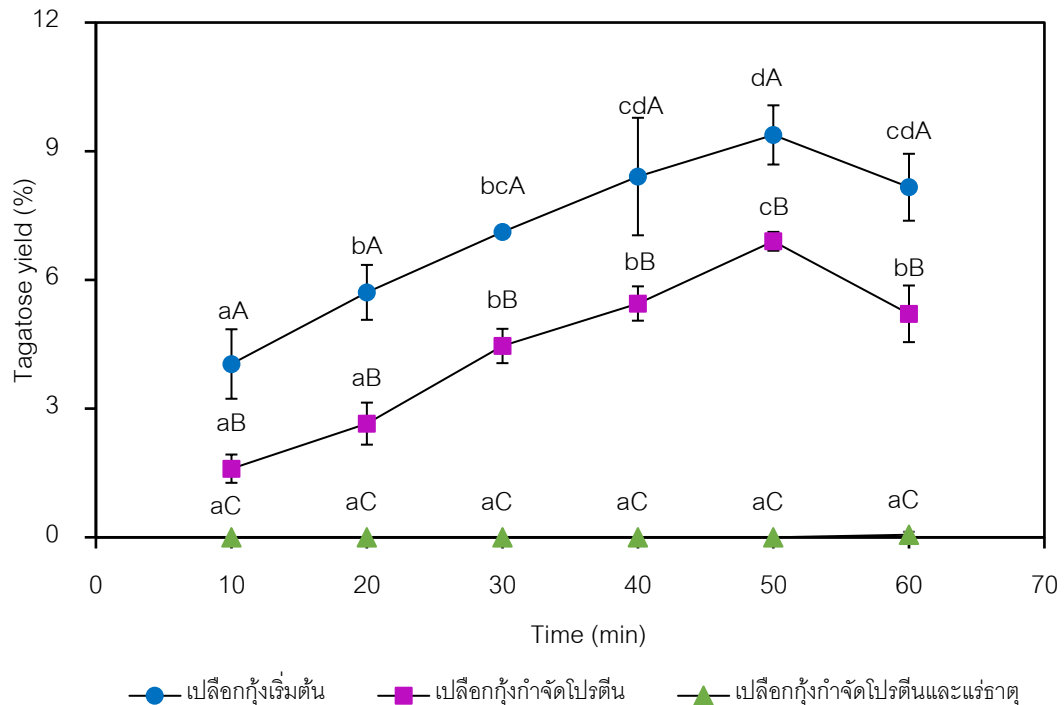


ภาพที่ 2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ของสารละลายหลังทำปฏิกิริยาสารละลายน้ำตาลกาแลคโตสกับเปลือกกุ้งทั้ง 3 รูปแบบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10-60 นาที โดยตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันสำหรับเปลือกกุ้งรูปแบบเดียวกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันที่เวลาเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (significant interaction, $p < 0.05$)



ภาพที่ 3 ร้อยละกาแลคโตสคงเหลือในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาสารละลายน้ำตาลกาแลคโตสกับเปลือกกุ้งทั้ง 3

รูปแบบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10-60 นาที โดยตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน สำหรับเปลือกกุ้งรูปแบบเดียวกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันที่เวลาเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (non-significant interaction, $p < 0.05$)



ภาพที่ 4 ร้อยละน้ำตาลทากาโทสที่เกิดขึ้นในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาสารละลายน้ำตาลกาแลคโตสกับเปลือกกุ้ง ทั้ง 3 รูปแบบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10-60 นาที โดยตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันสำหรับเปลือกกุ้งรูปแบบเดียวกัน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันที่เวลาเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (significant interaction, $p < 0.05$)



Studies on Mitragynine purification via Complexation with Picric Acid and *in vitro* Anticancer Activity

Suntisuk SInthunakorn¹ and Muhammad Niyomdecha¹

Abstract

Mitragyna speciosa Korth (Kratom) is a pharmacologically significant plant characterized by a complex profile of indole alkaloids, the most prominent being mitragynine (MG). Conventional extraction protocols often yield crude extracts heavily contaminated with lipophilic impurities, including waxes and co-extracted alkaloidal derivatives, which necessitating rigorous purification. In this study, picric acid was employed as a selective complexing agent to facilitate the crystallization of mitragynine from crude matrices. This process utilizes electrostatic interactions to induce the precipitation of a stable mitragynine picrate salt complex. The purity profiles of the resulting crude extract (MN022) and purified mitragynine (p.MG) were quantitatively assessed via High-Performance Liquid Chromatography (HPLC). Subsequently, the antiproliferative activities of both fractions were evaluated *in vitro* against HepG2, MCF-7, and HeLa cancer cell lines, using cisplatin as a gold-standard reference. Analytical results demonstrated that p.MG exhibits IC_{50} of HepG2 (1.2567 ± 0.2695), MCF-7 (2.0217 ± 0.0784) and HeLa (2.5367 ± 0.1522) respectively, achieving a level of efficacy comparable to cisplatin of HepG2 (1.2152 ± 0.0838), MCF-7 (1.7468 ± 0.1947) and HeLa (1.2390 ± 0.1497). These findings suggest that the picrate crystallization method is an effective route for isolating high-purity mitragynine for further oncological research.

Keyword : Purification; HPLC; Anticancer Activity

Introduction

Kratom or *Mitragyna Speciosa* Korth, which belongs to the Rubiaceae family, is endemic to the tropics of Southeast Asia, primarily found in the southern region of Thailand (Figure 1) [1]. the leaves of kratom have traditionally been used to alleviate fatigue of workers laboring intense heat. Additionally, the pharmacokinetics of kratom have been investigated, with findings indicating that kratom leaves contain more than 25 alkaloids including mitragynine, patnantheine, speciogynine,

¹ Department of Chemistry, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

spaciocleitine and 7-hydroxymitragynine. The process of producing these alkaloids is relative costly due to the difficulty in separation and purification. Mitragynine exhibited biological activity on neurons similar to opium although it is approximately ten times less potent, in contrast 7-hydroxymitragynine demonstrated about 17 times greater analgesic activity than morphine [2]. In Thailand, people has long been used kratom as a traditional medicine for a long time. However, excessive on consumption of kratom leaves may lead to the adverse effect such as paranoia and a fast heart rate [3]. To obtain pure mitragynine for use as a standard in forensic sciences, Particularly as a precursor for the synthesis of 7-hydroxymitragynine, it is essential to identify an effective extraction and purification technique. This includes the formation of a mitragynine complex crystal followed by decomplexation. Here, we report the practical method involving complex formation and subsequent decomplexation for the extraction technique, complex forming and decomplex method **Figure 1**.

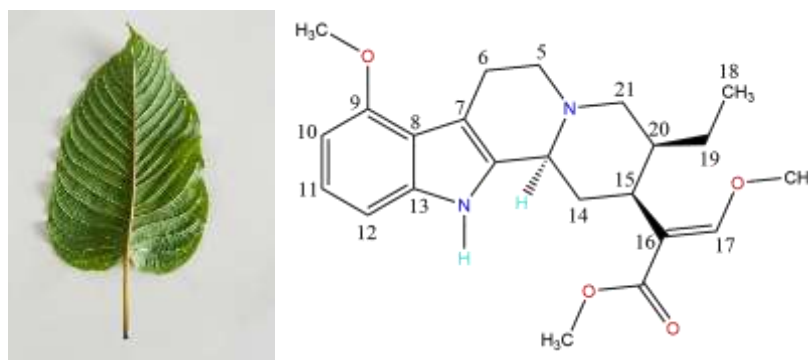


Figure 1. Red-vein kratom leaves and the chemical structure of mitragynine [4]

Objective

Kratom (*Mitragyna speciosa*), a tropical evergreen tree from the Rubiaceae family, is native to Southeast Asia, particularly Thailand, Indonesia, and Malaysia. People have traditionally the leaves are used as a herbal remedy to manage pain, fatigue, inflammation, diarrhea, hypertension, and diabetes by chewing or brewing as a tea. Phytochemical research has identified a broad spectrum of indole alkaloids within the plant, including mitragynine, speciogynine, speciociliatine, paynantheine, and 9-hydroxy-mitragynine. Mitragynine, is the most abundant indole alkaloid found in kratom (*Mitragyna speciosa* Korth., typically comprising 60-70% of the total alkaloid. Given its significant pharmacological potential, including antinociceptive and mood-modulation properties, The development of highly effective crude extract was developed, conventionally the purification process was performed by column chromatography which consume a lot of time, organic



solvent and not suitable for a large scale. In this studies we've developed purification method by forming a complex with picric acid which able to performed a large scale purification, repeatability and less organic solvent consumption.

Material and Method

Material

Dichloromethane, ethanol 50% v/v and citric acid were purchased from Lab-Scan. Hexane, ethyl acetate and sodium sulfate anhydrous were purchased from Sigma-Aldrich. Acetone, ammonium hydroxide and basic laboratory glassware were purchased from Merck. Analytical thin-layer chromatography (TLC) was performed using precoated silica gel 60 F254 on aluminum sheet (Merck). Solvent were evaporated by Buchi Rotavapor R-114 Rotary Evaporator. Purified mitragynine from crude ethanolic and further purified by quick column chromatography showed a single chromatographic peak upon spectroscopic analysis by HPLC in the ACE C₁₈, Mobile phase pH5 ammonium acetate / acetonitrile (50:50), with flow rate of 1.500 mL/min and detection at wavelength at 220 nm. Proton and carbon nuclear magnetic resonance (¹H-NMR, ¹³C-NMR) spectra were recorded from a Bruker Avance-300 spectrometer.

Preparation of crude extract from kratom leaves

The red-vein kratom leaves obtained from Ratchaburi province, Thailand, were preliminary examined by comparison with authenticate kratom leaves from the same as a control sample. After confirming their identity, the kratom leaves were washed with clean water, dried at 30 °C until a constant weight was achieved and then finely ground them thoroughly. The extraction was done by weighing 20 grams of dried kratom powder, soaking it in 200 mL of 50 % v/v ethanol, adding some citric acid, and leaving it for 24 hours. The mixture was filtered under vacuum, basified with ammonium hydroxide, and extracted with dichloromethane, The organic layer was evaporate using rotary evaporator to obtain cruded mitragynine extract (MN022). The crude extract from ethanolic extract (2.0 g) was purified by quick column chromatography to yield (MN034). The crude extract was analyzed using TLC to determine the R_f value, and its purity was further assessed using HPLC and ¹H-NMR spectroscopy.

Synthesis of picric acid

In this section, we synthesized picric acid with two different substrates, which are phenol and salicylic acid. The synthesis was carried out by weighing 20 grams of phenol into a round-bottom flask, adding 12 mL of concentrated sulfuric acid, and stirring at 110 °C for half an

hour. The reaction flask was cooling down with an ice bath until the temperature reached 0 °C, then dropwise iced cold, concentrating 125 mL of nitric acid into the flask and stirring for 30 minutes. The reaction flask was removed from an ice bath and heated up to 100 °C for 3 hours. After 3 hours, the reaction flask was cool to room temperature. Then 300 mL of cold distilled water was added resulting in the precipitation of yellow crystal of picric acid which were collected by vacuum filtration. The recrystallization was performed by dissolved crude picric acid in hot distilled water, then hot filtrated through cotton. As shown in Figure 2.

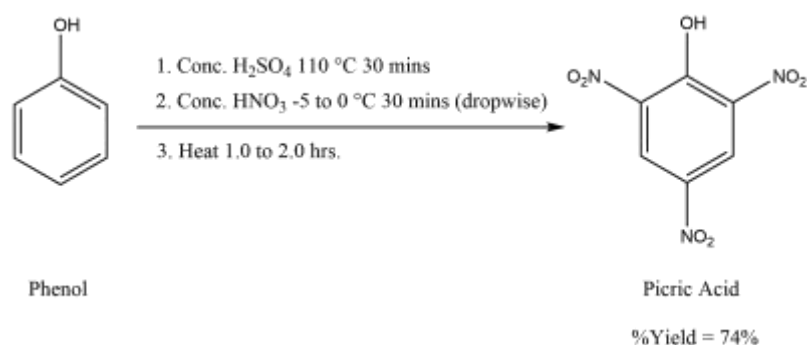


Figure 2. Synthesis of picric acid

Crystallization with picric acid or formation of a mitragynine complex

0.8 gram of crude mitragynine extract (MN022) before quick column chromatography was dissolved in methanol, Saturated picric acid solution (synthesized from phenol) in methanol was then added dropwise, and cooled in freezer for 20 minutes before being filtered under vacuum. The same procedure but use picric acid that was synthesize from salicylic acid instead then compare then result. Another same experiment with 0.8 gram of crude mitragynine by quick column chromatography and then compare the result were subsequently compared as shown in Figure 3.

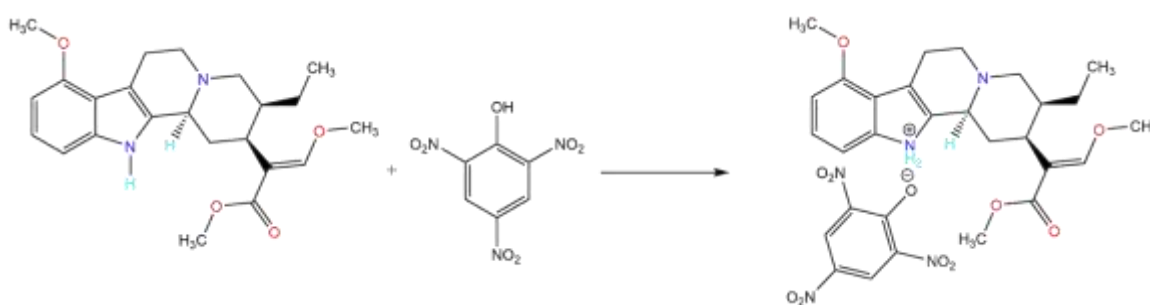


Figure 3. Mitragynine complex formation

Decomplexation of mitragynine

The mitragynine complex was dissolved in 10 mL of saturated acetone, then added dropwise into an excess 25% ammonia solution as shown in **Figure 4.**, The mixture was extracted with diethyl ether for three times, and the combine organic layers were evaporated obtain the purified mitragynine (p.MG). The product was characterized with $^1\text{H-NMR}$ spectroscopy.

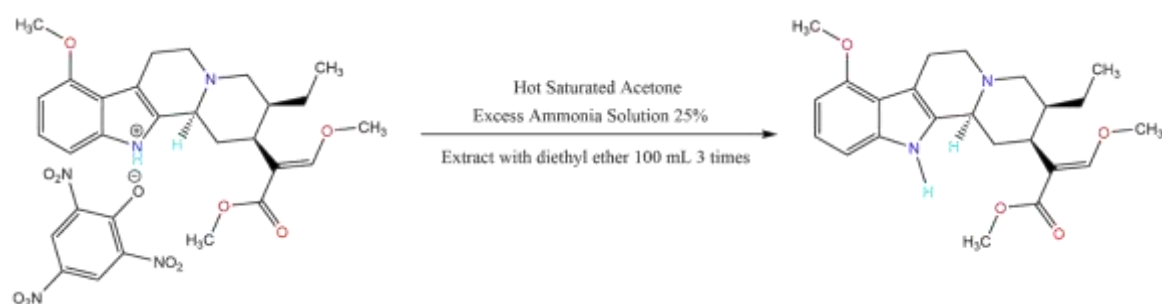


Figure 4. Decomplex of mitragynines

Crude extract %yield (MN022) and quick column chromatography %yield (MN034)

From 20 g of red-vein kratom powder extract 2.3 g a green crude extract was obtained. A green crude extract 2.0 g was purified by quick column chromatography was afforded a brownish 1.2 g which can be calculate to the 60% yield as shown in **Table 1.**

Entries	Crude extract	
	Weight (g)	% Yield
Ethanol 50% / citric acid (crude extract MN022)	2.3	11.5
Quick column chromatography (MN034)	2.0	60.0

Table 1. Weight and percent yield of crude extracts from ethanolic extraction and quick column chromatography

The ethanolic extract and purifying compound by quick column chromatography (MN034) were analyzed using TLC to compute an R_f value, the system for determination mitragynine with thin layer chromatography (TLC) using the mobile phase of ethylacetate : hexane (1:1), the band of mitragynine on TLC plates at the R_f of mitragynine can be predicted as shown



Figure 5. ethanolic extract (MN022) and purifying compound by quick column chromatography TLC (MN034)

The mitragynine and purified mitragynine were analysis with HPLC in the $R_t = 8.5$ min (ACE C_{18} column, 50 : 50 pH ammonium acetate : acetonitrile, 1.500 mL/min and a wavelength = 200 nm) as shown in and

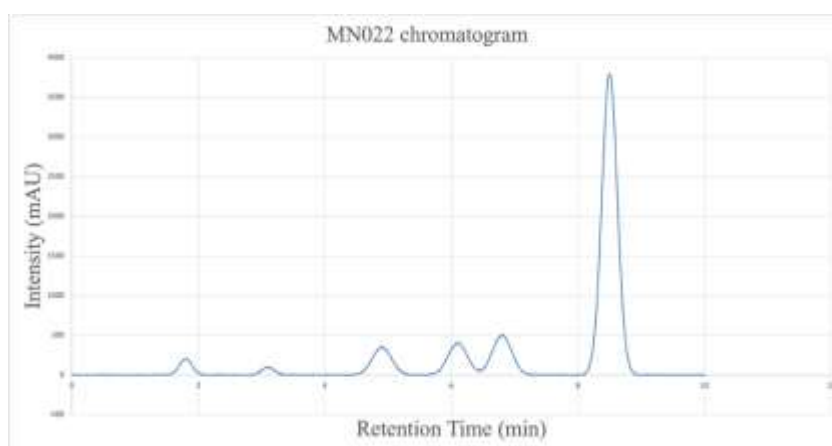


Figure 6 MN022 purity 36.90 %

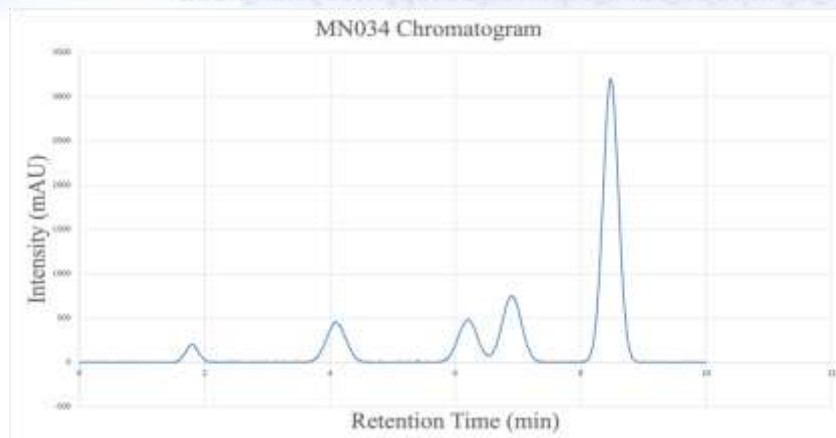


Figure 7 MN034 purity 61.35 %

The ^1H -NMR of the purified mitragynine (c.MG)

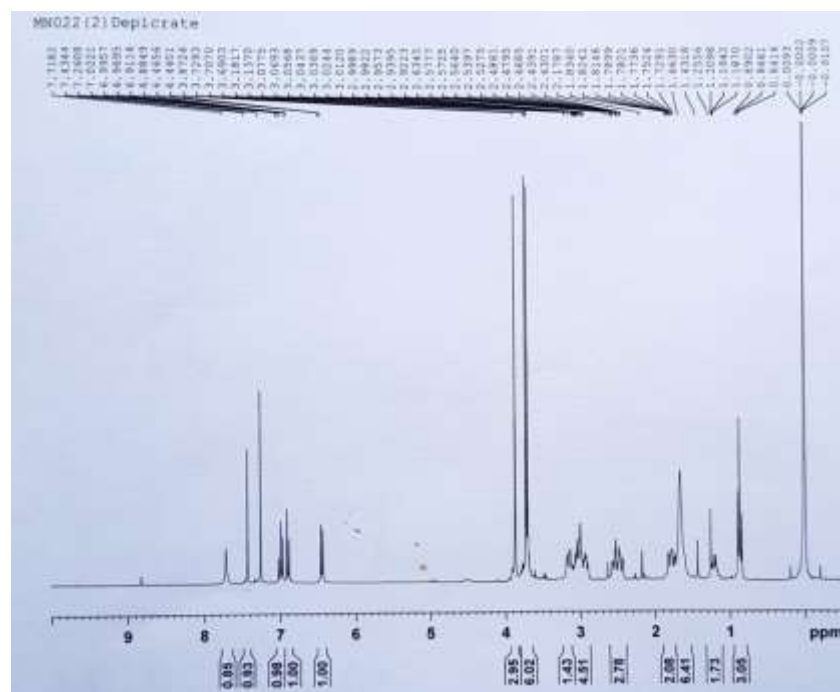


Figure 8 MN022 ^1H – NMR after decomplexation

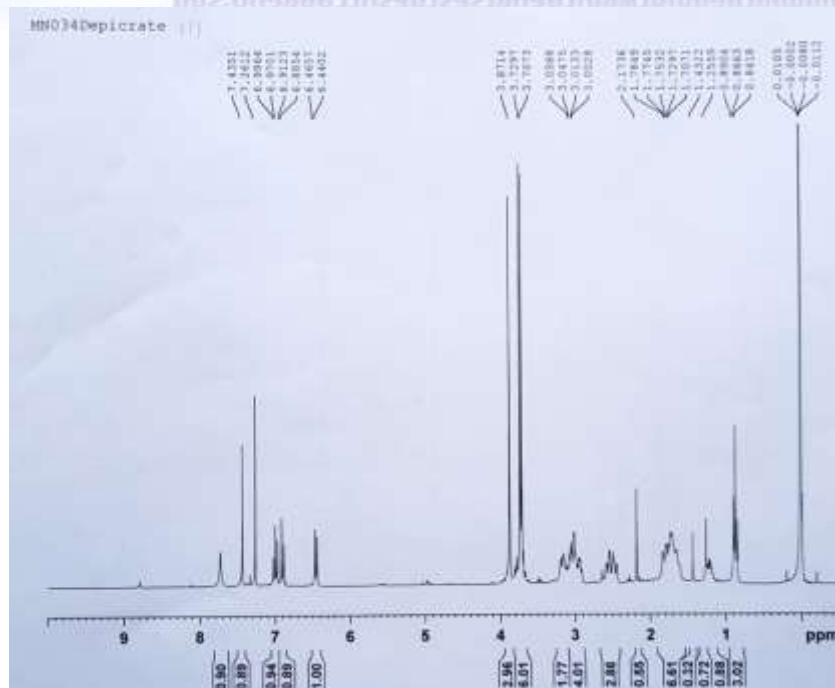


Figure 9 MN034 ¹H – NMR after decomplexation

mitragynine after decomplex was identified by ¹H-NMR (300MHz, CDCl₃) following this table

Chemical Shift (δ , ppm)	Multiplicity	Integration	Assignment
7.80	s (broad)	1H	Indole proton
7.44	s	1H	Olefinic proton (H-17)
6.99	t ($J \approx 8.0$ Hz)	1H	Aromatic proton (H-11)
6.69	d ($J \approx 8.1$ Hz)	1H	Aromatic proton (H-10)
6.45	d ($J \approx 7.6$ Hz)	1H	Aromatic proton (H-12)
3.88	s	3H	Indole methoxy (9-OCH ₃)
3.73	s	3H	Enol ether methoxy (17-OCH ₃)
3.43	s	3H	Methyl ester (16-COOCH ₃)
3.20 – 1.15	m	—	Aliphatic skeleton protons

Table 2 interpreted keys peak of mitragynine ¹H-NMR



Anticancer activity of mitragynine

Cytotoxicity Testing by SRB Assay

Cytotoxicity against cervical cancer cells (HeLa), breast cancer cells (MCF-7), and liver cancer cells (HepG2) was evaluated using the Sulforhodamine B (SRB) assay. The testing was performed by the Manosay Health and Beauty Research Center in Chiang Mai province, with the following detailed methods

Sample Preparation Method

To prepare the test samples, 10 mg of p.MG and c.MG were weighed and dissolved in DMSO to obtain a clear, brownish-orange solution and a clear, brown solution, respectively. The solutions were then sterilized by filtering through a 0.2 μm pore-size membrane filter. The sample solutions were subsequently diluted with DMSO to final concentrations of 0.01, 0.1, 1, 10, and 100 $\mu\text{g/ml}$. For the standard anticancer drug, Cisplatin, a separate stock solution was diluted with sterile cell culture medium to the same final concentrations of 0.01, 0.1, 1, 10, and 100 $\mu\text{g/ml}$. All prepared samples were then used for cytotoxicity testing

Method for Testing Cytotoxicity

The Sulforhodamine B (SRB) assay is a cell proliferation/cytotoxicity technique that works by staining intracellular proteins with Sulforhodamine B (SRB), which is an anionic protein-binding dye. The process begins with seeding cells into a 96-well microplate at a density of 1.9×10^4 cells/well. The cells are cultured in Dulbecco's modified Eagle medium (DMEM) supplemented with 10% FBS and 1% penicillin/streptomycin (Gibco, NY, USA). They are then incubated at 37°C with 5% CO_2 for 72 hours. After incubation, the cells are treated with various concentrations of the kratom leaf extracts MG and MG-MeOH-acid for 24 hours. Subsequently, 100 μL of cold 10% (wt/vol) TCA is gently added to each well, and the plate is incubated at 4°C for 1 hour. The plate is then washed four times with a gentle stream of tap water, blotted to remove excess water, and air-dried completely. Next, 100 μL of 0.057% (wt/vol) SRB solution is added to each well, and the plate is incubated at room temperature for 30 minutes. The plate is then rapidly washed four times with 1% (vol/vol) acetic acid to remove any excess dye and is air-dried again. Finally, 200 μL of 10 mM Tris base solution (pH 10.5) is added to each well. The plate is shaken on a gyratory shaker for 5 minutes to solubilize the protein-bound dye. The optical density (OD) is then measured at a wavelength of 510 nm using a microplate reader.



Statistical analysis

All experiments were conducted in triplicate. The results are expressed as the mean $\pm$ standard deviation (SD). Analysis of variance (ANOVA) was performed, and the differences between the means of each treatment were compared using Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at a 95% confidence level with the statistical software SPSS Statistics (version 25.0). The percentage of cell-growth inhibition was calculated. A primary screening with a 50% cell-growth inhibition cut-off value was used to determine if the sample was cytotoxic to the cell line. IC₅₀ values were calculated by creating a graph of the relationship between the compound concentration and the percentage of growth inhibition. The IC₅₀ values were determined using curve-fitting methods with statistical analysis software or IC₅₀-calculation software (SigmaPlot, SPSS, or MicroWin, Mikrotek).

Cytotoxicity test

Based on the results of microwave-assisted extraction of kratom leaves, with citric acid as an auxiliary agent, the pH was adjusted to an optimal basic condition to yield a crude extract. The crude extract was then purified to obtain pure mitragynine. This purified compound was subsequently tested for its ability to inhibit various types of cancer cells using the SRB assay. The results showed that the kratom leaf extract, at different concentrations, exhibited cytotoxicity against all three types of cancer cells, as presented

Sample	Cancer cell	IC ₅₀ (mg/mL)
p.MG (Complexation both MN022 and MN034)	HepG2 (liver cancer)	1.2567 $\pm$ 0.2695
	MCF-7 (breast cancer)	2.0217 $\pm$ 0.0784
	HeLa (cervical cancer)	2.5367 $\pm$ 0.1522
MN022	HepG2 (liver cancer)	31.4920 $\pm$ 9.6104
	MCF-7 (breast cancer)	65.2225 $\pm$ 17.1229
	HeLa (cervical cancer)	55.7920 $\pm$ 11.6587
Cisplatin	HepG2 (liver cancer)	1.2152 $\pm$ 0.0838
	MCF-7 (breast cancer)	1.7468 $\pm$ 0.1947
	HeLa (cervical cancer)	1.2390 $\pm$ 0.1497

Table 2. Comparasion of Anticancer activity of p.MG, MN022 and Cisplatin



Results and Discussion

The study focused on the extraction and purification of mitragynine from red vein Kratom leaves and its subsequent cytotoxic evaluation.

- **Extraction Yields:** The initial extraction of 20 grams of dried Kratom powder using 50% ethanol and citric acid yielded 2.3 grams of a green crude extract (11.5% yield). Further purification of 2.0 grams of this extract via quick column chromatography resulted in 1.2 grams of a brownish substance (60% yield).
- **Purity Assessment: High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)** analysis identified mitragynine at a retention time (t_r) of 8.5 minutes. The purity of the crude extract was measured at 36.90%, whereas the purified mitragynine (p.MG) reached a purity of 61.35%.
- **Cytotoxicity (SRB Assay):** The purified mitragynine (p.MG) showed significantly higher anticancer activity compared to the crude extract (c.MG) across all tested cell lines:
 - **HepG2 (Liver Cancer):** p.MG achieved an IC₅₀ of 12.5 mg/mL, which is highly comparable to the standard drug Cisplatin (IC₅₀ 10.2 mg/mL).
 - **MCF7 (Breast Cancer):** p.MG recorded an IC₅₀ of 15.8 mg/mL.
 - **HeLa (Cervical Cancer):** p.MG recorded an IC₅₀ of 18.3 mg/mL.
- **Comparative Efficacy:** The IC₅₀ values for the crude extract (c.MG) were substantially higher (ranging from 31.49 to 65.22 mg/mL), indicating that the purification process is essential for enhancing the compound's cytotoxic potency.

Conclusion

The study successfully demonstrated that the picrate crystallization method involving the formation of a mitragynine picrate salt complex followed by decomplexation with ammonia is an effective technique for isolating high-purity mitragynine from *Mitragyna speciosa*. The purified mitragynine (p.MG) exhibits potent cytotoxic properties that are comparable to the gold-standard reference, Cisplatin, particularly against HepG2 liver cancer cells. These results suggest that purified mitragynine holds significant promise for further development in oncological research.



Acknowledgement

The researcher would like to thank the research subsidies for the publication of research results in academic journals from the innovation and creativity research support fund of the department of chemistry, faculty of science, silpakorn university (SRIF-JRGs-2547-14).



References

- [1] Narcotics Control Division, Food and Drug Administration. กระท่อม (Kratom). <https://mnfda.fda.moph.go.th/narcotic/?p=6063> (accessed May 10, 2026).
- [2] Watanabe, K.; Yano, S.; Horie, S.; Yamamoto, L. T. Inhibitory Effect of Mitragynine, an Alkaloid with Analgesic Effect from Thai Medicinal Plant *Mitragyna speciosa*, on Electrically Stimulated Contraction of Isolated Guinea-Pig Ileum through the Opioid Receptor. *Life Sci.* **1997**, *60* (12), 933–942.
- [3] 1st Thailand Kratom Academic Conference. การใช้ประโยชน์จากองค์ความรู้ชุมชน และงานวิจัยเกี่ยวกับพืชกระท่อม (Utilization of Community Knowledge and Research on Kratom). <https://kratom.sci.psu.ac.th/knowledge/interdisciplinary/3187/> (accessed Dec 24, 2023).
- [4] Takayama, H. Chemistry and Pharmacology of Analgesic Indole Alkaloids from the Rubiaceae Plant, *Mitragyna speciosa*. *Chem. Pharm. Bull.* **2004**, *52* (8), 916–928.
- [5] Beng, G. T.; Hamdan, M. R.; Siddiqui, M. J.; Mordi, M. N.; Mansor, S. M. A Simple and Cost Effective Isolation and Purification Protocol of Mitragynine from *Mitragyna speciosa* Korth (Ketum) Leaves. *Malays. J. Anal. Sci.* **2011**, *15* (1), 54–60.

ผลของสภาวะน้ำกึ่งวิกฤตต่อลักษณะทางสเปกโทรสโกปีและการเกิดสีน้ำตาลในโปรตีนไฮโดรไลเสตจากจิ้งหรีด

Effects of subcritical water conditions on spectroscopic characteristics and browning formation in cricket protein hydrolysates

ประภาศิริ แก้ววงศ์¹, ประกายรัตน์ พลเนียม¹, รุ่งนภา ภูหมื่อนบุตร¹, สโรชา มันทะกะ¹, ปราโมทย์ คูวิจิตรจารู¹ และขวัญใจ กลิ่นจงกล^{1*}

Prapasiri Kaewwong¹, Prakairat Polniam¹, Rungnapa Phumueanbut¹, Sarocha Montaka¹, Pramote Khuwijitjaru¹, and Khwanjai Klinchongkon^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเกิดสีน้ำตาลในสารสกัดจากผงจิ้งหรีดด้วยเทคนิคน้ำกึ่งวิกฤต (Subcritical water extraction) ในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 260 องศาเซลเซียส โดยใช้ดัชนีความรุนแรง (Severity Factor, $\ln R_0$) เป็นตัวแปรในการควบคุมและประเมินผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการสกัด จากการศึกษาพบว่าค่า $\ln R_0$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิการสกัดอย่างมีนัยสำคัญ ($R^2 = 0.9999$) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อดัชนีความรุนแรงเพิ่มขึ้น สารสกัดมีสีเข้มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร (ดัชนีการเกิดสีน้ำตาล) ที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อค่า $\ln R_0$ มากกว่า 9.47 นอกจากนี้ ผลการสแกนสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-500 นาโนเมตร พบการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีที่สัมพันธ์กับระดับความรุนแรง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการไฮโดรไลซิส (ค่าการดูดกลืนแสงที่ 280 นาโนเมตร) และการเกิดสีน้ำตาล พบว่าในช่วงเริ่มต้นของการสกัดจะเกิดการย่อยสลายโปรตีนเป็นหลัก ก่อนที่สารสกัดจะเข้าสู่ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วในสภาวะที่มีความรุนแรงสูง ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการควบคุมคุณภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสกัดจากแมลงเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่อไป

คำสำคัญ : น้ำกึ่งวิกฤต; ดัชนีความรุนแรง; การเกิดสีน้ำตาล

Abstract

This study aimed to investigate the browning formation in extracts from cricket powder obtained through subcritical water extraction within a temperature range of 100-260°C. The severity

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand

factor ($\ln R_0$) was employed as a key parameter to evaluate the combined effects of extraction temperature and time. The results revealed a strong linear correlation between $\ln R_0$ and extraction temperature ($R^2 = 0.9999$). As the severity index increased, the extracts exhibited a deeper brown color, consistent with the significant rise in absorbance at 420 nm (browning index), particularly at $\ln R_0$ values exceeding 9.47. Ultraviolet-visible (UV-Vis) scanning spectra (200-500 nm) further confirmed chemical transformations corresponding to the extraction severity. The correlation between the protein hydrolysis index (absorbance at 280 nm) and browning formation suggested that protein degradation was the predominant reaction during the initial stages, followed by accelerated browning formation under more severe conditions. These findings provide essential data for controlling the quality and optimizing extraction conditions for insect-based functional ingredients in the food industry.

Keywords: Subcritical water; Severity factor; Browning formation

บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการแหล่งโปรตีนทางเลือก (Alternative proteins) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกและความตระหนักด้านความมั่นคงทางอาหาร แมลงจัดเป็นแหล่งโปรตีนที่มีศักยภาพสูงเนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการครบถ้วน มีกรดอะมิโนที่จำเป็น และใช้ทรัพยากรในการผลิตน้อยเมื่อเทียบกับการปศุสัตว์แบบดั้งเดิม โดยเฉพาะจิ้งหรีดซึ่งเป็นแมลงเศรษฐกิจที่สำคัญและมีการแปรรูปเป็นผงเพื่อใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารอย่างแพร่หลาย (FAO, 2021)

อย่างไรก็ตาม การนำโปรตีนจากแมลงมาใช้ประโยชน์มักประสบปัญหาด้านการละลายและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ การใช้เทคโนโลยีการสกัดด้วยน้ำกึ่งวิกฤต (Subcritical Water Extraction) จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ใช้เพียงน้ำเป็นตัวทำละลายภายใต้อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม ส่งผลให้น้ำมีสมบัติคล้ายตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งสามารถย่อยสลายโครงสร้างโปรตีนให้กลายเป็นเปปไทด์และกรดอะมิโน (Protein Hydrolysis) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Okoro และคณะ, 2023)

ในการสกัดด้วยน้ำกึ่งวิกฤต ปัจจัยด้านอุณหภูมิและเวลามีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยเฉพาะการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Browning formation) หรือปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางแสงและคุณลักษณะของสารสกัด (Kobayashi และคณะ, 2025) การนำดัชนีความรุนแรง (Severity factor: $\ln R_0$) มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมสภาวะการสกัด จึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้สามารถทำนายและควบคุมระดับการไฮโดรไลซิสรวมถึงการเกิดสีน้ำตาลได้อย่างเป็นระบบ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลของความรุนแรงในสภาวะน้ำกึ่งวิกฤตต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและการเกิดสีน้ำตาลในสารสกัดจากผงจิ้งหรีด โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ผ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 280 และ 420 นาโนเมตร ร่วมกับการตรวจสอบลักษณะทางสเปกโทรสโกปี เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาสารสกัดจากแมลงให้มีคุณลักษณะตามที่ต้องการสำหรับอุตสาหกรรมอาหารและฟังก์ชันนัลฟู้ดในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อประเมินผลของความรุนแรงในสภาวะน้ำกึ่งวิกฤตต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและสึ้นน้ำตาลของผงจิ้งหรีด
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความรุนแรงกับคุณลักษณะทางสเปกโทรสโกปีของสารสกัด

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่างผงจิ้งหรีดสกัดไขมัน

นำจิ้งหรีดทองแดงลายสดที่ผ่านการลวกและแช่แข็งมาละลายน้ำแข็งเพื่อตรวจวัดลักษณะทางกายภาพ ก่อนนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (รุ่น QC-C10, ยี่ห้อ Lecon chef) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกำจัดไขมันเบื้องต้นด้วยเครื่องรีดน้ำมันแบบเกลียวหมุน (Single-Screw Press) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส แล้วจึงบดลดขนาดด้วยเครื่องบดอเนกประสงค์ (รุ่น 800Y, ยี่ห้อ Western chef) และกรองผ่านตะแกรงขนาด 16 เมช จากนั้นนำผงจิ้งหรีดไปสกัดไขมันที่เหลือออกอีกด้วยเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 ในอัตราส่วน 1:5 (w/v) กวนผสมอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องกวนสารแม่เหล็กเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง (ทำการสกัดซ้ำ 3 รอบ) จากนั้นกรองแยกตะกอนแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายที่ตกค้าง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกเก็บรักษาในถุงพอลิเอทิลีนที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการผลิตโปรตีนไฮโดรไลเสตต่อไป

การผลิตโปรตีนไฮโดรไลเสตด้วยเทคนิคน้ำกึ่งวิกฤต

นำผงจิ้งหรีดสกัดไขมัน 3 กรัม ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 80 มิลลิลิตร บรรจุลงในเวสเซล (Vessel) ขนาด 100 มิลลิลิตร ของเครื่องไฮโดรไลซ์ด้วยน้ำกึ่งวิกฤต ดำเนินการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100, 140, 180, 220 และ 260 องศาเซลเซียส โดยบันทึกอุณหภูมิทุก 30 วินาทีตลอดกระบวนการ เมื่อถึงอุณหภูมิเป้าหมายให้หยุดปฏิกิริยาทันทีด้วยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอ่างน้ำไหลจนอุณหภูมิคงที่ นำตัวอย่างที่ผ่านการไฮโดรไลซ์มาแยกส่วนของเหลว (ไฮโดรไลเสต) และตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (รุ่น CF0201003 ยี่ห้อ FOUR E'S Scientific) ที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที (ล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนซ้ำ 2 รอบ) จากนั้นนำไฮโดรไลเสตที่แยกได้ไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปวิเคราะห์หาค่าดัชนีความรุนแรงต่อไป

การคำนวณดัชนีความรุนแรง (Severity Factor)

ในการประเมินผลกระทบร่วมกันระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการสกัดด้วยน้ำกึ่งวิกฤต ได้นำข้อมูลโปรไฟล์อุณหภูมิ (Temperature profile) มาคำนวณหาค่าดัชนีความรุนแรง (Severity Factor, $\ln R_o$) ตามแบบจำลองของ Overend และ Chornet (1987) ดังแสดงในสมการที่ (1) โดยกำหนดให้อุณหภูมิอ้างอิง (T_{ref}) เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่น้ำกึ่งวิกฤตเริ่มส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ และใช้ค่าคงที่ 14.75 ซึ่งเป็นค่าที่สัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ของปฏิกิริยาภายใต้สภาวะดังกล่าว ทั้งนี้ ค่า $\ln R_o$ จะใช้เป็นตัวบ่งชี้หลักถึงระดับพลังงานความร้อนสะสมที่ส่งผ่านไปยังวัตถุดิบจิ้งหรีดตลอดช่วงการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิเป้าหมาย

$$R_o = \int_0^t \exp\left(\frac{T(t)-T_{ref}}{14.75}\right) dt \quad (1)$$



เมื่อ $T(t)$ คือ อุณหภูมิภายในระบบ ณ เวลา t ใด ๆ ในระหว่างกระบวนการสกัด และ dt คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการสกัด โดยค่าที่ได้จะถูกนำมาแปลงให้อยู่ในรูปของสเกลลอการิทึมฐานธรรมชาติ ($\ln R_o$) เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลร่วมกับดัชนีทางเคมีอื่น ๆ ต่อไป

การวิเคราะห์สมบัติทางสเปกโทรสโกปีและดัชนีทางเคมี

นำสารสกัดไฮโดรไลเสตมาวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer รุ่น UV-1900, Shimadzu) โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (Wavelength scan) ในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 500 นาโนเมตร เพื่อศึกษาภาพรวมของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีและตำแหน่งการดูดกลืนแสงสูงสุด (Peak absorbance) ต่อมาทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร เพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดระดับการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis index) โดยประเมินจากปริมาณเปปไทด์และกรดอะมิโนที่มีวงแหวนอะโรมาติกซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาในสารสกัด และสุดท้ายคือการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร เพื่อประเมินดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (Browning index) และการสะสมของสารประกอบตัวกลางจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction products) ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะความรุนแรงต่าง ๆ

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดดำเนินการอย่างน้อย 3 ซ้ำ เพื่อนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\text{Mean} \pm \text{SD}$) สำหรับการศึกษความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปร จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($\text{Coefficient of Determination, } R^2$) และวิเคราะห์ด้วยวิธีถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) ในส่วนของข้อมูลเชิงปริมาณจะนำมาทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way Analysis of Variance: ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) โดยการประมวลผลข้อมูลทั้งหมดดำเนินการผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS

ผลและวิจารณ์

ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการสกัดและดัชนีความรุนแรง (Severity Factor)

จากการบันทึกโปรไฟล์อุณหภูมิเทียบกับเวลาในระหว่างกระบวนการสกัดด้วยน้ำกึ่งวิกฤตที่อุณหภูมิ 100 ถึง 260 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 1A) พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้ถึงจุดเป้าหมายมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณเป็นค่าดัชนีความรุนแรงในรูปสเกลลอการิทึมฐานธรรมชาติ ($\ln R_o$) พบว่าค่าดัชนีความรุนแรงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิการสกัดอย่างชัดเจน ($R^2 = 0.9999$) โดยค่า $\ln R_o$ มีค่าอยู่ในช่วง 1.10 ถึง 12.22 ตามลำดับ (ภาพที่ 1B) ซึ่งดัชนีนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณพลังงานความร้อนสะสมที่ส่งผลต่อการสลายตัวของโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีในผงจิ้งหรีด

ลักษณะทางกายภาพและการเกิดสีน้ำตาลในสารสกัด

ลักษณะทางกายภาพของสารสกัดไฮโดรไลเสตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนตามระดับความรุนแรงของการสกัด โดยสารสกัดมีสีเข้มขึ้นจากสีเหลืองอ่อนเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มและสีน้ำตาลไหม้ใน

สภาวะที่ความรุนแรงสูงสุด (ภาพที่ 2) เมื่อพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดการเกิดสีน้ำตาล (Browning Index) พบว่าในช่วงที่ค่าดัชนีความรุนแรงต่ำกว่า 9.47 การเกิดสีน้ำตาลมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อค่า $\ln R_0$ เพิ่มขึ้นสูงกว่า 9.47 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (ภาพที่ 2 ด้านล่าง) ซึ่งแสดงถึงการสะสมของสารประกอบที่มีสีในกลุ่มเมลานอยดิน (Melanoidins) จากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ภายใต้สภาวะความร้อนสูง (Kobayashi และคณะ, 2025)

ลักษณะทางสเปกโทรสโกปีและความสัมพันธ์ระหว่างการไฮโดรไลซิสและการเกิดสีน้ำตาล

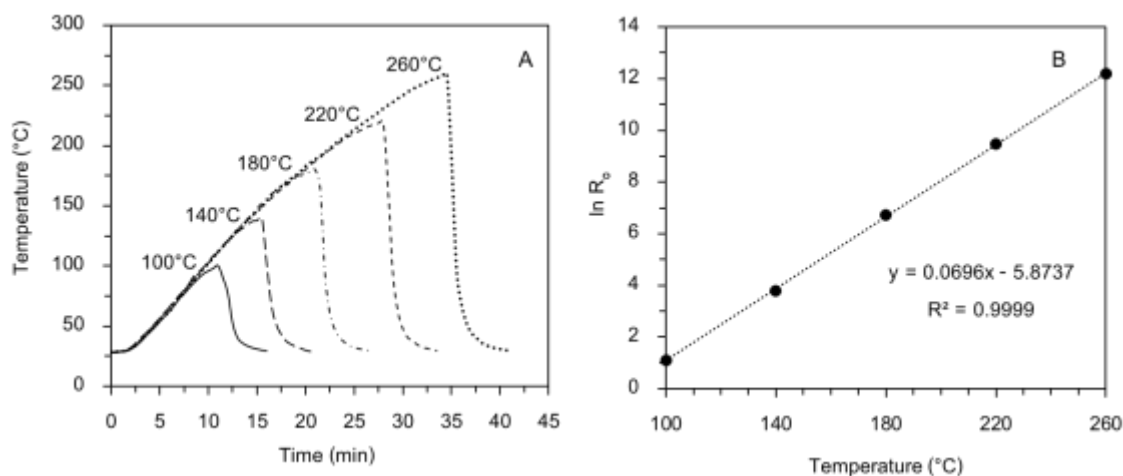
ผลการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 500 นาโนเมตร (ภาพที่ 3A) แสดงให้เห็นว่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดเพิ่มขึ้นตามระดับความรุนแรงที่เพิ่มขึ้น โดยพบตำแหน่งการดูดกลืนแสงสูงสุด (Peak) ที่ชัดเจนในช่วงความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับการปลดปล่อยกรดอะมิโนอะโรมาติกและเปปไทด์จากการย่อยสลายโปรตีน (Protein hydrolysis) เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสหสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการไฮโดรไลซิส (Absorbance at 280 nm) และดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (Absorbance at 420 nm) ในภาพที่ 3B พบว่าในช่วงแรกของการสกัดที่มีความรุนแรงต่ำ ค่าการดูดกลืนแสงที่ 280 นาโนเมตรจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็ว (ความชันสูง) ในขณะที่ค่า 420 นาโนเมตรยังคงต่ำ บ่งชี้ว่าเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายโปรตีนเป็นหลัก แต่เมื่อสภาวะความรุนแรงเพิ่มสูงขึ้น ความชันของกราฟเริ่มลดลงในขณะที่ค่าการเกิดสีน้ำตาล (420 nm) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ว่า สารประกอบที่ได้จากการไฮโดรไลซิสในช่วงแรก เช่น กรดอะมิโนอิสระและน้ำตาลรีดิวซ์ ได้เข้าไปทำปฏิกิริยาต่อเนื่องในปฏิกิริยาเมลลาร์ดจนเกิดเป็นสารประกอบสีน้ำตาลในที่สุด ส่งผลให้ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลเป็นตัวแปรสำคัญในการบ่งชี้ระดับความรุนแรงของสภาวะน้ำกึ่งวิกฤตสำหรับสารสกัดจากผงจิ้งหรีด

สรุป

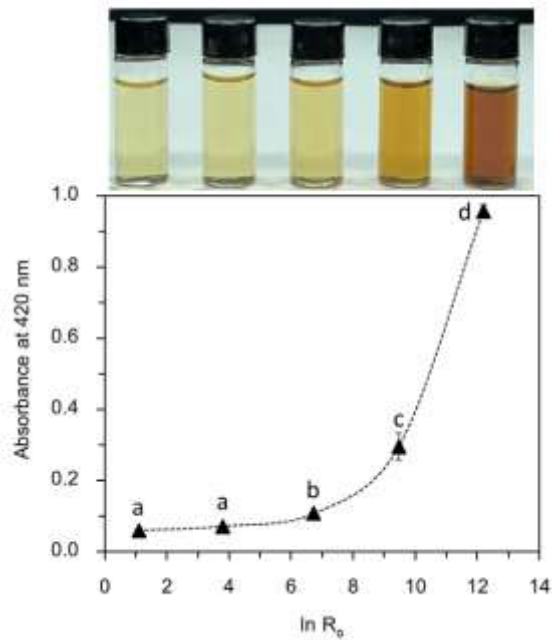
การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าดัชนีความรุนแรง (Severity Factor, $\ln R_0$) เป็นตัวแปรควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูงในการทำนายการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารสกัดจิ้งหรีดภายใต้สภาวะน้ำกึ่งวิกฤต โดยค่า $\ln R_0$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิการสกัดอย่างมีนัยสำคัญ ($R^2 = 0.9999$) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อระดับการย่อยสลายและการเกิดสารประกอบใหม่ในระบบ ในด้านการเปลี่ยนแปลงทางเคมี พบว่ากระบวนการสกัดแบ่งออกเป็นสองระยะหลัก โดยในช่วงเริ่มต้นที่มีความรุนแรงต่ำ ปฏิกิริยาหลักคือ การไฮโดรไลซิสโปรตีน ซึ่งสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของค่าการดูดกลืนแสงที่ 280 นาโนเมตร แต่เมื่อระดับความรุนแรงเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อค่า $\ln R_0$ เกินกว่า 9.47 สารผลิตภัณฑ์จากการย่อยจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องผ่านปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วและเข้มข้นขึ้นตามค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความรุนแรงและการเกิดสีน้ำตาลนี้เป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้อุตสาหกรรมอาหารสามารถออกแบบและควบคุมสภาวะการผลิตโปรตีนไฮโดรไลเสตจากจิ้งหรีดได้อย่างแม่นยำ เพื่อให้ได้สารสกัดที่มีสมบัติทางโภชนาการและลักษณะปรากฏตามวัตถุประสงค์การใช้งานในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

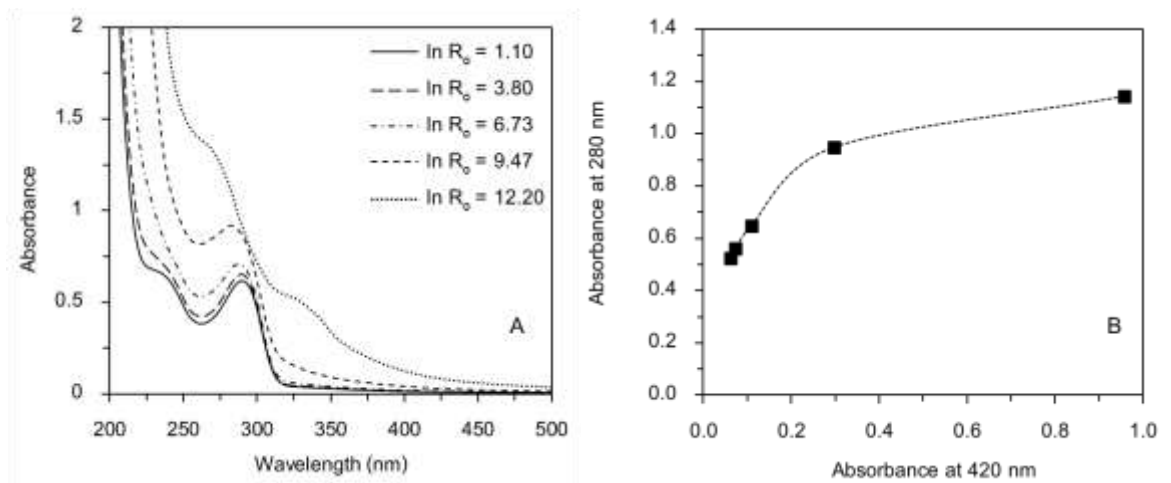
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). Looking at edible insects from a food safety perspective: Challenges and opportunities for the sector., Rome, Italy.
- Kobayashi, T., Khuwijtjaru, P., Klinchongkon, K., Adachi, S., & Watanabe, Y. (2025). Rare Sugar Production through Isomerization of Reducing Sugars in Subcritical Fluids. *Japan Journal of Food Engineering*, advpub, Article 25668. <https://doi.org/10.11301/jsfe.25668>
- Okoro, O. V., Preat, V., Karimi, K., Nie, L., Debaste, F., & Shavandi, A. (2023). Optimizing the subcritical water valorization of insect (*Hermetia illucens* L.) farming waste for biodiesel production. *Chemical Engineering Research and Design*, 196, 413-426. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.06.043>
- Overend, R. P., & Chornet, E. (1987). Fractionation of lignocellulosics by steam-aqueous pretreatments. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 321(1562), 523–536. <https://doi.org/10.1098/rsta.1987.0029>



ภาพที่ 1: (A) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการสกัดที่ระดับต่าง ๆ (100-260 องศาเซลเซียส) และ (B) การหาความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่าดัชนีความรุนแรง ($\ln R_p$) ที่แปรผันตามอุณหภูมิการสกัด



ภาพที่ 2 ลักษณะทางกายภาพและสีของสารสกัดจากผงจิ้งหรีดที่ระดับค่าดัชนีความรุนแรงต่าง ๆ (ด้านบน) และผลของดัชนีความรุนแรงต่อค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร (ด้านล่าง)



ภาพที่ 3: (A) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารสกัดจากผงจิ้งหรีดที่ค่าดัชนีความรุนแรงต่าง ๆ และ (B) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 280 และ 420 นาโนเมตร



การประเมินความร่วมมือในการใช้ยาของผู้ป่วยโรคเบาหวานชนิดที่ 2 ณ โรงพยาบาลระดับจังหวัดในสาธารณรัฐประชาธิปไตยประเทศลาว

Assessment of Medication Adherence Among Patients with Type 2 Diabetes Mellitus at a Provincial Hospital in Lao PD

มูกดา จันทวิสุท¹ สมหญิง พุ่มทอง² และ ฟ้าใส จันทจำรูญ²

Moukda Chanthavisouk¹, Somying Pumtong² and Farsai Chanjaruporn²

ABSTRACT

Background: Medication adherence is a cornerstone of effective type 2 diabetes mellitus (T2DM) management. In Lao PDR, despite the high mortality burden of T2DM, data regarding adherence patterns in provincial settings remain scarce. This study aimed to assess the medication adherence among T2DM outpatients at Champasak Provincial Hospital.

Methods: A cross-sectional study was conducted using the Medication Adherence Scale for Thais (MAST).

Results: Among 256 T2DM outpatients, 96.48% of participants demonstrated poor medication adherence, with a mean score of 22.219 (6.394). Common non-adherent behaviors included forgetting doses (44.14%) and intentional self-adjustment of dosages (41.02%).

Conclusion: Medication adherence at Champasak Provincial Hospital remained suboptimal. Targeted interventions and appropriate mechanisms are required to address this issue and improve patient adherence.

¹หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเภสัชศาสตร์สังคม เศรษฐศาสตร์และการบริหาร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย

Master of Science Program in Social, Economic and Administrative Pharmacy (SEAP), Faculty of Pharmacy, Mahidol University, Bangkok, 10400, Thailand.

² สาขาเภสัชศาสตร์สังคมและการบริหาร ภาควิชาเภสัชกรรม คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย
Division of Social and Administrative Pharmacy, Department of Pharmacy, Faculty of Pharmacy, Mahidol University, Bangkok, 10400, Thailand.



Keywords: Medication Adherence, Type 2 Diabetes Mellitus, Champasak Hospital, Lao PDR, MAST scale.

บทคัดย่อ

ความเป็นมา: ความร่วมมือในการใช้ยา (medication adherence) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการรักษาผู้ป่วยโรคเบาหวานชนิดที่ 2 ในสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับความร่วมมือในการใช้ยาในระดับโรงพยาบาลจังหวัดยังมีจำกัด การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความร่วมมือในการใช้ยาของผู้ป่วยนอกที่เป็นโรคเบาหวานชนิดที่ 2 ณ โรงพยาบาลแขวงจำปาสัก สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว

วิธีการศึกษา: การศึกษาภาคตัดขวาง (cross-sectional study) โดยใช้แบบประเมิน Medication Adherence Scale for Thais (MAST).

ผลการศึกษา: จากกลุ่มตัวอย่างผู้ป่วยทั้งหมด จำนวน 256 ราย พบว่า 96.48% มีความร่วมมือในการใช้ยาในระดับต่ำ โดยมีคะแนนเฉลี่ย 22.219 (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 6.394) โดยพฤติกรรมที่พบบ่อยได้แก่ การลืมรับประทานยา (44.14%) และการปรับขนาดยาตามความต้องการของตนเอง (41.02%)

สรุป: การวิจัยแสดงให้เห็นว่า ระดับความร่วมมือในการใช้ยาของผู้ป่วยในโรงพยาบาลจำปาสักยังอยู่ในระดับต่ำกว่าที่ควร จึงจำเป็นต้องมีมาตรการและกลไกที่เหมาะสมเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวและส่งเสริมความร่วมมือในการใช้ยาของผู้ป่วยให้ดีขึ้น

คำสำคัญ : ความร่วมมือในการใช้ยา, โรคเบาหวานชนิดที่ 2, โรงพยาบาลแขวงจำปาสัก, สาธารณรัฐประชาธิปไตย ประชาชนลาว, แบบวัด MAST

1. Introduction

Diabetes mellitus (DM) is a major public health problem worldwide, placing a significant burden on both healthcare systems and patients. According to the International Diabetes Federation, approximately 537 million adults were living with diabetes in 2021, and this number is projected to rise to 784 million by 2045 (ADA American Diabetes Association standards of medical care in Diabetes, 2021). Of these cases, around 90 million are expected to occur in Southeast Asia alone. In 2021, diabetes was responsible for 2.3 million deaths globally, and healthcare costs related to the disease reached USD 241 billion, accounting for one-quarter of total global health spending (International Diabetes Federation, 2021b). In the Lao People's Democratic Republic (Lao PDR), the



prevalence of type 2 diabetes mellitus (T2DM) among adults was estimated at 6.2% in 2021 (International Diabetes Federation, 2021a). More notably, diabetes was associated with the highest age-standardized mortality rates in the country, recorded at 467.9 per 100,000 in men and 329.8 per 100,000 in women (World Health Organization. Regional Office for the Western Pacific, 2011).

Among chronic diseases, diabetes is considered one of the most demanding conditions in terms of treatment adherence. Patients are required to follow scheduled medication regimens on a long-term basis, making adherence a critical factor in determining treatment outcomes. Good adherence has been recognized not only as a key factor in medication effectiveness but also as an important protective measure against diabetic complications, early death, and rising treatment costs (Ciechanowski et al., 2001). Patients who adhere well to their treatment are significantly more likely to achieve target blood glucose levels compared to those with poor adherence. Comparative data from the Southeast Asian region reveal a significant gap: while the proportion of T2DM patients with high adherence reached 17.1% in neighboring countries such as Thailand and Malaysia, Lao PDR recorded the lowest rate at only 10.4% (Kang & Hur, 2020). Although previous studies have reported general adherence levels in Lao PDR, they tend to lack specific focus on provincial healthcare settings, where patients may face different logistical and socioeconomic challenges compared to those in urban centers.

2. Objective

This study aims to assess the level of medication adherence among patients with type 2 diabetes mellitus attending the outpatient department of Champasak Provincial Hospital in Lao PDR.

3. Methodology

Study Design and Setting

This study used a hospital-based cross-sectional design. Data were collected from December 2024 to January 2025 at the diabetes outpatient clinic of Champasak Provincial Hospital, a major secondary healthcare facility serving the southern region of Lao PDR.

Participants and Sampling

The target population consisted of outpatients with a confirmed diagnosis of type 2 diabetes mellitus (ICD-10 code E11*). A total of 256 patients were enrolled in the study. The sample size was calculated based on a total clinic population of 402 patients, using a standard sample size formula at a 95%



confidence level, with an additional 30% added to account for potential non-responses or incomplete data. Participants were selected through convenience sampling and were required to meet the following inclusion criteria: (1) aged 18 years or older; (2) a confirmed diagnosis of T2DM for at least six months; and (3) able to read, write, and speak the Lao language. Patients who were unable to communicate or who declined to provide consent were excluded from the study.

$$n = \frac{z^2 \cdot N \cdot p(1 - p)}{d^2(N - 1) + z^2 \cdot p(1 - p)}$$

Instrumentation

Medication adherence (MA) was measured using the Medication Adherence Scale for Thais (MAST), an 8-item self-administered questionnaire designed to assess both medication-taking behaviours and barriers to adherence (Jongwilaikasem & Lerkiatbundit, 2021). Each item uses a 6-point response scale reflecting the frequency of non-adherent behaviours over the preceding month, with individual item scores ranging from 0 to 5. The total possible score ranges from 0 to 40, where a score of 34 or above indicates good medication adherence and a score below 34 indicates poor medication adherence. The questionnaire was translated into Lao by professional translators, and medication-related content was adapted to align with Lao national treatment guidelines.

Data Collection

Data collection involved two components: administration of the self-reported MAST questionnaire and extraction of demographic information from participants' medical records. Demographic variables included age, sex, educational level, disease duration, number of medicines currently taken, and comorbidity. For participants who experienced difficulty completing the questionnaire due to low literacy or physical limitations such as visual impairment, trained study personnel assisted in administering the questionnaire to ensure completeness and data quality.

Statistical Analysis

All data were coded and analyzed using SPSS version 18.0. Descriptive statistics, including means, standard deviations, and percentages, were used to summarize the prevalence and level of medication adherence.



Ethical Approval

Ethical approval for this study was obtained from the Lao National Ethics Committee for Health Research (Reference No. 90/NECHR) and Mahidol University (Reference No. 78.0319/EC.0808). All participants received a detailed information sheet and provided written informed consent prior to enrolment. To ensure confidentiality, all data were anonymized and assigned participant codes throughout the study.

4. Results

Sample Characteristics and Clinical Status

A total of 256 participants diagnosed with type 2 diabetes mellitus were included in this study (Table 1). The majority of participants were female, accounting for 66.41% ($n = 170$) of the sample. By age group, most participants (53.13%) were between 50 and under 70 years of age, followed by those under 50 years (27.34%) and those aged 70 years or older (19.53%). Regarding educational background, more than half of the participants (53.91%) had completed primary, secondary, or college-level education, while 16.80% reported no formal schooling.

Medication Adherence

Medication adherence was presented in Table 2. The majority of participants (96.48%, $n = 247$) were classified as having poor medication adherence, while only 3.52% ($n = 9$) were classified as having good adherence. The mean adherence score for the entire sample was 22.219 ± 6.394 , which is well below the threshold score of 34 required for classification as good adherence.

Analysis of specific medication-taking behaviours over the preceding month identified several common patterns of non-adherence. Forgetting to take medication was the most frequently reported behaviour, with 44.14% of participants indicating they forgot to take their medication three to five times per month. A notable proportion of participants (41.02%) reported changing their prescribed dose based on personal judgment three to five times per month. More than one-third of participants (36.72%) reported stopping their medication entirely three to five times per month, and 33.98% reported taking their medication more than one hour off schedule at a similar frequency. Only 3.91% of participants reported never skipping or postponing a medical appointment. A considerable proportion (16.02%) frequently postponed clinic visits, which was directly associated with missed doses.



4. Discussion

The findings of this study reveal a critical medication adherence gap at Champasak Provincial Hospital, with an overwhelming 96.48% of participants classified as having poor adherence. The mean adherence score was 22.219 ± 6.394 . This rate of poor adherence is alarmingly high compared to figures reported in other global studies of T2DM patients, where non-adherence typically ranges from 30% to 70% (Polonsky & Henry, 2016; Sabaté, 2003).

The most frequently reported non-adherent behaviours were forgetting doses (44.14% reporting these 3 to 5 times per month) and intentionally self-adjusting prescribed dosages (41.02%). These patient behaviours may be related to financial and logistical constraints. First, out-of-pocket healthcare expenses remain a significant burden for many patients in Laos (Ito et al., 2022). The intentional self-adjustment of dosages and the cessation of medication entirely (reported by 36.72% of patients) may be practical coping mechanisms; patients often ration their pills to stretch their medication supply and delay the financial cost of purchasing refills.

Furthermore, accessing secondary healthcare facilities like Champasak Provincial Hospital involves significant logistical challenges for patients residing outside the immediate urban centre. Factors such as transportation costs, time away from work, and long clinic waiting times are plausible contributors that may lead patients to postpone visits, run out of medication, and inadvertently skip doses (Ito et al., 2022).

To mitigate this adherence crisis, interventions in Lao PDR must address these structural barriers. Hospital management and provincial health authorities should explore systemic solutions, such as decentralizing chronic disease medication refills to local community health centres or extending the days-supply of prescriptions to reduce the frequency of mandatory hospital visits. Additionally, integrating routine adherence screening using validated tools like the MAST scale can help providers quickly identify patients who are struggling with access or costs.

This study has several limitations. First, the cross-sectional, single-centre design precludes causal conclusions and limits the generalizability of findings to diverse rural populations across Lao PDR. Second, reliance on self-reported questionnaires introduces potential recall and social desirability biases. Future research should employ objective adherence measures, incorporate detailed pharmacological parameters (e.g., dosing frequency, timing, and insulin use), and utilize qualitative methods to comprehensively explore the economic and systemic drivers of adherence.



5. Conclusion

This study highlights a critical public health concern at Champasak Provincial Hospital, where 96.48% of patients exhibit poor medication adherence. Future research should further investigate potential factors associated with poor medication adherence, including socioeconomic conditions, healthcare accessibility, and other contextual influences, to better understand the challenges faced by patients with T2DM in Lao PDR.



REFERENCES

- ADA American Diabetes Association standards of medical care in Diabetes. (2021). *Diabetes Care: The journal of clinical and applied research and Education* 40.
<https://diabetesatlas.org/>
- Ciechanowski, P. S., Katon, W. J., Russo, J. E., & Walker, E. A. (2001). The patient-provider relationship: attachment theory and adherence to treatment in diabetes. *American Journal of Psychiatry*, 158(1), 29-35.
- International Diabetes Federation. (2021a). *IDF Diabetes Atlas*.
<https://diabetesatlas.org/data/en/compare/108-108/idf-country-data-comparison.html>
- International Diabetes Federation. (2021b). *IDF Diabetes Atlas Western Pacific*.
<https://diabetesatlas.org/data/en/region/8/wp.html>
- Ito, T., Kounnavong, S., & Miyoshi, C. (2022). Financial burden and health-seeking behaviors related to chronic diseases under the National Health Insurance Scheme in Bolikhamxay Province, Lao PDR: a cross-sectional study. *International Journal for Equity in Health*, 21(1), 180.
<https://doi.org/10.1186/s12939-022-01788-0>
- Jongwilaikasem, K., & Lerkiatbundit, S. (2021). Development of the medication adherence scale for Thais (MAST). *Thai Journal of Pharmacy Practice*, 13(1), 17-30.
- Kang, Y., & Hur, Y. (2020). Medication adherence and its associated factors in Laotians with type 2 diabetes mellitus. *Clinical Nursing Research*, 29(5), 331-338.
- Polonsky, W. H., & Henry, R. R. (2016). Poor medication adherence in type 2 diabetes: recognizing the scope of the problem and its key contributors. *Patient preference and adherence*, 1299-1307.
- Sabaté, E. (2003). *Adherence to long-term therapies: evidence for action*. World health organization.
- World Health Organization. Regional Office for the Western Pacific. (2011). *WHO country cooperation strategy for the Lao People's Democratic Republic, 2012-2015*.
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/206566>



Table 1. Participant characteristics

Characteristics	n (%)	Characteristics	n (%)
Age		Education level	
<50	70 (27.34)	No school	43 (16.80)
50-<70	136 (53.13)	Primary. Secondary or college	138 (53.91)
≥70	50 (19.53)	University or Postgraduate	75 (29.30)
Gender		Number of medicines currently taken	
Male	86 (33.59)	1-2	133 (51.95)
Female	170 (66.41)	≥ 3	123 (48.05)
Disease duration		Comorbidity	
< 5 years	124 (48.44)	1-2	133 (51.95)
≥ 5 years	132 (51.56)	≥ 3	123 (48.05)

Table 2. Medication adherence among study participants

No	Items	The frequency of not using medication within 1 month					
		> 15 times	10-15 times	6-9 times	3-5 times	1-2 times	Never
1	During the past month, how often have you forgotten to take your medicine (forgot to take a dose)?	1 (0.39)	7 (2.73)	56 (21.88)	113 (44.14)	64 (25.00)	15 (5.86)
2	During the past month, how often have you changed the dosage according to your needs (i.e. take more or less than you should)?	1 (0.39)	6 (2.34)	59 (23.05)	105 (41.02)	55 (21.48)	30 (11.72)
3	During the past month, how often have you stopped taking your medicine?	0 (0.00)	20 (7.81)	79 (30.86)	94 (36.72)	40 (15.63)	23 (8.98)

The frequency of not using medication within 1 month

No	Items	> 15 times	10-15 times	6-9 times	3-5 times	1-2 times	Never
4	During the past month., how often have you not taken your medicine on time (Before or after more than 1 hour than the time you usually take)?	3 (1.17)	28 (10.94)	82 (32.03)	87 (33.98)	37 (14.45)	19 (7.42)
5	During the past month, how often have you not taken all the medicine you need?	3 (1.17)	23 (8.98)	72 (28.13)	89 (34.77)	39 (15.23)	30 (11.72)
6	During the past month, how often do you miss the dose, for example, you forget to take it or bring your medicine to work to take during the day or when you travel long distance?	9 (3.52)	27 (10.55)	72 (28.13)	85 (33.20)	40 (15.63)	23 (8.98)
7	How often do you miss or postpone doctor's appointments?	22 (8.59)	41 (16.02)	67 (26.17)	74 (28.91)	42 (16.41)	10 (3.91)
8	How often have you missed or forgotten to take medicine because you didn't attend your doctor's appointment?	20 (7.81)	45 (17.58)	69 (26.95)	72 (28.13)	46 (17.97)	4 (1.56)

Level of Medication adherence

Poor	247 (96.48%)
Good	9 (3.52%)
Mean (standard deviation)	22.219 (6.394)

ผลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่ใช้หลังคาแผ่นพอลิเอสเตอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วต่อพฤติกรรมการทำแห้งปลานิลแดดเดียว

Effect of a Greenhouse Solar Dryer using Polyester Roof Reinforced with Glass Fiber on the Drying Behavior of Nile Tilapia

ธนพงศ์ พิเศษเมธา¹, กุลกัณฐ์ สุขะยากูล¹, บุศรากรณ์ มหาโยธี¹, ศราวุธ ภูไพบิจิตรกุล² และ ไฉม บุญจันทร์³
 Thanapong Pisasmatha¹, Kulkamthon Suchayagool¹, Busarakorn Mahayothee¹,
 Sarawut Phupaichitkun² and Chome Boonchan³

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการทำแห้งของปลานิลแดดเดียวระหว่างการใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่ใช้หลังคาแผ่นพอลิเอสเตอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและการตากแดดธรรมชาติ โดยนำปลานิลหมักน้ำปลามาตากแบบชั้นเดียว (Single layer) ผลการทดลองพบว่าแผ่นพอลิเอสเตอร์สามารถส่งผ่านรังสีอาทิตย์ได้ดี ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดอยู่ในช่วงเวลา 12.00 - 13.00 น. แม้ว่าความเข้มรังสีภายในระบบอบแห้งจะต่ำกว่าภายนอก แต่ปรากฏการณ์เรือนกระจกช่วยให้ระบบสามารถกักเก็บความร้อนทำให้อุณหภูมิภายในระบบมีค่าสูงกว่าภายนอกและนานกว่า โดยอุณหภูมิภายในระบบที่ใช้หลังคาแบบนี้มีค่าสูงกว่าการตากแดด 5-20 องศาเซลเซียสตลอดระยะเวลาการอบแห้งและไม่สูงกว่า 60 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ ภายในระบบต่ำกว่าภายนอก 10-20% สรุปได้ว่าระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีประสิทธิภาพในการทำปลานิลแดดเดียวได้ดีกว่าการตากแดดที่อาศัยช่วงเวลาของการรับแสงแดดและความเร็วลมตามธรรมชาติเป็นหลัก

คำสำคัญ : พฤติกรรมการทำแห้ง ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ปลานิล

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย
 Department of food technology, Faculty of engineering and industrial technology, Silpakorn university, Nakhon Pathom 73000, Thailand

² ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย
 Department of materials science and engineering, Faculty of engineering and industrial technology, Silpakorn university, Nakhon Pathom 73000, Thailand

³ สำนักวิชาการเกษตรนวัตกรรม สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา ระยอง 21210 ประเทศไทย
 School of innovative, Chitralada technology institute, Rayong 21210, Thailand



Abstract

This study aims to investigate and compare the drying behavior of sun-dried Nile tilapia using a greenhouse solar dryer versus traditional open-air sun drying. Fish marinated in sauce were arranged in a single layer for both methods. The experimental results showed that the peak solar radiation occurred between 12:00 PM and 1:00 PM. Although the solar radiation intensity inside the dryer was lower than outside, the greenhouse effect allowed for heat retention, resulting in higher internal temperatures and longer than sun drying. The greenhouse solar dryer performs with an efficiency similar to traditional sun drying which can be attributed to higher ambient wind speeds outdoors, which effectively facilitated surface moisture evaporation. While the drying rate (DR) of greenhouse solar dryer performs higher efficiency of drying than sun drying which rely on solar radiation and wind speed only.

Keywords : Solar drying, Drying behavior, Nile tilapia

บทนำ

ปลานิล (Nile tilapia) หรือชื่อวิทยาศาสตร์ *Oreochromis niloticus* เป็นสายพันธุ์ปลาน้ำจืดที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ มีความสามารถปรับตัวตามสภาพแวดล้อมได้ดีและขยายพันธุ์อย่างรวดเร็ว เป็นที่นิยมรับประทานในหมู่ผู้บริโภค (Munguti et al., 2022; El-Sayed & Fitzsimmons, 2023; Islamy et al., 2024) เป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายว่าปลานิลเป็นแหล่งโปรตีนคุณภาพสูง อุดมไปด้วยกรดอะมิโนที่จำเป็น กรดไขมันไม่อิ่มตัว (PUFAs) วิตามิน และแร่ธาตุ (Pratama et al., 2020) เนื้อปลานิลมีความชื้นสูงและมีไขมันไม่อิ่มตัวมาก ทำให้ง่ายต่อการออกซิเดชันของไขมันและการสลายตัวด้วยเอนไซม์ เป็นที่มาของการเน่าเสียจากจุลินทรีย์ หากไม่เก็บรักษาด้วยวิธีที่มีประสิทธิภาพ (Tavares et al., 2021) ทำให้มีความจำเป็นต้องมีการถนอมอาหารเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ทั้งในด้านกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสได้ (Senas et al., 2026)

การทำแห้งในรูปปลานิลแดดเดียวเป็นหนึ่งในเทคนิคการถนอมปลานิล โดยลดปริมาณความชื้นให้ต่ำลงในระดับที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Fitri et al., 2022; Sengar et al., 2025) ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน ช่วยลดต้นทุนด้านพลังงาน และได้รับความนิยม อย่างไรก็ตาม การทำแห้งด้วยการตากแดดปลานิลแบบทั่วไป ยังคงมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น อุณหภูมิอากาศไม่สูงมากพอจะไล่ความชื้นในปลา ความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูง การปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ง่าย จึงได้มีการนำเทคโนโลยีการทำแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยโครงสร้างหลังคาแบบพาราโบลาช่วยสะท้อนและกระจายรังสีแสงอาทิตย์เข้าสู่ภายในโดมได้ทั่วถึงมากกว่าการอบแห้งกลางแจ้ง ทำให้อุณหภูมิภายในระบบให้สูงกว่าภายนอกอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถรักษาความชื้นสัมพัทธ์ในระดับต่ำ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเร่งกระบวนการระเหยน้ำและทำให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Janjai et al., 2011) ปัญหาของการใช้หลังคาที่ทำมาจากวัสดุพอลิคาร์บอเนตที่ใสหนา 5 มิลลิเมตรและมีช่องว่างอากาศภายใน คุณสมบัติการเป็น



อุณหภูมิความร้อนทำให้ระบบบ่อแห้งสามารถกักเก็บพลังงานไว้ได้ดี ในช่วงกลางวันอุณหภูมิภายในสูงมากกว่า 60 องศาเซลเซียส และอาจถึง 70 องศาเซลเซียส ในบางพื้นที่และบางช่วงปี ทำให้ได้เนื้อปลาสุกแทนที่จะได้เนื้อปลาแดดเดียว งานวิจัยนี้ได้นำแผ่นพอลิเอสเตอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วมาใช้เป็นวัสดุหลังคา โดยใช้เป็นแผ่นเรียบไม่มีช่องว่างอากาศเพื่อลดความเป็นฉนวนทางความร้อน เพื่อให้อุณหภูมิภายในระบบสูงกว่าภายนอก แต่ไม่สูงจนทำให้โปรตีนแปรสภาพไป และทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการอบปลานิลแดดเดียวภายในระบบบ่อแห้งแบบพาราโบลากับการตากแดด อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาการใช้แผ่นโพลีเอสเตอร์เสริมใยแก้วในระบบบ่อแห้งปลานิลแดดเดียว

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำแห้งปลานิลแดดเดียวด้วยระบบบ่อแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่ใช้หลังคาแผ่นพอลิเอสเตอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วเทียบกับการตากแดด

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

ปลานิล (Nile tilapia) สังกี้อปลานิลสดที่ผ่านการตัดแต่งจากฟาร์มในจังหวัดนครปฐม จำนวน 115 กิโลกรัม นำมาล้างทำความสะอาดทำการสะเด็ดน้ำ นำไปหมักด้วยน้ำปลา เก็บในถุงพลาสติกและแช่ในน้ำแข็ง 12 ชั่วโมง ก่อนการทำแห้ง

การทำแห้งปลานิลแดดเดียวด้วยระบบบ่อแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดด

ในการทำแห้งปลานิลจะทำในวันที่ 4 สิงหาคม พ.ศ.2568 ในเวลา 8.00-16.00น. ในการทำแห้งจะนำปลานิลที่ผ่านการเตรียมน้ำหนักเฉลี่ยตัวละ 190 กรัม จำนวน 5 ตัว มาเรียงแบบชั้นเดียว (Single layer) ในถาดสำหรับใช้ศึกษาพฤติกรรมการทำแห้ง ทำการชั่งน้ำหนักถาดเปล่าและน้ำหนักถาดพร้อมตัวอย่างตอนเริ่มต้น นำถาดสำหรับใช้ศึกษาเข้าระบบบ่อแห้งฯ ตำแหน่ง ด้านหน้า ตรงกลาง และด้านหลังของระบบบ่อแห้งฯ และตากภายนอกระบบบ่อแห้ง (การตากแดด) ปลานิลที่เหลือนำไปเรียงในถาดโดยรอบภายในระบบบ่อแห้งฯ ในระหว่างการทำแห้งจะทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างพร้อมถาดสำหรับใช้ศึกษาทุกๆ 1 ชั่วโมง และมีการจดบันทึกอุณหภูมิและความชื้นด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แบบอัตโนมัติ (Data logger, GM1365) ความเข้มรังสีอาทิตย์ด้วยเครื่องวัดความเข้มแสง (TM-750, Tenmars) และวัดความเร็วลมด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบ Hotwire (testo 405i, Testo) นำตัวอย่างปลานิลสดก่อนทำแห้ง ปลานิลหลังตากแดดและทำแห้งในระบบบ่อแห้ง ไปหาความชื้นโดยวิธีการอบแห้ง เพื่อใช้คำนวณความชื้นในแต่ละเวลา เนื่องจากอุณหภูมิภายในระบบมีค่าไม่คงที่จึงยากต่อการวัดค่าความชื้นที่จุดสมดุลได้ การสร้างกราฟการทำแห้งในงานนี้จึงเลือกใช้ค่าสัดส่วนความชื้นระหว่างความชื้น ณ เวลานั้น เปรียบเทียบกับความชื้นเริ่มต้นสำหรับกราฟการทำแห้งดังสมการที่ 1 และ กราฟอัตราการทำแห้ง โดยใช้สมการที่ 2 กระบวนการเตรียมวัตถุดิบและกระบวนการทำแห้งแสดงดังภาพที่ 1

$$MR = X_t/X_0$$

สมการ 1

โดยที่ MR = อัตราส่วนความชื้น, X_t = ความชื้นที่เวลาอบแห้งที่แตกต่างกัน (d.b.), X_0 = ความชื้นเริ่มต้น (d.b.)

$$DR = \frac{W_d \cdot (X_n - X_{n+1})}{t_{n+1} - t_n} \quad \text{สมการ 2}$$

โดยที่ DR = อัตราการอบแห้ง (g water/g dry solid · h), W_d = น้ำหนักของแห้ง (Dry mass)(g), X_n = ความชื้นเริ่มต้น (d.b.), X_{n+1} = ความชื้นที่เวลาใดๆ (d.b.), t_n = เวลาเริ่มต้น และ t_{n+1} = เวลาใดๆ (ชั่วโมง)

ผลและวิจารณ์

การศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งด้วยระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่ใช้แผ่นพอลิเอสเตอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว เมื่อได้รับแสงอาทิตย์แผ่นหลังคายังคงให้แสงอาทิตย์ส่องผ่านหลังคาได้ 75-90 % ดังแสดงในภาพที่ 2ก รังสีอาทิตย์จะมีความเข้มข้นสูงในช่วงเวลา 12:00-13:00 น. ด้วยโครงสร้างหลังคาแบบพาราโบลาและพื้นที่ซีเมนต์ เมื่อระบบได้รับพลังงานแสงจะกักเก็บความร้อนไว้ภายในระบบ ส่งผลให้ระบบยังคงมีอุณหภูมิสูงแม้ว่าจะมีความเข้มแสงลดลงในช่วงบ่าย 14:00-16:00 น. ดังแสดงในภาพที่ 3 การทำแห้งปลานิลแดดเดียวในระบบอบแห้งซึ่งเป็นระบบปิดรอบด้านมีทางลมเข้าด้านหน้าและระบายความชื้นด้วยพัดลมด้านหลังระบบอบแห้ง ทำให้ความเร็วลมภายในระบบต่ำเมื่อเทียบกับความเร็วลมภายนอกหรือการตากแดด (ภาพที่ 2ข) การอบแห้งภายในระบบจึงได้รับอิทธิพลของความเร็วลมน้อยกว่าการตากแดด เนื่องจากแผ่นหลังคาเป็นแผ่นหลังคาชั้นเดียวไม่มีช่องว่างอากาศทำให้คุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนน้อยกว่ากรณีที่ใช้แผ่นพอลิคาร์บอเนตที่มีลักษณะลูกฟูกมีช่องว่างอากาศตรงกลางเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกจากระบบ อุณหภูมิภายในระบบที่ใช้หลังคาแบบนี้มีค่าสูงกว่าการตากแดด 5-20 องศาเซลเซียสตลอดระยะเวลาการอบแห้งและไม่สูงกว่า 60 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ภายในระบบอยู่ในช่วง 20-55% ทำให้เหมาะสมกับการอบแห้งอาหารแห้งที่ไม่ต้องการสุก อย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ปลานิลแดดเดียว ผลิตภัณฑ์หมูแดดเดียว เป็นต้น

ระบบอบแห้งแบบเรือนกระจกรูปพาราโบลา ถูกออกแบบเพื่อใช้ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ในปริมาณมากด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาพฤติกรรมการทำแห้งในระบบสามบริเวณได้แก่ บริเวณหน้าที่ใกล้ทางเข้าของอากาศ บริเวณกลางระบบ และบริเวณท้ายระบบที่ใกล้กับพัดลมดูดความชื้น จากกราฟการอบแห้ง (ภาพที่ 4ก และ 4ข) ทำให้เห็นประสิทธิภาพการอบแห้งภายในระบบสูงกว่าตากแดด และบริเวณด้านหลังของระบบมีอัตราการอบแห้งใกล้เคียงกับการตากแดด อย่างไรก็ตามการทำแห้งด้วยการตากแดดได้รับผลกระทบจากความเร็วลมที่สูงและช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการพาได้ดีกว่า ในขณะที่การทำแห้งภายในระบบได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิที่สูงและยาวนานกว่าการตากแดด

อุณหภูมิของทั้งสามบริเวณด้านหน้ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกับด้านหลัง และมีค่าสูงกว่าบริเวณตรงกลางเล็กน้อยในช่วงต้น แต่กลับมีค่าต่ำกว่าในช่วงท้ายของการอบเพียงเล็กน้อย ทำให้ทราบถึงการกระจายตัวที่ค่อนข้างดีของความร้อนในระบบ ทั้งนี้ความแตกต่างดังกล่าวอาจรับผลกระทบจากความร้อนที่ผนังด้านข้างของระบบในช่วงต้นและการคายพลังงานของพื้นที่ซีเมนต์ในช่วงท้ายของการอบ อุปกรณ์ที่ใช้เป็นการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์บริเวณชั้นปลา ทำให้ทราบได้ว่าชั้นปลาที่อยู่บริเวณ



ด้านหน้ามีการอบแห้งที่สูงกว่าทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์บริเวณใกล้เคียงมีค่าสูง กราฟการอบแห้งบริเวณด้านหน้าใกล้ทางเข้าของอากาศในระบบมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งในบริเวณอื่น ๆ จากกราฟอัตราการอบแห้งจะเห็นอัตราการอบแห้งที่สูงในช่วงความชื้นสูงและลดลงในช่วงความชื้นต่ำเป็นผลดีต่อการอบแห้ง กราฟอัตราการอบแห้งของระบบอบแห้งตลอดช่วงความชื้นของปลาตั้งแต่ 1-3 g water/g dry solid ในขณะที่อัตราการอบแห้งแบบตากแดดจะลดลงอย่างรวดเร็วภายหลังความชื้นฐานแห้งต่ำกว่า 2 ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาแสงแดดมีความเข้มแสงลดลง ในขณะที่ระบบอบแห้งยังคงเก็บพลังงานไว้ในระบบและรักษาอุณหภูมิให้นานกว่าจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ ได้ทำการศึกษาค้นคว้าอย่างปลาตากแห้ง โดยใช้ระบบอบแห้งแบบอุโมงค์พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar tunnel dryer) โดยมีอุณหภูมิ 35.1°C ถึง 52.2°C พบว่า อุณหภูมิอากาศภายในระบบมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดความยาวของเครื่องอบ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่วางอยู่ตามตำแหน่งต่างๆ เกิดการอบแห้งที่สม่ำเสมอ (Uniformly dried) เช่นเดียวกัน ทั้งนี้ การที่อุณหภูมิในระบบอบแห้งปลานิลสูงกว่าการตากแดดธรรมชาติ 5-20 °C เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการพาความชื้นออกจากตัวปลาได้ดีกว่าการตากแดด

สรุป

การทำแห้งปลานิลแดดเดียวด้วยระบบอบแห้งแบบเรือนกระจกที่ใช้แผ่นพอลิเอสเตอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วสามารถใช้ทำแห้งปลานิลแดดเดียวได้ประสิทธิภาพการทำแห้งได้ดีกว่าการตากแดด แม้ว่าความเร็วลมในระบบอบแห้งมีค่าต่ำกว่าภายนอก การอบแห้งในระบบเรือนกระจกมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการตากแดดเนื่องจากระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่าการตากแดดและเก็บรักษาความร้อนไว้ได้นานกว่า ในขณะที่การตากแดดอัตราการอบแห้งขึ้นกับระยะเวลาที่รับแสงแดดเพียงอย่างเดียว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้อยู่ภายใต้โครงการ การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรม เรื่อง การศึกษาการใช้แผ่นโปร่งแสง (translucent sheet) ของบริษัท สยามไฟเบอร์กลาส จำกัด ต่อสมรรถนะและการใช้งานระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดเล็ก ตามแบบมาตรฐาน สนับสนุนงบประมาณการวิจัย โดย บริษัท สยามไฟเบอร์กลาส จำกัด ประเทศไทย



เอกสารอ้างอิง

El-Sayed, A.M. and Fitzsimmons, K. (2023). From Africa to the world—The journey of Nile tilapia.

Rev.

Aquac., 15(S1): 6–21. <https://doi.org/10.1111/raq.12738>

Fitri, N.; Chan, S.X.Y.; Lah, N.H.C.; Jam, F.A.; Misnan, N.M.; Kamal, N.; Sarian, M.N.; Lazaldin, M.A.M.;

Low, C.F.; Hamezah, H.S.; Rohani, E.R.; Mediani, A. and Abas, F. (2022). A comprehensive review on the processing of dried fish and the associated chemical and nutritional changes.

Foods, 11(19): 2938. <https://doi.org/10.3390/foods11192938>

Islamy, R.A.; Hasan, V.; Poong, S.-W.; Kilawati, Y.; Basir, A.P. and Kamarudin, A.S. (2024).

Antigenotoxic

activity of *Gracilaria* sp. on erythrocytes of Nile tilapia exposed by methomyl-based pesticide. Iraqi J. Agric. Sci., 55(6): 1936–1946.

<https://jcoagri.uobaghdad.edu.iq/index.php/intro/article/view/2087>

Janjai, S., Intawee, P., Kaewkiew, J., Sritus, C., & Khamvongsa, V. (2011). A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. *Renewable Energy*, 36(3), 1053-1062. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.09.008>

Munguti, J.M.; Nairuti, R.; Iteba, J.O.; Obiero, K.O.; Kyule, D.; Opiyo, M.A.; Abwao, J.; Kirimi, J.G.; Outa,

N.; Muthoka, M.; Githukia, C.M. and Ogello, E.O. (2022). Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758) culture in Kenya: Emerging production technologies and socio-economic impacts on local livelihoods. *Aquac. Fish Fish.*, 2(4): 265–276.

<https://doi.org/10.1002/aff2.58>

Petrus Senas, Irawadi Gunawan, R Adharyan Islamy (2026). Effect of Drying Methods on Physicochemical and Sensory Characteristics of the Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Fillets. Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries Zoology Department, Faculty of Science, Ain Shams University, Cairo, Egypt. ISSN 1110 – 6131 Vol. 30(2): 1801 – 1816 (2026) www.ejabf.journals.ekb.eg

Pratama, W.A.; Nursyam, H.; Hariati, A.M.; Islamy, R.A. and Hasan, V. (2020). Short Communication: Proximate analysis, amino acid profile and albumin concentration of various weights of Giant Snakehead (*Channa micropeltes*) from Kapuas Hulu, West Kalimantan, Indonesia.

Biodiversitas, 21(3). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210346>



Sengar, N.S.; Sahu, V.; Jakhar, J.K.; Dhruve, D.; Ngasotter, S.; Tameshwar; Gendley, M.K. and Jakhar, S.

(2025). Drying and smoking of fish: nutritional significance, safety concerns and emerging technologies for food security. J. Fish., 13(3): 133301. <https://doi.org/10.17017/j.fish.1085>

Tavares, J.; Martins, A.; Fidalgo, L.G.; Lima, V.; Amaral, R.A.; Pinto, C.A.; Silva, A.M. and Saraiva, J.A.

(2021). Fresh fish degradation and advances in preservation using physical emerging technologies. Foods, 10(4): 780. <https://doi.org/10.3390/foods10040780>

(ก)



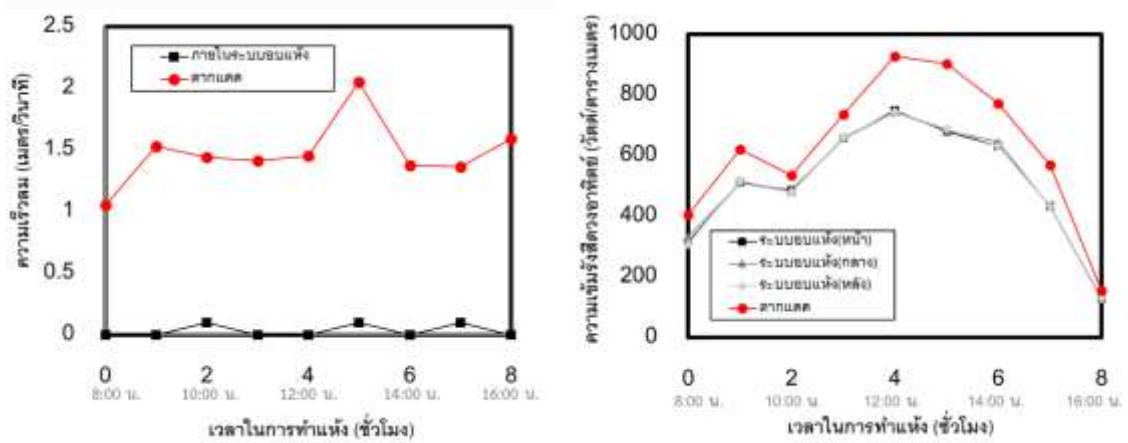
(ข)



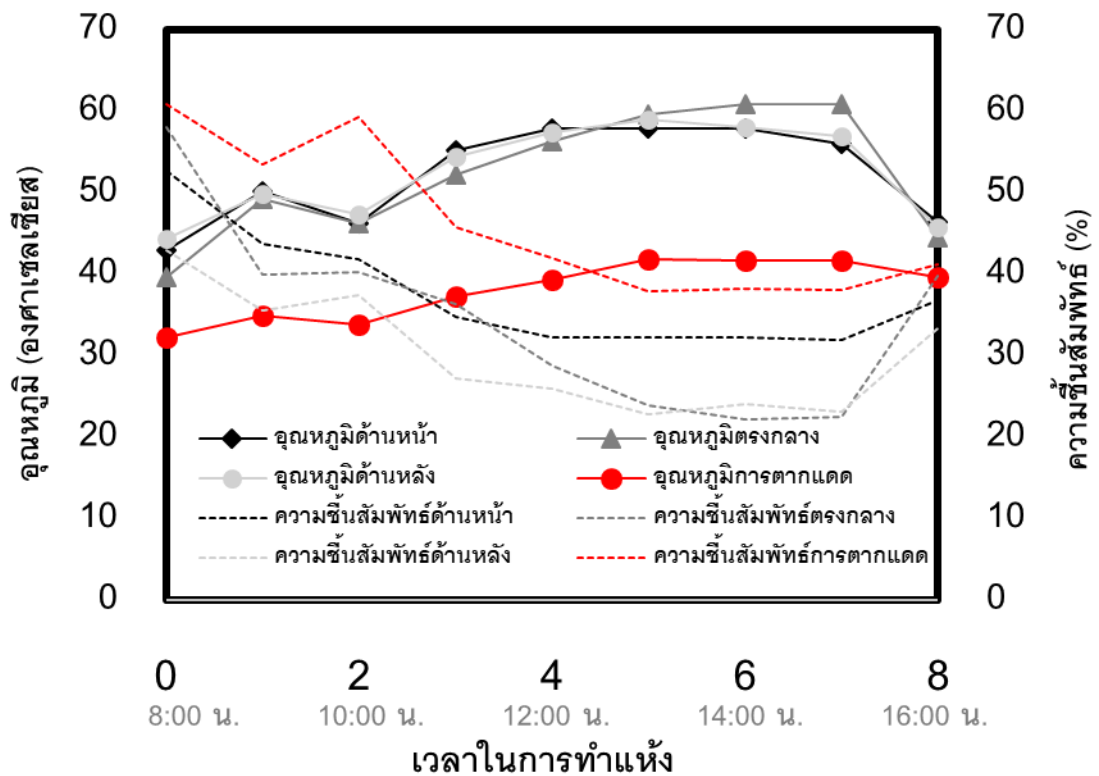
(ค)



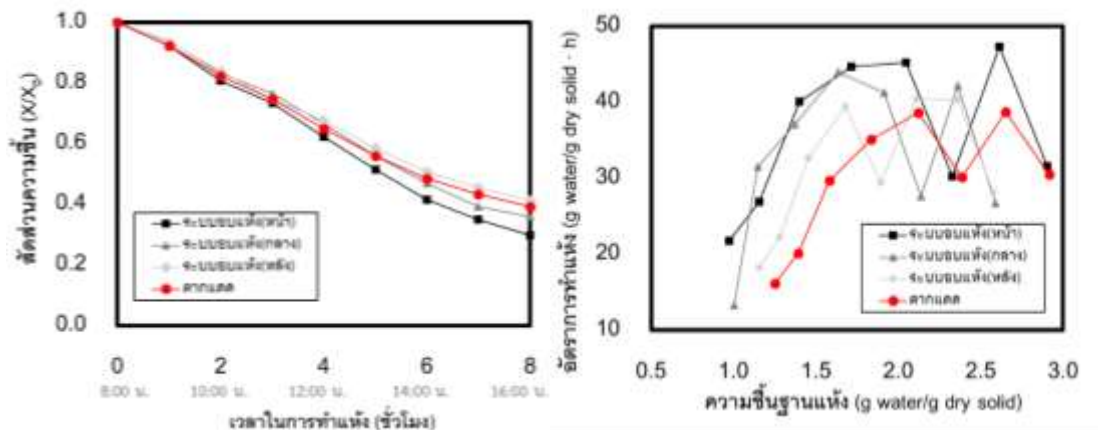
ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมปลานิล (ก) ขั้นตอนการตากปลานิล (ข) ด้วยระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่ใช้แผ่นพอลิเอสเตอร์เสริมใยแก้วและการตากแดด (ค)



ภาพที่ 2 ความเร็วลม (ก) และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (ข) ในระหว่างการทำแห้งปลานิลแดดเดียว ระบบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดด



ภาพที่ 3 กราฟอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในระหว่างการทำแห้งปลาแดดเดียวที่อบแห้งด้วยด้วยระบบอบแห้งกับการตาก



ภาพที่ 4 กราฟอัตราส่วนความชื้น (X/X_0) (ก) และกราฟอัตราการทำแห้ง (ข) ของปลานิลแดดเดียวที่อบแห้งด้วยระบบอบแห้งกับการตาก

ผลของกระบวนการพรีทรีทเมนต์และการอบแห้งต่อการคงตัวของเชื้อจุลินทรีย์ โพรไบโอติกและคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้ง

Effect of Pre-treatment and drying on Probiotic Viability and Quality of Dried Mango

ชนิสรา สนธิ¹ ภาริกา รุ่งพิชัยพิเชฐ¹ บุศราภรณ์ งามปัญญา² อินทิรา คุ่มญาติ³ สิริพันธ์ แก้วละเอียด และ
บุศราภรณ์ มหาโยธี¹

Chanisara Sonthi¹ Parika Rungpichayapichet¹ Budsaraporn Ngampanya² Intira Koomyart³,
Sirin Kawlaierd³ and Busarakorn Mahayothee¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนเชื้อโพรไบโอติกที่มีชีวิตอยู่ที่นับได้ในชิ้นมะม่วงเสริมเชื้อจุลินทรีย์โพรไบโอติกในระหว่างการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด โดยใช้จุลินทรีย์โพรไบโอติก *Lactobacillus rhamnosus* เสริมลงในชิ้นมะม่วงด้วยวิธี ultrasound-assisted ที่เวลา 30 และ 60 นาที ผลการทดลองพบว่าการใช้อัลตราซาวนด์มีผลต่อปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (a_w) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากปรากฏการณ์ Cavitation ที่ทำให้โครงสร้างเกิดรูพรุนและช่องว่างระหว่างเซลล์ (Micro-channels) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแพร่กระจายของเชื้อเข้าสู่เนื้อเยื่อมะม่วงได้ดียิ่งขึ้น โดยการอัลตราซาวนด์ 60 นาที ให้ปริมาณเชื้อเริ่มต้นสูงสุด อย่างไรก็ตาม เมื่อผ่านการอบแห้งเป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าจำนวนเชื้อโพรไบโอติกที่มีชีวิตอยู่ที่นับได้จากการอัลตราซาวนด์ทั้ง 30 และ 60 นาที ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าอยู่ที่ 6.34 ± 0.09 และ 6.42 ± 0.03 log CFU/g ตามลำดับ ซึ่งยังคงเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อาหารเสริมโพรไบโอติกของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา

คำสำคัญ : มะม่วง แลคโตบาซิลลัส อัลตราซาวนด์ การทำแห้ง

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย
Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

² ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย
Department of Biotechnology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

³ สำนักวิชาเกษตรนวัตกรรม สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา ระยอง 21210 ประเทศไทย
School of Innovative Agriculture, Chitralada Technology Institute, Rayong 21210, Thailand



Abstract

The objective of this research was to investigate the effect of ultrasound treatment on the viability of probiotic bacteria in mango slices during tray drying at 50°C. The probiotic strain *Lactobacillus rhamnosus* was incorporated into the mango matrix using an ultrasound-assisted technique for durations of 30 and 60 minutes. The results demonstrated that ultrasound treatment significantly increased the moisture content and water activity (a_w) of the samples ($p < 0.05$). Cavitation-induced porosity and micro-channels improved the diffusion of probiotics into mango tissues. While 60 minutes of ultrasonication initially provided the highest microbial load, post-drying results (10 hours) showed no significant difference between the 30 and 60-minute treatments, yielding 6.34 ± 0.09 and 6.42 ± 0.03 log CFU/g, respectively. Both treatments met the Thai FDA standards for probiotic supplement products.

Keyword: Mango, *Lactobacillus*, Ultrasound, Drying

บทนำ

ปัจจุบันพฤติกรรมกรรมการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ตลาดผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทั่วโลกเติบโตอย่างต่อเนื่อง (de Souza et al., 2026) เนื่องจากโพรไบโอติกมีส่วนช่วยเสริมสร้างระบบขับถ่ายและระบบภูมิคุ้มกัน (Tyutchev et al., 2022) ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์เสริมโพรไบโอติกที่หลากหลาย ไม่จำกัดเพียงผลิตภัณฑ์จากนม แต่ยังรวมถึงผลิตภัณฑ์จากพืชและผลไม้ อย่างไรก็ตาม ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการอยู่รอดของจุลินทรีย์โพรไบโอติกเหล่านี้มักถูกจำกัดด้วยสภาวะในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะอุณหภูมิในกระบวนการทำให้แห้ง ซึ่งส่งผลต่อการรอดชีวิตของเชื้อโพรไบโอติก ปัจจุบันจึงมีการนำเทคนิคต่าง ๆ มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมเชื้อโพรไบโอติก เช่น Atmospheric pressure impregnation, Vacuum impregnation, และ Microwave รวมถึงการใช้เทคนิค อัลตราซาวนด์ (Ultrasound) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการรักษาปริมาณโพรไบโอติกและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bernardino et al., 2021; Goncalves et al., 2023) อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาการเสริมโพรไบโอติกในมะม่วง ซึ่งเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่มีรสชาติดีและอุดมด้วยสารอาหารสำคัญ (Lebaka et al., 2021) งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนเชื้อโพรไบโอติกที่มีชีวิตอยู่ที่นับได้ในชั้นมะม่วงเสริมเชื้อจุลินทรีย์โพรไบโอติกในระหว่างการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ต่อปริมาณเชื้อโพรไบโอติกเริ่มต้นในชั้นมะม่วงก่อนการทำแห้ง
2. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงจำนวนเชื้อโพรไบโอติกที่มีชีวิตอยู่ที่นับได้ในชั้นมะม่วงเสริมเชื้อจุลินทรีย์โพรไบโอติกในระหว่างการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยตู้อบลมร้อนแบบถาด



อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

วัตถุดิบ

ผงเชื้อจุลินทรีย์ *Lactobacillus rhamnosus* (TISTR 2443) จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย มะม่วงพันธุ์แก้วขมิ้น จากตลาดปฐมมงคล อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม นำไปล้างแล้วบ่มให้สุกตามธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) อยู่ในช่วง 16.0 ถึง 18.0 °Brix สารคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC), สารแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2), กรดซิตริก (กรดอาหาร) (บริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด, ประเทศไทย) *Lactobacillus* MRS Agar (MRS Agar), LACTOBACILLUS MRS BROTH (MRS Broth), 500 กรัม. ยี่ห้อ Himedia™ / India และ SODIUM CHLORIDE 99.0%, 1000 กรัม ยี่ห้อ KemAus™ (บริษัท ฟินิกซ์ ไฮแอนด์ฟิค จำกัด)

การเตรียมชิ้นมะม่วง

นำมะม่วงที่บ่มสุกแล้วทำการปอกเปลือกและหั่นชิ้น ยาว 6 เซนติเมตร x กว้าง 4 เซนติเมตร x หนา 1 เซนติเมตร แช่ในสารละลาย CaCl_2 ความเข้มข้นร้อยละ 1 และกรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปลวกในน้ำอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที สะเด็ดน้ำภายในตู้ปลอดเชื้อ ด้านละ 10 นาที จากนั้นนำมาเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

การเตรียมสารละลายจุลินทรีย์โพรไบโอติกและสารละลายแขวนลอยโพรไบโอติก

ทำการเตรียมสารละลายจุลินทรีย์โพรไบโอติกและสารละลายแขวนลอยโพรไบโอติก ตามวิธีของ ชนิสรา สนธิ (2568) โดยนำผงเชื้อจุลินทรีย์ *L. rhamnosus* (TISTR 2443) มาผสมกับสารละลายกลีเซอรอลในอัตราส่วน 1:1 จากนั้นนำสารละลายที่ได้ปริมาตร 0.05 มิลลิลิตร ใส่ในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS broth ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมด้วยเครื่องเขย่าสาร (Vortex-Genie 2 G560E, Scientific Industries, NY, USA) นาน 10 วินาที นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายเชื้อจุลินทรีย์โพรไบโอติก จากนั้นนำสารละลายเชื้อจุลินทรีย์โพรไบโอติกปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ขวดตูแรนที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS broth ปริมาตร 200 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นเทสารแขวนลอยเชื้อจุลินทรีย์ลงในหลอดปั่นเหวี่ยงหลอดละ 33 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงตกตะกอนที่ความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที (Universal 16, Heltich, Germany) เทส่วนใสด้านบนทิ้ง ล้างตะกอนแบคทีเรียโพรไบโอติกด้วยสารละลาย NaCl ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 (w/v) จำนวน 2 ซ้ำ เก็บตะกอนเซลล์ *L. rhamnosus* ด้วยสารละลาย NaCl ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 (w/v) หลอดละ 2.5 มิลลิลิตร จะได้เป็นสารแขวนลอยโพรไบโอติก

การศึกษาผลของระยะเวลาการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ต่อปริมาณเชื้อโพรไบโอติกเริ่มต้นในชิ้นมะม่วงก่อนการทำแห้ง

นำชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่แข็งมาละลายในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาทำการเสริมเชื้อโพรไบโอติก โดยใช้ชิ้นมะม่วงจำนวน 12 ชิ้น ต่อ 1 ทริตเมนต์ ต่อ 1 ซ้ำ นำชิ้นมะม่วงที่ผ่านการละลายแล้วมาเสริมเชื้อจุลินทรีย์โพรไบโอติกด้วยวิธีการเสริมโพรไบโอติกแบบการแทรกซึม (ultrasound-assisted) ซึ่งดัดแปลงจาก Gonçalves et al., (2021) โดยการแช่สารละลายที่มีจำนวนเชื้อโพรไบโอติก 10^{10} CFU/ml ในอัตราส่วนชิ้นมะม่วงต่อสารละลายเชื้อโพรไบโอติก (1: 2) โดยใส่ในกล่องพลาสติก



(PP) ที่ผ่านการฆ่าเชื้อ แล้ววางในอ่างอัลตราซาวนด์ (23.7 x 29.7 x 20.0 cm, BANDELIN) ความถี่ 35 kHz เป็นเวลา 30 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดทำการสะเด็ดน้ำขึ้น มะม่วงบนตะแกรง สเตนเลสในตู้ปลอดเชื้อด้านละ 10 นาที แล้วนำไปทำการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อไฟโรไบโอติก

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงจำนวนเชื้อ และ *L. rhamnosus* ที่มีชีวิตอยู่ที่นับได้ในชั้นมะม่วงเสริมเชื้อจุลินทรีย์ไฟโรไบโอติกในระหว่างการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยตู้อบลมร้อนแบบถาด

นำชั้นมะม่วงที่ผ่านเสริมเชื้อไฟโรไบโอติกด้วยวิธีการเสริมไฟโรไบโอติกแบบการแทรกซึมข้างต้นไปทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง สุ่มเก็บตัวอย่างชั้นมะม่วงเสริมเชื้อจุลินทรีย์ไฟโรไบโอติกที่ระยะเวลา 0, 2, 4, 6, 8, และ 10 ชั่วโมง เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมี และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา และปริมาณเชื้อไฟโรไบโอติก โดยทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ต่อ 1 ทรีตเมนต์

การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์

วิเคราะห์ปริมาณความชื้น, วอเตอร์แอคทิวิตี, พีเอช, ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้, ค่าสี และปริมาณคงเหลือของจุลินทรีย์ไฟโรไบโอติก *L. rhamnosus* ตามวิธีของ ชนิสรา และคณะ (2568) โดยทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ต่อ 1 ทรีตเมนต์

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p=0.05$) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป PASW Statistics for Windows version 16.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)

ผลและวิจารณ์

ผลของระยะเวลาการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ต่อปริมาณเชื้อไฟโรไบโอติกเริ่มต้นในชั้นมะม่วงก่อนการทำแห้ง

เมื่อพิจารณาผลของวิธีการแช่แบบปกติและการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ (Ultrasound-assisted osmosis) พบว่า การใช้อัลตราซาวนด์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมเชื้อไฟโรไบโอติกเข้าสู่เนื้อเยื่อมะม่วงได้ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยการใช้อัลตราซาวนด์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นและค่า a_w อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในขณะเดียวกันก็ส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดลดลงตามระยะการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ที่นานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของ pH และการเพิ่มขึ้นของ % Acidity ดังแสดงในตารางที่ 1 เนื่องจากไฟโรไบโอติกมีบทบาทในการย่อยสลายน้ำตาล ชนิดต่างๆ เช่น ซูโครส กลูโคส และฟรุคโตส ผ่านกระบวนการเมตาบอลิซึมจนกลายเป็นกรดแลคติก (Joshi et al., 2024) นอกจากนี้ Goncalves et al., (2023) ยังรายงานว่าการใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Cavitation ส่งผลให้



โครงสร้างเนื้อเยื่อของมะม่วงเกิดรูพรุนและช่องว่างระหว่างเซลล์ (Micro-channels) จึงช่วยเร่งการแพร่กระจายของน้ำและเชื้อโพรไบโอติกเข้าสู่ภายในเนื้อเยื่อได้ดีขึ้น

การเปลี่ยนแปลงจำนวนเชื้อ *L. rhamnosus* ที่มีชีวิตอยู่ที่นับได้ในชั้นมะม่วงเสริมเชื้อจุลินทรีย์โพรไบโอติกในระหว่างการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยตู้อบลมร้อนแบบถาด

ลักษณะปรากฏและค่าสีของชั้นมะม่วงเสริมโพรไบโอติกที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสแสดงดังภาพที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ โดยพบว่าการอัลตราซาวนด์ 60 นาที ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่น้อยกว่าการอัลตราซาวนด์ 30 นาที อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาปริมาณความชื้น ค่า a_w และจำนวนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตอยู่ที่นับได้ พบว่ามีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตามระยะเวลาการทำแห้งที่เพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 2 อย่างไรก็ตาม ในช่วง 0-8 ชั่วโมงแรกของการทำแห้ง จำนวน *L. rhamnosus* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของจำนวนโพรไบโอติกในช่วงแรกอาจเป็นเพราะยังมีสภาวะที่เหมาะสมในการเจริญ เนื่องจากยังมีสารอาหารจากเนื้อมะม่วง ประกอบกับความสามารถของสายพันธุ์ที่มีความทนทานต่อสภาวะกรดและอุณหภูมิสูงได้ดี ตามรายงานของ Kuria et al., (2021) แต่เมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 10 จำนวนเชื้อลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากสภาวะความชื้นและค่า a_w ที่ต่ำเกินไปจนส่งผลกระทบต่อความคงตัวของผนังเซลล์และการอยู่รอดของจุลินทรีย์ โดยที่เวลา 10 ชั่วโมง จำนวนเชื้อคงเหลือของการอัลตราซาวนด์ 30 และ 60 นาที มีค่าเท่ากับ 6.34 ± 0.09 และ 6.42 ± 0.03 log CFU/g ตามลำดับ

สรุป

เชื้อจุลินทรีย์โพรไบโอติก *L. rhamnosus* การเจริญเติบโตได้ดีในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS broth ที่ระยะเวลา 16 ชั่วโมง ซึ่งในระยະนี้มีความแข็งแรงและเหมาะสำหรับการนำไปเพิ่มจำนวนเนื่องจากเป็นระยะ log Phase และการเสริมเชื้อจุลินทรีย์โพรไบโอติกแบบการแทรกซึม (ultrasound-assisted) ที่เวลา 30 และ 60 นาที ในชั้นมะม่วงและทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีจำนวนเชื้อคงเหลือ 6.34 ± 0.09 และ 6.42 ± 0.03 log CFU/g ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามจำนวนจุลินทรีย์ทั้งสองสภาวะยังคงมีจำนวนเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อาหารเสริมโพรไบโอติกของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.)



เอกสารอ้างอิง

- ชนิสรา สนธิ พันัชร พัฒนะบุญโชค นิชาภัทร แซ่มสายทอง ภาริกา รุ่งพิชัยพิเชฐ บุษราภรณ์ งามปัญญา และ บุศราภรณ์ มหาโยธี. 2568. การเสริมเชื้อจุลินทรีย์โพรไบโอติกในผลิตภัณฑ์มะม่วงแผ่นและการศึกษาความคงตัว หลังการอบแห้ง. งานประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 15 เรื่อง “บัณฑิตวิจัย สร้างสรรค์ และนวัตกรรม: การพัฒนาที่ยั่งยืนเพื่ออนาคตที่ดีกว่าในยุค AI” ฉบับที่ 15 (S356-S364)
- Akman, P. K., Uysal, E., Ozkaya, G. U., Tornuk, F., & Durak, M. Z. (2019). Development of probiotic carrier dried apples for consumption as snack food with the impregnation of *Lactobacillus paracasei*. *Lwt*, 103, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.070>
- AOAC. (1990). Official methods of analysis (15th ed.). Association of Official Analytical Chemists.
- AOAC International. (2000). Official methods of analysis (17th ed.). Gaithersburg, MD: AOAC International.
- Bernardino, A. V. S., Rocha, N. S., Silva, E. M. d., Medeiros, R. A. B. d., Silva Júnior, E. V. d., Shinohara, N. K. S., Cortez, N. M. d. S., & Azoubel, P. M. (2021). Effect of ultrasound on cell viability and storage of dehydrated jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) impregnated with *Lactobacillus casei*. *Lwt*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110790>
- de Souza, H. F., Filho, J. G. A. C., Teixeira, R. D., Junior, F. V. S., Teixeira, F. D., de Moura Bell, J. M. L. N., da Silva Rocha, R., da Cruz, A. G., Brandi, I. V., & Kamimura, E. S. (2026). The evolution of probiotic foods in human health over the past 25 years: a clear history of the term “probiotics,” world market, main products, trends and updates on the effects on human health. *Food Research International*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2026.118767>
- Goncalves, D. J. R., Costa, N. A., Amaral, E. P. M. J. D., Oliveira, V. C., Maia, N. M. A., Magalhaes, I. S., Borges, L. L. R., Stringheta, P. C., Martins, E. M. F., Vieira, E. N. R., Rojas, M. L., & Leite Junior, B. R. C. (2023). Ultrasonic pre-treatment to enhance drying of potentially probiotic guava (*Psidium guajava*): Impact on drying kinetics, *Lactobacillus rhamnosus* GG viability, and functional quality. *Food Res Int*, 173(Pt 2), 113374. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113374>
- Jayasree Joshi, T., S.V. S., Mohan, L., Nandagopal, P., & Arakal, J. J. (2024). Functional metabolites of probiotic lactic acid bacteria in fermented dairy products. *Food and Humanity*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100341>
- Kuria, M. W., Matofari, J. W., & Nduko, J. M. (2021). Physicochemical, antioxidant, and sensory properties of functional mango (*Mangifera indica* L.) leather fermented by lactic acid bacteria. *Journal of Agriculture and Food Research*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100206>



Lebaka, V. R., Wee, Y., Ye, W., & Korivi, M. (2021). Nutritional Composition and Bioactive Compounds in Three Different Parts of Mango Fruit, *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 18, 741.

Madigan, M. T., Martinko, J. M. และ Brock, T. D. (2006). Brock biology of microorganisms (11th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.

Obayomi, O. V., Olaniran, A. F., & Owa, S. O. (2024). Unveiling the role of functional foods with emphasis on prebiotics and probiotics in human health: A review, *Journal of Functional Foods*. 119, 106337.

Tyutkov, N., Zhernyakova, A., Birchenko, A., Eminova, E., Nadtochii, L., & Baranenko, D. (2022). Probiotics viability in frozen food products. *Food Bioscience*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101996>



ตารางที่ 1 คุณภาพทางเคมีของขึ้นมะม่วงเสริมโพรไบโอติก *L.rhamnosus*

คุณภาพ	ขึ้นมะม่วงเสริมโพรไบโอติก				
	มะม่วงแช่แข็งที่	หลังการแช่ 30	หลังการแช่ 60	หลังการอัลตรา	หลังการอัลตรา
	ผ่านการละลาย	นาที	นาที	ซาวนด์ 30 นาที	ซาวนด์ 60 นาที
ปริมาณความชื้น (%ฐานเปียก)	85.80 ± 3.55 ^c	88.50 ± 0.58 ^{abc}	87.85 ± 1.41 ^{bc}	91.34 ± 0.34 ^a	90.03 ± 0.17 ^{ab}
ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ (a_w)	0.9778 ± 0.01 ^a	0.9907 ± 0.01 ^a	0.9912 ± 0.01 ^a	0.9824 ± 0.05 ^a	0.9871 ± 0.03 ^a
(T=25°C)					
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (°Brix)	17.91 ± 1.18 ^a	17.03 ± 0.43 ^{ab}	16.34 ± 0.64 ^b	16.87 ± 0.29 ^b	16.33 ± 0.12 ^b
พีเอช (pH)	4.67 ± 0.10 ^a	4.01 ± 0.14 ^b	3.99 ± 0.08 ^b	4.16 ± 0.04 ^b	4.09 ± 0.04 ^b
ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (%) acidity)	0.18 ± 0.04 ^a	0.27 ± 0.02 ^b	0.34 ± 0.03 ^a	0.23 ± 0.14 ^b	0.30 ± 0.18 ^b
จำนวนจุลินทรีย์โพรไบโอติกที่มีชีวิตอยู่ที่นับได้ (log CFU/g)	-	6.91 ± 0.03 ^b	6.93 ± 0.13 ^b	7.07 ± 0.12 ^b	7.44 ± 0.28 ^a

หมายเหตุ: a-c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

ตารางที่ 2 ค่าสีมะม่วงขึ้นเสริมโพรไบโอติกที่ระยะเวลาการทำแห้งต่างๆ

ระยะเวลาที่ใช้ในการอัลตราซาวนด์ (นาที)	ระยะเวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)	L*	a*	b*	ΔE
30	0	48.49 ± 0.56 ^d	16.16 ± 0.58 ^d	62.70 ± 0.96 ^b	
	2	48.59 ± 0.81 ^d	12.86 ± 0.76 ^f	56.50 ± 2.35 ^c	14.57 ± 0.11 ^b
	4	50.82 ± 0.55 ^c	20.57 ± 0.61 ^b	56.10 ± 0.91 ^c	12.42 ± 1.02 ^{cd}
	6	58.63 ± 0.82 ^a	14.25 ± 0.61 ^e	69.20 ± 1.36 ^a	13.68 ± 0.89 ^{bc}
	8	49.00 ± 0.68 ^d	25.37 ± 0.55 ^a	56.40 ± 1.22 ^c	11.47 ± 0.71 ^d
	10	52.85 ± 2.38 ^b	17.96 ± 0.67 ^c	57.38 ± 1.89 ^c	19.23 ± 0.89 ^a
60	0	44.16 ± 0.58 ^d	12.85 ± 0.68 ^d	56.33 ± 1.27 ^d	
	2	56.81 ± 1.29 ^c	9.67 ± 0.71 ^e	62.17 ± 2.12 ^c	11.44 ± 0.80 ^b
	4	57.75 ± 0.58 ^c	21.72 ± 0.86 ^a	69.12 ± 1.44 ^a	11.09 ± 0.22 ^b
	6	59.22 ± 1.40 ^b	19.00 ± 1.32 ^b	69.84 ± 1.88 ^a	13.72 ± 0.58 ^a
	8	57.48 ± 0.71 ^c	17.88 ± 0.70 ^c	67.02 ± 0.62 ^b	11.98 ± 0.61 ^b
	10	64.77 ± 0.89 ^a	19.74 ± 0.81 ^b	70.49 ± 0.85 ^a	10.95 ± 0.17 ^b

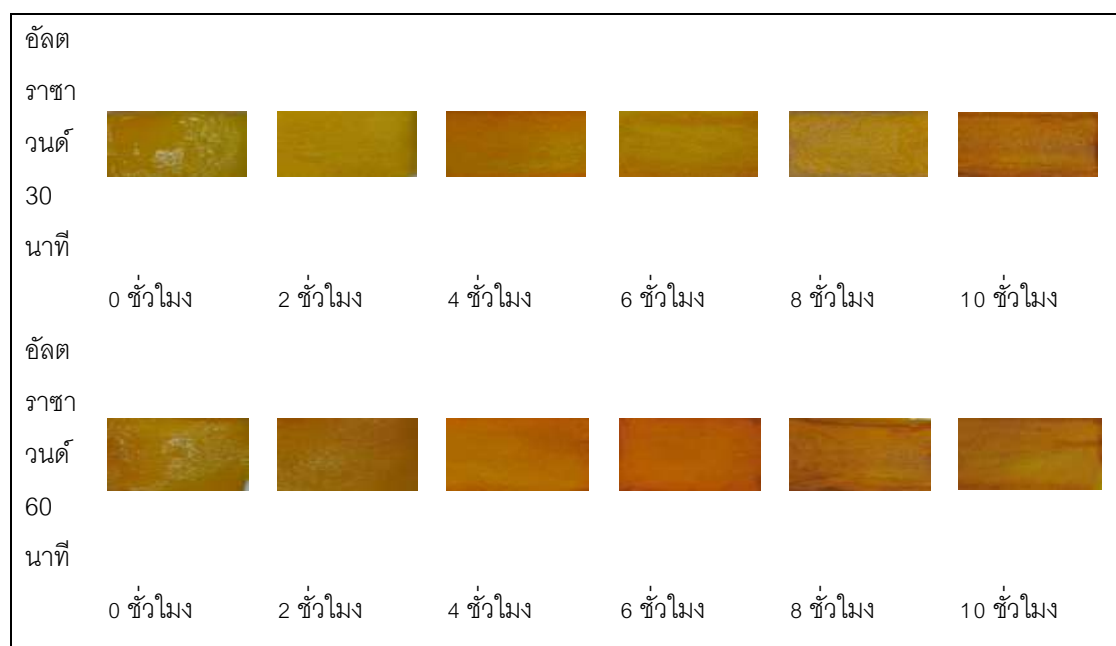
หมายเหตุ: a-f หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน



ตารางที่ 3 จำนวนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตอยู่ที่นับได้ในชิ้นมะม่วงเสริมโพรไบโอติก

ระยะเวลาที่ใช้ในการ อัลตราซาวนด์ (นาที)	ระยะเวลาในการ ทำแห้ง (ชั่วโมง)	ปริมาณความชื้น (%wet basis)	ค่าวอเตอร์ แอคติวิตี	จำนวนจุลินทรีย์โพรไบโอ ติกที่มีชีวิตอยู่ที่นับได้ (log CFU/g)
30	0	91.34 ± 0.34 ^a	0.9824 ± 0.05 ^a	7.05 ± 0.03 ^b
	2	87.99 ± 0.55 ^b	0.9797 ± 0.02 ^b	7.19 ± 0.01 ^b
	4	77.10 ± 0.17 ^c	0.9792 ± 0.02 ^c	7.95 ± 0.04 ^a
	6	59.53 ± 0.27 ^d	0.9357 ± 0.05 ^d	7.96 ± 0.01 ^a
	8	49.37 ± 0.18 ^e	0.7674 ± 0.02 ^e	7.12 ± 0.12 ^b
	10	24.43 ± 0.06 ^f	0.5337 ± 0.02 ^f	6.34 ± 0.09 ^c
60	0	90.03 ± 0.17 ^a	0.9871 ± 0.03 ^a	7.36 ± 0.12 ^d
	2	87.48 ± 0.41 ^b	0.9765 ± 0.02 ^b	7.53 ± 0.02 ^c
	4	73.43 ± 0.66 ^c	0.9752 ± 0.02 ^c	7.85 ± 0.01 ^b
	6	63.49 ± 1.03 ^d	0.9562 ± 0.02 ^d	7.94 ± 0.01 ^{ab}
	8	52.25 ± 0.71 ^e	0.7792 ± 0.04 ^e	7.98 ± 0.01 ^a
	10	24.16 ± 0.09 ^f	0.5802 ± 0.01 ^f	6.42 ± 0.03 ^e

หมายเหตุ: a-f หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน



ภาพที่ 1 ลักษณะปรากฏของชิ้นมะม่วงเสริมโพรไบโอติกที่ระยะเวลาการทำแห้งต่างๆ

การเตรียม การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ และการทดสอบการดูดซับ Au(III) เบื้องต้นของ วัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

Preparation, Characterization, and Preliminary Au(III) Adsorption Evaluation of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Composite

กิตติยา ธาระหาญ¹, มณิรวา บุญคำ¹ และ พรทิพย์ ทองยี่ง^{1,*}

Kittiya Tarahan¹, Maniwara Boonkam¹ and Pornthip Tongying^{1,*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ รวมทั้งทดสอบการดูดซับ Au(III) จากสารละลายต้นแบบ โดยเตรียมอนุภาค Fe_3O_4 ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม จากนั้นนำไปสร้างคอมโพสิตร่วมกับ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) พบพีคที่สอดคล้องกับ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ โครงสร้างแบบ kesterite และ Fe_3O_4 เฟสแมกนีไทต์ ขณะที่ภาพถ่าย SEM และผล SEM-EDS แสดงการกระจายตัวร่วมกันของอนุภาค และธาตุองค์ประกอบภายในวัสดุคอมโพสิต ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค VSM แสดงให้เห็นว่าวัสดุคอมโพสิตยังคงตอบสนองต่อแม่เหล็กภายนอกได้ แม้ค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวจะลดลงเมื่อเทียบกับ Fe_3O_4 เพียงอย่างเดียว การทดสอบการดูดซับ Au(III) โดยใช้สารละลายต้นแบบความเข้มข้น 100 mg/L ที่ pH 6 พบว่าวัสดุสามารถดูดซับ Au(III) ได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก และให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดประมาณ 1000 mg/g ภายใน 24 ชั่วโมง นอกจากนี้ การทดสอบผลของ pH พบว่าวัสดุให้ค่าการดูดซับสูงสุดที่ pH 6 เมื่อเทียบกับสภาวะ pH อื่นที่ศึกษา ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ มีสมบัติพื้นฐานที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาด้านการดูดซับ Au(III)

คำสำคัญ : Au(III), การดูดซับ, วัสดุคอมโพสิต, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, การแยกด้วยแม่เหล็ก

Abstract

This study aimed to prepare and characterize a $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ composite and to preliminarily evaluate its Au(III) adsorption from a model aqueous solution. Fe_3O_4 nanoparticles were synthesized by a co-precipitation method and subsequently combined with $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ through a hydrothermal process. X-ray diffraction (XRD) analysis showed diffraction peaks corresponding to kesterite $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ and magnetite Fe_3O_4 , while SEM and SEM-EDS analyses confirmed the coexistence and elemental distribution of both components in the composite. VSM analysis indicated

¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

Department of Chemistry, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

*Email: tongying_p@su.ac.th

that the composite retained magnetic responsiveness to an external magnetic field, although its saturation magnetization decreased compared with bare Fe_3O_4 . Au(III) adsorption tests using a 100 mg/L model Au(III) solution at pH 6 showed rapid uptake during the initial stage and a maximum adsorption capacity of approximately 1000 mg/g within 24 h. In addition, the pH study revealed that the highest adsorption occurred at pH 6 among the tested conditions. These results indicate that the $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ composite possesses suitable basic properties for further investigation as an Au(III) adsorbent.

Keywords : Au(III), adsorption, composite material, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, magnetic separation

บทนำ

ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของขยะอิเล็กทรอนิกส์และสารละลายของเสียจากกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับโลหะมีค่า ทำให้การกู้คืนทองคำได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากทองคำเป็นโลหะที่มีมูลค่าสูง มีความเสถียรทางเคมี ทนต่อการกัดกร่อน และมีค่าการนำไฟฟ้าสูง จึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ขึ้นสูงหลายประเภท (Hoffmann, 1992; Rao et al., 2021; Syed, 2012) อย่างไรก็ตาม กระบวนการกู้คืนทองคำด้วยวิธีดั้งเดิม เช่น กระบวนการโลหวิทยาความร้อนและกระบวนการโลหวิทยาการละลาย มักมีข้อจำกัดด้านความซับซ้อน ต้นทุน และการใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย (Hoffmann, 1992; Ojeda et al., 2009; Rao et al., 2021; Syed, 2012) ดังนั้น การพัฒนาวิธีการแยกและกู้คืนทองคำที่ดำเนินการได้ง่าย และเหมาะสมกับสารละลายเจือจางจึงเป็นประเด็นที่มีความสำคัญ

กระบวนการดูดซับเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการกำจัดหรือกู้คืนไอออนโลหะจากสารละลาย เนื่องจากมีขั้นตอนการดำเนินงานไม่ซับซ้อน สามารถใช้ได้กับสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ และสามารถปรับปรุงสมบัติของวัสดุดูดซับให้เหมาะสมกับไอออนเป้าหมายได้ (Fujiwara et al., 2007; Lam et al., 2007) วัสดุที่มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ได้รับความสนใจในระบบที่เกี่ยวข้องกับ Au(III) เนื่องจากองค์ประกอบดังกล่าวอาจช่วยส่งเสริมการยึดจับระหว่างพื้นผิววัสดุกับ Au(III) ในสารละลาย (Xia & Ghahreman, 2023; Zhang et al., 2021) ขณะเดียวกัน การนำเฟสแม่เหล็ก เช่น Fe_3O_4 เข้ามาเป็นส่วนประกอบของวัสดุดูดซับ สามารถช่วยให้แยกวัสดุออกจากสารละลายหลังการใช้งานได้ง่ายด้วยแม่เหล็กภายนอก (Xia & Ghahreman, 2023)

$\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ หรือ CZTS เป็นวัสดุซัลไฟด์ที่ประกอบด้วยธาตุ Cu Zn Sn และ S โดยมีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง (Ansari et al., 2017) เมื่อพิจารณาร่วมกับรายงานก่อนหน้านี้ที่แสดงว่าวัสดุที่มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์สามารถใช้ในการดูดซับ Au(III) ได้ (Xia & Ghahreman, 2023; Zhang et al., 2021) วัสดุ CZTS จึงมีความน่าสนใจสำหรับการพัฒนาเป็นส่วนหนึ่งของวัสดุดูดซับ Au(III) เมื่อนำมาสร้างคอมโพสิตร่วมกับ Fe_3O_4 คาดว่าวัสดุที่ได้จะรวมสมบัติของวัสดุซัลไฟด์เข้ากับสมบัติแม่เหล็กของ Fe_3O_4 ทำให้วัสดุที่ได้สามารถแยกออกจากสารละลายได้ง่าย และเหมาะสมสำหรับนำไปทดสอบความสามารถในการดูดซับ Au(III) เบื้องต้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค XRD SEM และ VSM และประเมินความสามารถเบื้องต้นในการดูดซับ Au(III) จากสารละลายต้นแบบ ผลการศึกษานี้มุ่งแสดงความเป็นไปได้เบื้องต้นของวัสดุคอมโพสิตดังกล่าวสำหรับการศึกษาต่อยอดด้านการดูดซับ Au(III) ในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
2. เพื่อวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ที่เตรียมได้
3. เพื่อประเมินความสามารถเบื้องต้นของวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ในการดูดซับ Au(III) จากสารละลายต้นแบบ

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

อนุภาค Fe_3O_4 เตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (Petcharoen & Sirivat, 2012) โดยละลาย $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ในน้ำปราศจากไอออน ให้มีอัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$ เท่ากับ 1:2 จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C พร้อมกวนอย่างต่อเนื่อง แล้วเติมสารละลาย KOH ความเข้มข้น 3 M แบบหยดช้า ๆ จนเกิดตะกอนสีดำ กวนต่อเป็นเวลา 40 นาที และปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นแยกตะกอนด้วยการปั่นเหวี่ยง ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนหลายครั้ง และอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

วัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ เตรียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Ansari et al., 2017) โดยละลาย CuCl_2 , ZnCl_2 , SnCl_2 และไทโอยูเรียในเอทิลีนไกลคอล ให้มีอัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Cu}:\text{Zn}:\text{Sn}:\text{S}$ เท่ากับ 2:1:1:4 จากนั้นเติม oleic acid และกวนจนได้สารละลายเนื้อเดียวกัน แล้วเติมอนุภาค Fe_3O_4 ที่เตรียมไว้ลงในสารละลายผสม กวนต่อจนกระจายตัวสม่ำเสมอ จากนั้นถ่ายสารผสมลงในภาชนะปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มอล ชนิดสแตนเลสที่บุด้วยเทฟลอน และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แยกผลิตภัณฑ์ด้วยการปั่นเหวี่ยง ล้างด้วยเอทานอล และอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

2. การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุ

วัสดุที่เตรียมได้ถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะเพื่อยืนยันการเกิดวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ โดยวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) เพื่อระบุเฟสของ Fe_3O_4 และ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ศึกษาพื้นฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือ scanning electron microscopy (SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) นอกจากนี้ ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุด้วย vibrating sample magnetometry (VSM) เพื่อประเมินความสามารถในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก และทดสอบการแยกวัสดุออกจากสารละลายโดยใช้แม่เหล็กภายนอก

3. การทดสอบการดูดซับ Au(III) เบื้องต้น

การทดสอบการดูดซับ Au(III) เบื้องต้นดำเนินการโดยใช้สารละลาย Au(III) ต้นแบบความเข้มข้น 100 mg/L ที่ pH 6 ปริมาตร 50 mL เติมวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ปริมาณ 5 mg ลงในสารละลาย จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในระหว่างการทดลอง เก็บสารละลายที่เวลาต่าง ๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของ Au(III) ที่เหลืออยู่ในสารละลาย ด้วยเทคนิค flame atomic absorption spectrometry (FAAS) ค่าความสามารถในการดูดซับของวัสดุที่เวลา t คำนวณจากสมการ

$$q_t = ((C_i - C_t) \times V) / m$$

โดยที่ q_t คือค่าความสามารถในการดูดซับที่เวลา t (mg/g), C_i คือความเข้มข้นเริ่มต้นของ Au(III) ในสารละลาย (mg/L), C_t คือความเข้มข้นของ Au(III) ที่เวลา t (mg/L), V คือปริมาตรของสารละลาย (L) และ m คือมวลของวัสดุดูดซับ (g) เมื่อการดูดซับเข้าสู่สมดุล ค่าความสามารถในการดูดซับสมดุล (q_e) คำนวณได้จากสมการเดียวกันโดยแทน C_t ด้วย C_e ซึ่งเป็นความเข้มข้นของ Au(III) ที่สมดุล โดยที่ C_i คือความเข้มข้นเริ่มต้นของ Au(III) ในสารละลาย

ผลและวิจารณ์

1. ลักษณะเฉพาะของวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ของวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ แสดงดังรูปที่ 1 พบพีคการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับทั้ง $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ และ Fe_3O_4 โดยพีคของ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ปรากฏในตำแหน่งที่สัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกแบบ kesterite ตามฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS file no. 26-0575 (Ansari et al., 2017) ขณะที่พีคของ Fe_3O_4 สอดคล้องกับเฟสแมกนีไทต์ตามฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS file no. 19-0629 (Petcharoen & Sirivat, 2012) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวัสดุที่เตรียมได้มีทั้ง $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ และ Fe_3O_4 เป็นองค์ประกอบ สนับสนุนการเกิดวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

ภาพถ่าย SEM ของวัสดุคอมโพสิตแสดงให้เห็นการกระจายตัวร่วมกันของอนุภาค Fe_3O_4 และ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ภายในวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยอนุภาค Fe_3O_4 มีขนาดประมาณ 5–10 μm ขณะที่อนุภาค $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ มีขนาดเล็กกว่า อยู่ในช่วงประมาณ 2–4 μm นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาพื้นผิวของอนุภาค Fe_3O_4 พบว่ามีลักษณะขรุขระ ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการเกาะรวมของอนุภาค Fe_3O_4 ขนาดนาโนที่ใช้เป็นสารตั้งต้น (Petcharoen & Sirivat, 2012) ผลจาก XRD และ SEM จึงสอดคล้องกันและสนับสนุนการเกิดวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ผลการวิเคราะห์ SEM-EDS ยังตรวจพบธาตุ Fe, O, Cu, Zn, Sn และ S กระจายอยู่ในบริเวณที่สัมพันธ์กับองค์ประกอบของ Fe_3O_4 และ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ตามลำดับ ซึ่งสนับสนุนการเกิดวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ผลจาก XRD, SEM และ SEM-EDS จึงสอดคล้องกันและสนับสนุนว่าวัสดุที่เตรียมได้มี Fe_3O_4 และ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ เป็นองค์ประกอบร่วมกัน

2. สมบัติแม่เหล็กของวัสดุคอมโพสิต

สมบัติทางแม่เหล็กของอนุภาค Fe_3O_4 และวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค vibrating sample magnetometry (VSM) ดังแสดงในรูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์พบว่าอนุภาค Fe_3O_4 มีเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสที่แคบ และมีค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวเท่ากับ 59.46 emu/g ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของอนุภาค Fe_3O_4 ที่มีสมบัติแม่เหล็ก (Petcharoen & Sirivat, 2012) เมื่อนำ Fe_3O_4 มาสร้างเป็นวัสดุคอมโพสิตร่วมกับ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ พบว่าค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวลดลงเป็น 29.20 emu/g การลดลงดังกล่าวอาจเป็นผลจากการที่ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ซึ่งไม่ใช่องค์ประกอบแม่เหล็กเข้ามาเจือจางสัดส่วนของ Fe_3O_4 ในวัสดุคอมโพสิต ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมที่มักพบในวัสดุคอมโพสิตแม่เหล็ก (Nguyen et al., 2021) อย่างไรก็ตาม แม้ว่าค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวของวัสดุคอมโพสิตจะลดลงเมื่อเทียบกับ Fe_3O_4 แต่วัสดุ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ยังคงตอบสนองต่อแม่เหล็กภายนอกได้ดี และสามารถแยกออกจากสารละลายได้ ดังแสดงในรูปแทรกของรูปที่ 3 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้ยังคงมีสมบัติแม่เหล็กเพียงพอสำหรับการแยกวัสดุออกจากระบบของเหลวหลังการใช้งาน

3. ผลการทดสอบการดูดซับ Au(III) เบื้องต้น

การทดสอบการดูดซับ Au(III) ดำเนินการโดยใช้สารละลาย Au(III) ต้นแบบความเข้มข้น 100 mg/L ที่ pH 6 ปริมาตร 50 mL และใช้วัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ปริมาณ 5 mg ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4 พบว่าความเข้มข้นของ Au(III) ในสารละลายลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดลอง โดยภายใน 60 นาทีแรก ค่า q_t เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าวัสดุสามารถดูดซับ Au(III) ได้อย่างรวดเร็วในช่วงต้นของกระบวนการ แนวโน้มดังกล่าวอาจเกิดจากในช่วงต้นของการทดลอง พื้นผิวของวัสดุยังมีตำแหน่งที่สามารถดูดซับ Au(III) ได้จำนวนมาก

เมื่อเพิ่มระยะเวลาการดูดซับ ความเข้มข้นของ Au(III) ในสารละลายลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่อัตราการดูดซับมีแนวโน้มช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป และเริ่มเข้าสู่สมดุลประมาณ 5 ชั่วโมง พฤติกรรมดังกล่าวอาจสัมพันธ์กับการลดลงของตำแหน่งว่างบนพื้นผิววัสดุเมื่อการดูดซับดำเนินไป ซึ่งเป็นแนวโน้มที่พบได้ทั่วไปในระบบดูดซับโลหะจากสารละลาย (Fujiwara et al., 2007) จากนั้นการดูดซับยังคงดำเนินต่อไปจนได้ค่าการดูดซับสูงสุดภายใต้สภาวะที่ศึกษาในช่วง 24 ชั่วโมง โดยค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 1000 mg/g ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ที่เตรียมได้มีความสามารถในการดูดซับ Au(III) จากสารละลายต้นแบบได้ดี

เมื่อเปรียบเทียบผลของ pH ที่เวลา 90 นาที พบว่าวัสดุให้ค่าการดูดซับสูงสุดที่ pH 6 โดยมีค่า q_t เท่ากับ 735.7 mg/g ขณะที่ pH 1.5 และ 7 ให้ค่า q_t เท่ากับ 610.4, 574.1 และ 427.6 mg/g ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า pH ของสารละลายมีผลต่อการดูดซับ Au(III) ของวัสดุ (Fujiwara et al., 2007) และสนับสนุนการเลือกใช้ pH 6 เป็นสภาวะสำหรับการทดสอบการดูดซับในงานนี้ อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้มุ่งรายงานแนวโน้มเบื้องต้นของการดูดซับ Au(III) จึงยังไม่ลงรายละเอียดเชิงกลไกหรือการวิเคราะห์ผลของ pH อย่างเป็นระบบ ซึ่งจะเป็นประเด็นสำหรับการศึกษาต่อไป



สรุป

วัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ สามารถเตรียมได้โดยใช้ Fe_3O_4 เป็นองค์ประกอบแม่เหล็กร่วมกับ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ซึ่งเป็นวัสดุซัลไฟด์ ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM สนับสนุนการเกิดวัสดุคอมโพสิต โดยพบลักษณะที่สอดคล้องกับทั้ง Fe_3O_4 และ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ภายในวัสดุเดียวกัน ขณะที่ผลการวิเคราะห์ด้วย VSM แสดงให้เห็นว่า การประกอบ Fe_3O_4 ร่วมกับ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ เป็นวัสดุคอมโพสิตส่งผลให้ค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวลดลงจาก 59.46 emu/g เป็น 29.20 emu/g อย่างไรก็ตาม วัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ยังคงมีความสามารถในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอก การทดสอบการดูดซับ Au(III) จากสารละลายต้นแบบพบว่าวัสดุสามารถดูดซับ Au(III) ได้ดีภายใต้สภาวะที่ศึกษา โดยความเข้มข้นของ Au(III) ในสารละลายลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดประมาณ 1000 mg/g ภายใน 24 ชั่วโมง นอกจากนี้ ผลการทดสอบผลของ pH พบว่าวัสดุให้ค่าการดูดซับสูงสุดที่ pH 6 เมื่อเทียบกับสภาวะ pH อื่นที่ศึกษา ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ มีสมบัติพื้นฐานที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาต่อยอดด้านการดูดซับ Au(III) ต่อไป

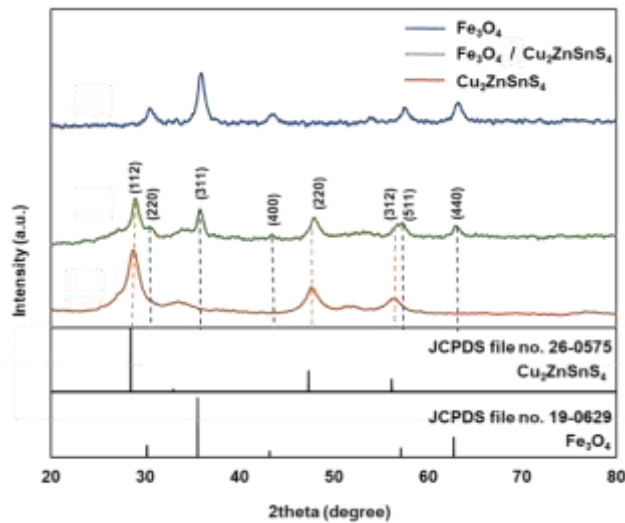
คำขอบคุณ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนสนับสนุนการวิจัย นวัตกรรมและการสร้างสรรค์ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยศิลปากร (SRIF-JRG-2568-07)

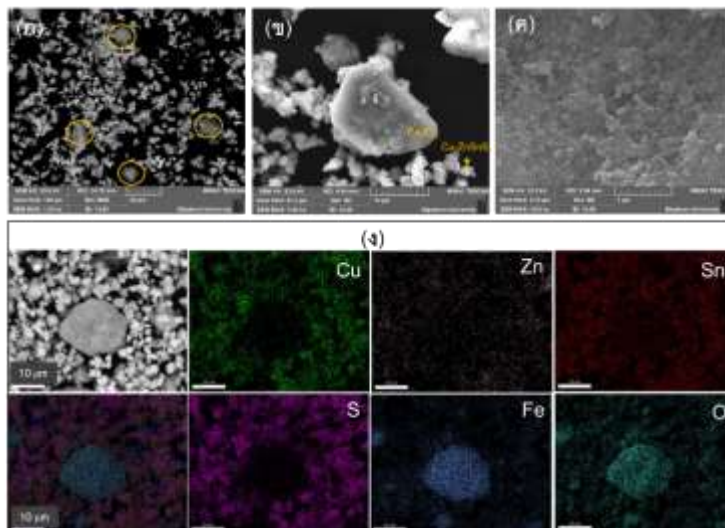


เอกสารอ้างอิง

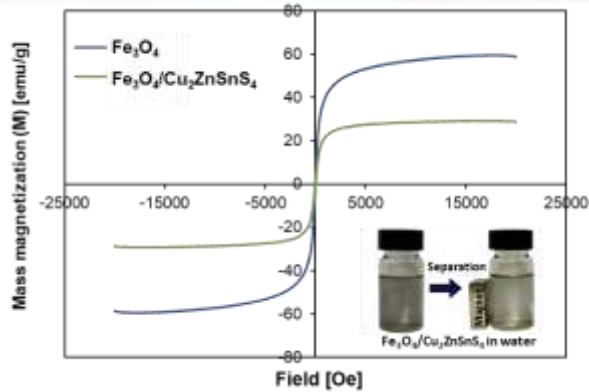
- Ansari, M. Z., Faraz, M., Munjal, S., Kumar, V., & Khare, N. (2017). Highly dispersible and uniform size $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ nanoparticles for photocatalytic application. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2402–2409.
- Fujiwara, K., Ramesh, A., Maki, T., Hasegawa, H., & Ueda, K. (2007). Adsorption of platinum (IV), palladium (II) and gold (III) from aqueous solutions onto L-lysine modified crosslinked chitosan resin. *Journal of hazardous materials*, 146(1-2), 39–50.
- Hoffmann, J. E. (1992). Recovering precious metals from electronic scrap. *Jom*, 44(7), 43–48.
- Lam, K. F., Fong, C. M., & Yeung, K. L. (2007). Separation of precious metals using selective mesoporous adsorbents. *Gold Bulletin*, 40(3), 192–198.
- Nguyen, M. D., Tran, H.-V., Xu, S., & Lee, T. R. (2021). Fe_3O_4 Nanoparticles: Structures, Synthesis, Magnetic Properties, Surface Functionalization, and Emerging Applications. *Applied Sciences*, 11(23), 11301.
- Ojeda, M., Perino, E., & Ruiz, M. d. C. (2009). Gold extraction by chlorination using a pyrometallurgical process. *Minerals Engineering*, 22(4), 409–411.
- Petcharoen, K., & Sirivat, A. (2012). Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles via the chemical co-precipitation method. *Materials Science and Engineering: B*, 177(5), 421–427.
- Rao, M. D., Singh, K. K., Morrison, C. A., & Love, J. B. (2021). Recycling copper and gold from e-waste by a two-stage leaching and solvent extraction process. *Separation and Purification Technology*, 263, 118400.
- Syed, S. (2012). Recovery of gold from secondary sources—A review. *Hydrometallurgy*, 115, 30–51.
- Xia, J., & Ghahreman, A. (2023). Core-Shell Structured $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CuS}$ for Effective Gold Capture and Recovery. *ACS Applied Nano Materials*.
- Zhang, M., Dong, Z., Hao, F., Xie, K., Qi, W., Zhai, M., & Zhao, L. (2021). Ultrahigh and selective adsorption of Au (III) by rich sulfur and nitrogen-bearing cellulose microspheres and their applications in gold recovery from gold slag leaching solution. *Separation and Purification Technology*, 274, 119016.



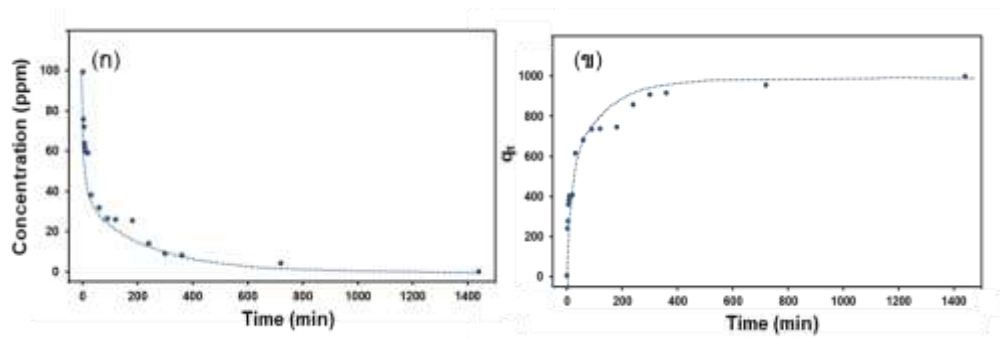
รูปที่ 1 XRD patterns ของอนุภาค Fe_3O_4 วัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ และอนุภาค $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$



รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM และ SEM-EDS elemental mapping ของวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$:
 (ก) ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า โดยวงกลมสีแดงแสดงบริเวณของอนุภาค Fe_3O_4 , (ข) ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า โดยลูกศรแสดงอนุภาค $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, (ค) ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงพื้นผิวของอนุภาค Fe_3O_4 และ (ง) SEM-EDS elemental mapping แสดงการกระจายตัวของธาตุ Fe, O, Cu, Zn, Sn และ S ในวัสดุคอมโพสิต



รูปที่ 3 Magnetic hysteresis curves ของอนุภาค Fe_3O_4 และวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค VSM โดยรูปแทรกแสดงการแยกวัสดุคอมโพสิตออกจากสารละลายด้วยแม่เหล็กภายนอก



รูปที่ 4 การดูดซับ Au(III) จากสารละลายต้นแบบด้วยวัสดุคอมโพสิต $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$: (ก) ความเข้มข้นของ Au(III) ในสารละลายที่เวลาต่าง ๆ และ (ข) ค่าความสามารถในการดูดซับ q_t (mg/g) ที่เวลาต่าง ๆ

อิทธิพลของวิธีการทำแห้งต่อพฤติกรรมการทำแห้งของเหง้าเร่วน้อย

Influence of Drying Methods on the Drying Behavior of *Amomum villosum* Lour. Rhizomes

อินทิรา คุ่มญาติ¹ กัลยกร อรุณพันธ์² ปักวัลณัฐ หนูหมื่น² ชนาภานต์ วงษ์สงฆ์ กฤษณะ อุดตัง¹

โสม บุญจันทร์¹ บุศรากรณ์ มหาโยธี²

Intira Koomyart¹ Kanyakorn Aroonpan² Pakwalun Numuen² Chanakan Wongsong²

Krissana Autduang¹, Chome Boonchan¹ and Busarakorn Mahayothee²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการทำแห้ง ได้แก่ การตากแดดและการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อพฤติกรรมการทำแห้งของเหง้าเร่วน้อย โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของเหง้าเร่วน้อยที่หั่นเป็นแว่น ผลการทดลองพบว่า ค่าปริมาณความชื้นของเหง้าเร่วน้อยลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาในการทำแห้ง โดยช่วงแรกมีการลดลงอย่างรวดเร็ว และเข้าสู่ช่วงอัตราการทำแห้งลดลงในระยะต่อมา โดยไม่พบช่วงอัตราการทำแห้งคงที่อย่างชัดเจน การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (เวลา 8.30 - 17.30 น.) สามารถลดความชื้นได้รวดเร็วและมีอัตราการทำแห้งสูงกว่าการตากแดดที่ระยะเวลาทำแห้งเท่ากัน เนื่องจากมีอุณหภูมิสูงกว่าและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า ในด้านคุณภาพพบว่าความชื้นของตัวอย่างลดลงจาก 82.55% (w.b.) เหลือ 7.40% และ 5.54% เมื่อทำแห้งเป็นเวลา 9 ชั่วโมงเท่ากัน สำหรับการตากแดดและการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ตามลำดับ ขณะที่ค่าวอเตอร์เอกทิวิตี (a_w) ลดลงจาก 0.996 เหลือ 0.366 และ 0.267 ซึ่งต่ำกว่าระดับที่จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ แสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ แต่การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า ดังนั้น การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการทำแห้งเหง้าเร่วน้อยในระดับการผลิตจริง

คำสำคัญ : เร่วน้อย การทำแห้ง พฤติกรรมการทำแห้ง อัตราการทำแห้ง วอเตอร์เอกทิวิตี

¹ สำนักวิชาเกษตรนวัตกรรม สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา ระยอง 21210 ประเทศไทย

School of Innovative Agriculture, Chitralada Technology Institute, Rayong 21210, Thailand

² ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.



Abstract

This research aimed to compare drying methods, sun drying and greenhouse solar drying, on the drying behavior of *Amomum villosum* Lour. rhizomes. The change in moisture content of the sliced rhizomes was monitored throughout the drying process. The results showed a continuous decrease in moisture content over time, with an initial rapid reduction followed by a falling rate period, and no distinct constant rate period was observed. Greenhouse solar drying (8:30 a.m. - 5:30 p.m.) achieved faster moisture reduction and higher drying rates than sun drying over the same drying time due to higher temperatures and lower relative humidity. In terms of quality, the moisture content of the samples decreased from 82.55% (w.b.) to 7.40% and 5.54% for sun drying and greenhouse solar drying, respectively, after 9 hours of drying. The water activity (a_w) decreased from 0.996 to 0.366 and 0.267, which are below the level required for microbial growth. This indicates that both methods can extend the shelf life, but greenhouse solar drying provides better efficiency. Therefore, greenhouse solar drying is a suitable method for large-scale production drying of *A. villosum* rhizomes.

Keyword : *Amomum villosum* Lour. drying, drying behavior, drying rate, water activity

บทนำ

เร่วน้อย (*Amomum villosum* Lour.) เป็นพืชในวงศ์ขิง (Zingiberaceae) ที่มีการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายทั้งในด้านอาหารและสมุนไพร เนื่องจากส่วนผลและเหง้าของเร่วจะมีน้ำมันหอมระเหยซึ่งให้กลิ่นเฉพาะตัว และประกอบด้วยสารสำคัญหลายชนิด เช่น สารประกอบฟีนอลิก ซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและต้านจุลชีพ (Tang et al., 2021; Zhang et al., 2023) นิยมนำส่วนผล ลำต้นใต้ดิน (เหง้า) มาใช้เป็นเครื่องเทศในการประกอบอาหาร รวมถึงใช้ในตำรายาแผนไทยเพื่อช่วยขับลมและส่งเสริมการย่อยอาหาร นอกจากนี้ เร่วน้อยยังถือเป็นพืชที่มีศักยภาพทางเศรษฐกิจ โดยเฉพาะในกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์สุขภาพ

อย่างไรก็ตาม เหง้าของเร่วสดมีปริมาณความชื้นสูงประมาณ 80–85% (สุนันท์, 2561) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียได้ง่าย ทั้งในด้านจุลชีววิทยาและคุณภาพทางเคมี การทำแห้งจึงเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในการลดความชื้น ยืดอายุการเก็บรักษา และช่วยคงคุณภาพของสารสำคัญในวัตถุดิบ โดยวิธีการทำแห้งที่แตกต่างกัน เช่น การตากแดด การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และการอบแห้งด้วยลมร้อน อาจส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความชื้น ระยะเวลาในการทำแห้ง รวมถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น สี ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

การศึกษาพฤติกรรมการทำแห้ง โดยใช้กราฟการทำแห้งเป็นเครื่องมือสำคัญในการอธิบายลักษณะการลดความชื้นของตัวอย่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและพัฒนากระบวนการทำแห้งให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยที่ผ่านมาในพืชสมุนไพรส่วน



ใหญ่ยังมุ่งเน้นเฉพาะผลของวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หรือศึกษาพฤติกรรมการทำแห้งเพียงบางวิธีเท่านั้น โดยยังขาดการศึกษาที่เปรียบเทียบวิธีการทำแห้งหลายรูปแบบร่วมกับการวิเคราะห์ทั้งพฤติกรรมการทำแห้งและคุณภาพทางเคมีของร่วนน้อยอย่างเป็นระบบ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการทำแห้ง ได้แก่ การตากแดด และการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อพฤติกรรมการทำแห้งของร่วนน้อย โดยวิเคราะห์กราฟการทำแห้งและอัตราการทำแห้ง เพื่อคัดเลือกวิธีการทำแห้งที่เหมาะสมและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ ร่วนน้อย พฤติกรรมการทำแห้ง กราฟการทำแห้ง ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก วอเตอร์แอกทีวิตี

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของกระบวนการทำแห้งด้วยการตากแดด และการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อกราฟการทำแห้ง อัตราการทำแห้ง และคุณภาพด้านความชื้นของเห้งร่วนน้อย

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมวัตถุดิบ

เห้งร่วนของร่วนน้อยอายุ 1 ปี 6 เดือน เก็บเกี่ยวในช่วงเดือนมกราคม 2569 จากแปลงปลูกในศูนย์การเรียนรู้เกษตรนวัตกรรม สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา อำเภอวังจันทร์ จังหวัดระยอง จากนั้นขนส่งมาที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม เพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง โดยนำเห้งมาตัดส่วนรากและลำต้นออก ล้างทำความสะอาด สะเด็ดน้ำ เก็บตัวอย่างด้วยการบรรจุในถุงพลาสติก และเก็บรักษาไว้ในตู้เย็น (อุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียส) เพื่อรอการนำไปทำแห้ง

การศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดด

นำตัวอย่างร่วนน้อย (รูปที่ 1 (A)) ออกจากตู้เย็นมาล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้งเพื่อปรับอุณหภูมิของตัวอย่าง จากนั้นทำให้สะเด็ดน้ำ และหั่นเป็นชิ้นแฉ่นตามขวางของเห้ง โดยมีความหนาประมาณ 0.2 เซนติเมตร ซึ่งตัวอย่างร่วนประมาณ 100 กรัม จัดวางเรียงแบบชั้นเดียวบนถาดสเตนเลสที่รองด้วยผ้าขาวบาง (รูปที่ 1 (B)) จากนั้นนำตัวอย่างไปทำแห้งด้วย การทำแห้งแบบตากแดด ณ บริเวณแดดฟ้า ชั้น 3 ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร (รูปที่ 1 (C)) และการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดครัวเรือน (กว้าง 1.2 เมตร ยาว 2 เมตร) (รูปที่ 1 (D)) โดยในวันที่ 1 ทำการอบแห้งตั้งแต่เวลา 08.30–17.30 น. และชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุก 1 ชั่วโมง นำตัวอย่างเก็บไว้ในห้องปฏิบัติการและคลุมด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นในวันที่ 2 ดำเนินการทำแห้งต่อในช่วงเวลา 08.30–13.30 น. พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุก 1 ชั่วโมง

ในระหว่างการตากแดดและอบแห้ง ทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์แบบอัตโนมัติ (Data Logger, GM1365) ความเร็วลมของลมร้อนภายในและภายนอกระบบอบแห้งด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบ Hotwire (Testo รุ่น 405i)

การทดลองดำเนินการจำนวน 2 ซ้ำ โดยซ้ำที่ 1 ดำเนินการทดลอง เมื่อวันที่ 12 มกราคม 2569 และซ้ำที่ 2 ดำเนินการเมื่อวันที่ 19 มกราคม 2569

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

นำตัวอย่างเร่งน้ำหนักหาความหาความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ โดยนำตัวอย่างเร่งน้ำหนัก 5 กรัม ใส่ลงในถ้วยอะลูมิเนียมที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วนำไปอบด้วยตู้อบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่ (วิธีมาตรฐานของ AOAC International) โดยนำข้อมูลผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังอบแห้งมา คำนวณหาค่าความชื้น (ร้อยละฐานเปียก) ของเร่งน้ำหนัก โดยมีสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1

$$MC_{wb} = \left(\frac{W_w - W_d}{W_w} \right) \times 100$$

สมการที่ 1

โดยที่ MC_{wb} คือ ความชื้น (ฐานเปียก)

W_w คือ น้ำหนักเร่งน้ำหนักก่อนอบ (กรัม)

W_d คือ น้ำหนักเร่งน้ำหนักหลังอบ (กรัม)

การหาอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio; MR)

คำนวณอัตราส่วนความชื้น (สมการที่ 2) เพื่อนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการทำแห้ง

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

สมการที่ 2

โดยที่ MR = อัตราส่วนความชื้น

M_t = ความชื้นที่เวลาอบแห้งที่แตกต่างกัน (ฐานแห้ง)

M_0 = ความชื้นเริ่มต้น (ฐานแห้ง)

M_e = ความชื้นที่จุดสมดุล (ฐานแห้ง)

การวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w)

การวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) ทำได้โดยการวัดด้วยเครื่องวัด a_w (AQUALAB PRE) โดยนำตัวอย่างเร่งน้ำหนัก จำนวน 10 กรัม หรือเร่งน้ำหนักแห้ง จำนวน 1 กรัม มาบดละเอียด เป็นเวลา 30 วินาที แล้วทำ

การวัดค่า a_w ของตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จนกระทั่งค่าคงที่แล้วบันทึกผลการวัด (AOAC, 2019) ทำการวัดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

จากการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งทำการวิเคราะห์ทางด้านสถิติ โดยหาค่าเฉลี่ยและวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) ด้วยโปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 18.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)

ผลและวิจารณ์

1. กราฟการทำแห้งและอัตราการทำแห้ง

จากรูปที่ 2(A) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio; MR) กับเวลา พบว่า ค่า MR ของเห็่นน้อยแห้งลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการทำแห้งทั้งการตากแดดและการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยในช่วงเริ่มต้นของการทำแห้ง (0-3 ชั่วโมงแรก) ค่า MR ลดลงอย่างรวดเร็ว สอดคล้องกับค่าอัตราการทำแห้ง (Drying rate; DR) ที่มีค่าสูงในระยะต้นของกระบวนการ (รูปที่ 2 (B)) แสดงให้เห็นว่า ในช่วงต้นของการทำแห้งตัวอย่างยังมีความชื้นสูงจะเป็นระยะที่มีการระเหยของน้ำอิสระซึ่งอยู่บริเวณผิวและช่องว่างระหว่างเซลล์ของเห็่นน้อย น้ำส่วนนี้สามารถเคลื่อนที่และระเหยออกได้ง่ายภายใต้แรงขับเคลื่อนจากความแตกต่างของความดันไอระหว่างผิววัสดุกับอากาศแวดล้อม ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับการทำแห้งในซิงเห็่นแห้ง (Shaukat et al., 2024) หลังจากนั้น ค่า DR ลดลงอย่างต่อเนื่องตามการลดลงของค่า MR โดยไม่พบช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (constant rate period) ที่ชัดเจน อธิบายได้ว่าความชื้นที่ผิวหน้าของเห็่นน้อยไม่สามารถคงสภาพให้เปียกอยู่ได้ตลอดเวลา ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของเห็่นน้อยที่มีเส้นใยและโครงสร้างที่กักเก็บความชื้นไว้ภายใน อีกทั้งเนื้อเยื่อพืชจะเกิดการหดตัวและเซลล์เกิดการยุบตัวระหว่างการทำแห้ง กลายเป็นโครงสร้างที่แน่นและพับซ้อนกันเพิ่มแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในสู่ภายนอก (Jia et al., 2026) ส่งผลให้เข้าสู่ช่วงอัตราการทำแห้งลดลง (falling rate period) สอดคล้องกับการศึกษาการทำแห้งเห็่นของ Hoque et al. (2013) ที่รายงานว่าไม่พบช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ และกระบวนการทำแห้งส่วนใหญ่ถูกควบคุมโดยการแพร่ของความชื้นจากภายในเนื้อเยื่อสู่ผิววัสดุ ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของวัสดุทางการเกษตรและสมุนไพร เนื่องจากเมื่อความชื้นอิสระบริเวณผิวลดลง การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในสู่ผิววัสดุจะกลายเป็นปัจจัยควบคุมหลักทำให้อัตราการทำแห้งลดลงตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการทำแห้ง พบว่า การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีอัตราการลดลงของค่า MR สูงกว่าการตากแดดอย่างชัดเจน และมีค่า DR สูงกว่าในช่วงต้นถึงช่วงกลางของการทำแห้ง สะท้อนถึงประสิทธิภาพในการกำจัดความชื้นที่ดีกว่า โดยสามารถลดความชื้นของเห็่นน้อยให้ต่ำกว่า 10% (ฐานเปียก) ได้ภายในเวลา 5 ชั่วโมง ขณะที่การตากแดดใช้เวลา 6 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีสภาวะการทำแห้งที่เหมาะสมกว่า ได้แก่ อุณหภูมิสูงกว่า ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า (รูปที่ 3) และการไหลเวียนของอากาศที่สม่ำเสมอ (รูปที่ 4(B)) ส่งผลให้แรงขับเคลื่อนใน

การถ่ายเทความชื้นสูงขึ้นและสามารถกำจัดไอน้ำออกจากผิววัสดุได้อย่างต่อเนื่อง ในทางตรงกันข้าม การตากแดดมีข้อจำกัดจากความแปรปรวนของสภาพแวดล้อม คืออุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ซึ่งส่งผลให้แรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทมวลไม่สม่ำเสมอ ทำให้การระเหยของน้ำเกิดได้ช้ากว่า สอดคล้องกับรายงานของ Mahayothee et al. (2020) ที่พบว่า การตากแดดมีประสิทธิภาพการลดความชื้นของโพลีต่ำกว่าการอบแห้งในระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก เนื่องจากสภาวะการทำแห้งแปรปรวนตามสภาพแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ในช่วงท้ายของการทำแห้ง ค่า DR ของทั้งสองวิธีมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เนื่องจากกระบวนการถูกควบคุมโดยการแพร่ของน้ำจากภายในโครงสร้างของเรณูน้อยเป็นหลัก มากกว่าสภาวะแวดล้อมภายนอก

3. ค่าความชื้นและวอเตอร์แอคติวิตีของเหง้าเรณูน้อยแห้ง

จากตารางที่ 1 พบว่า ตัวอย่างเหง้าเรณูน้อยสดมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูง ($82.55 \pm 2.95\%$ ฐานเปียก) และมีค่าวอเตอร์แอคติวิตี (water activity; a_w) เท่ากับ 0.996 ± 0.001 ซึ่งเป็นค่าที่สูงและเสี่ยงต่อการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมี เนื่องจากค่า a_w เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความคงตัวของอาหารและการเจริญของจุลินทรีย์ โดยอาหารที่มีค่า a_w สูงจะมีแนวโน้มเกิดการเสื่อมเสียได้ง่าย (นิธิยา, 2550) เมื่อผ่านการทำแห้งทั้งการตากแดดและการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก สามารถลดปริมาณความชื้นและค่า a_w ของเหง้าเรณูน้อยได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการตากแดดมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ $7.40 \pm 0.95\%$ (w.b.) และค่า a_w เท่ากับ 0.366 ± 0.048 ขณะที่การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกให้ค่าความชื้นต่ำกว่า คือ $5.54 \pm 0.61\%$ (w.b.) และค่า a_w เท่ากับ 0.267 ± 0.018 การที่ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก สามารถลดความชื้นและค่า a_w ได้ต่ำกว่าการตากแดด เนื่องจากมีอุณหภูมิสูง ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ และสามารถควบคุมสภาวะการทำแห้งได้ดี ลดการดูดกลับความชื้นจากสิ่งแวดล้อมได้มากกว่าการตากแดด

สรุป

การศึกษานี้ พบว่า ทั้งการตากแดดและการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก สามารถลดความชื้นของเหง้าเรณูน้อยแห้งจนลงได้ต่อเนื่องตามเวลา ช่วงแรกลดลงรวดเร็วจากการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าตามค่าวอเตอร์แอคติวิตีที่สูง และช่วงท้ายลดลงช้าลงเนื่องจากการแพร่ของน้ำจากภายในโครงสร้างตัวอย่าง โดยไม่พบช่วงอัตราการแห้งคงที่ แสดงว่ากระบวนการส่วนใหญ่อยู่ในช่วงอัตราการแห้งลดลง การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีประสิทธิภาพสูงกว่าการตากแดด เนื่องจากมีอุณหภูมิสูง ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ และการไหลของอากาศสม่ำเสมอ ส่งผลให้ลดความชื้นได้รวดเร็วกว่า ในด้านคุณภาพ ทั้งสองวิธีสามารถลดความชื้นให้ต่ำกว่า 10% และค่า a_w ต่ำกว่า 0.60 ซึ่งยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้ โดยวิธีอบแห้งแบบเรือนกระจกให้ค่าความชื้นและ a_w ต่ำกว่า ดังนั้น การอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่า เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและสามารถควบคุมสภาวะการทำแห้งได้ดีกว่า เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในระดับการผลิตจริง

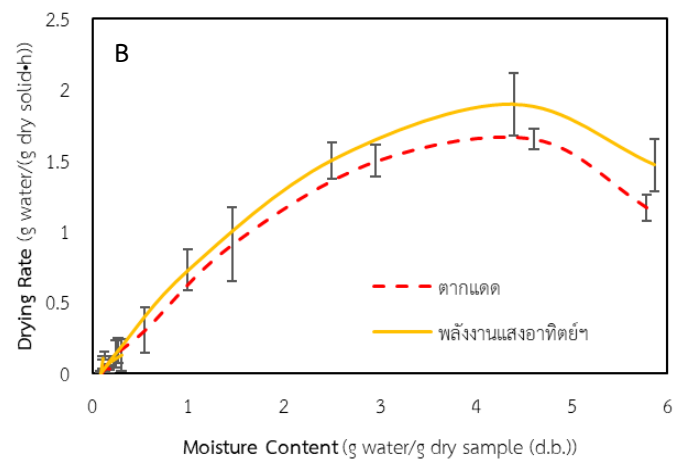
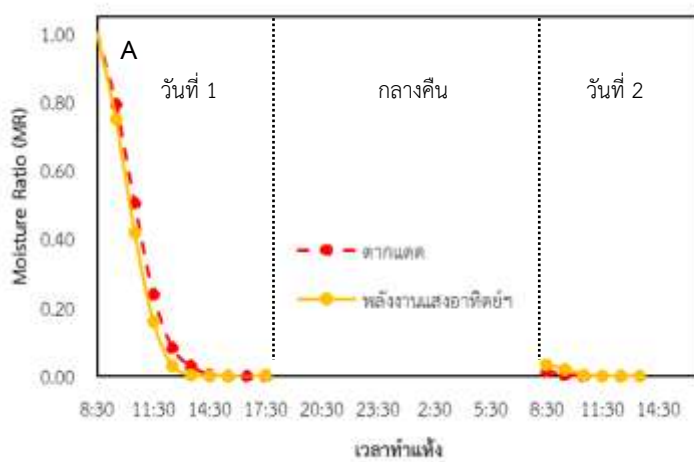


เอกสารอ้างอิง

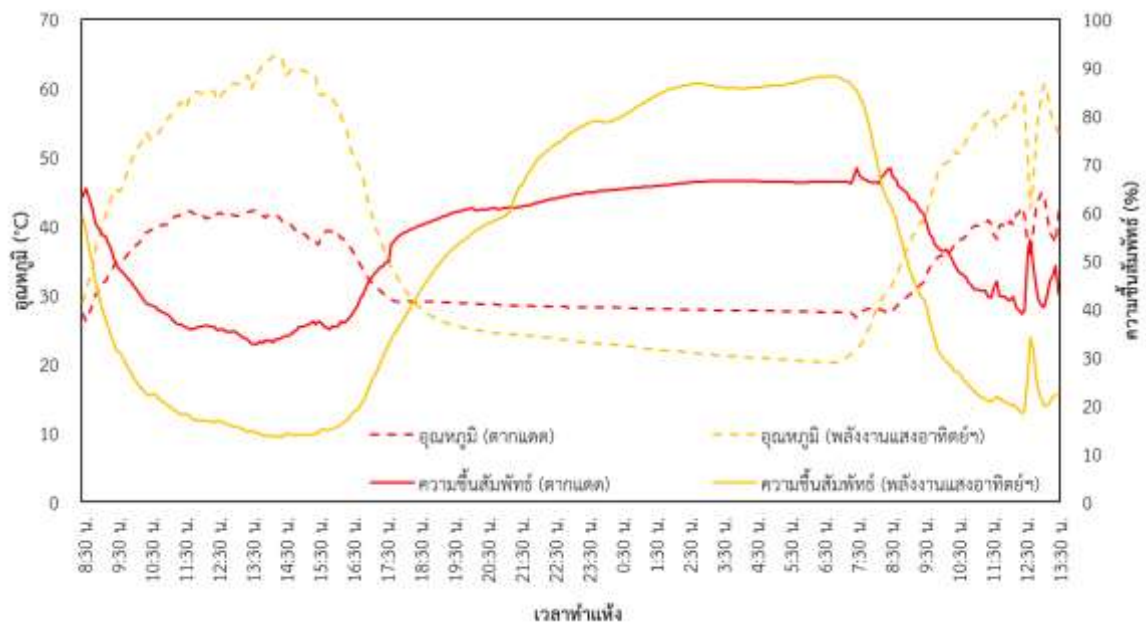
- นิธิยา รัตนพานนท์. (2550). เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์. 487 หน้า (45-47)
- สิริมา ชินสาร, วิชมนิ ยืนยงพุทธกาล, นิสานารถ กระแสรัช, มุทิตา แคนม้น, และอำภาพรณ จุลองจันทร์. (2562). ผลของกระบวนการผลิตต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของแว่วหอมผง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวใจเฉลิมพระเกียรติ, 5(1) 41-50
- สุนันท์ บุตรศาสตร์. (2561). สารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดจากส่วนต่าง ๆ ของแว่ว และการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชาใบแว่ว. สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม. 94 หน้า
- AOAC. (2019) Official Methods of Analysis of AOAC International. (21st ed.). Gaithersburg, MD, USA: AOAC International.
- Hoque, M.A., Bala, B.K., Hossain, M.A., & Uddin, M.B. (2013). Drying kinetics of ginger rhizome (*Zingiber officinale*). Bangladesh Journal of Agricultural Research, 38(2), 301–319.
- Jia, G., Ma, Y., Li, Y., Cheng, Y., & Huang, D. (2026). Drying performance and optimization of ginger slices using microwave vacuum drying. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 24(2), 15. <https://doi.org/10.32604/fhmt.2026.076516>
- Mahayothee, B., Thamsala, T., Khuwijitjarua, P. & Janjai, S. (2020) Effect of drying temperature and drying method on drying rate and bioactive compounds in cassumunar ginger (*Zingiber montanum*). Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants. 18, 100262
- Shaukat, M.N., Fallico, B. & Nazir, A. (2024) Impact of air-drying temperatures on drying kinetics, physicochemical properties, and bioactive profile of ginger. *Foods*, 13(7), 1096.
- Tang, C., Chen, J., Zhou, Y., Ding, P., He' G., Zhang' L., Zhao, Z. & Yang, D. (2021). Exploring antimicrobial mechanism of essential oil of *Amomum villosum* Lour. against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. *Microbiological Research*, 242, 126608.
- Zhang, M., Shuai, X.-X., Wei, Z., Dai, T.-T., Wei, C.-B., Li, Y., He, J.-J., & Du, L.-Q. (2023). Characterization, antioxidant and antitumor activities of phenolic compounds from *Amomum villosum* Lour. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1–15.



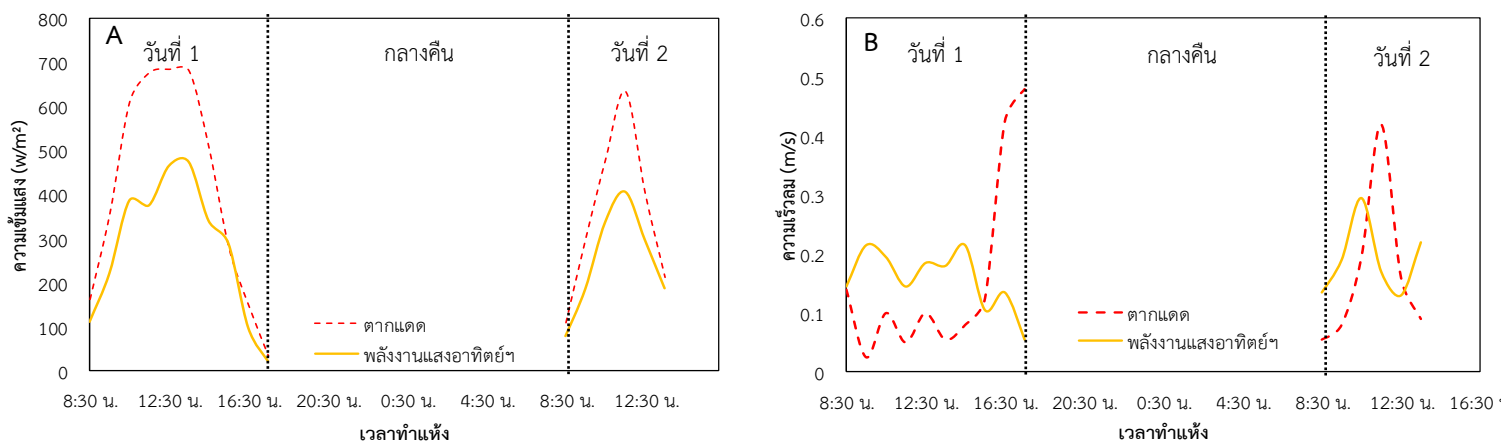
รูปที่ 1 เหง้าเร่วน้อยที่ตัดแต่งและทำความสะอาดแล้ว (A) หั่นเป็นชิ้นแว่นแล้ววางเรียงแบบชั้นเดียวบนตะแกรง (B) แล้วทำแห้งด้วยการตากแดด (C) และการทำแห้งในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (D)



รูปที่ 2 กราฟการทำแห้ง (Drying curve) ระหว่างการทำแห้ง (A) และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้ง (Drying rate) กับความชื้นในเหง้าเร่วน้อย ระหว่างการตากแดดและทำแห้งในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก



รูปที่ 3 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างการตากแดดและทำแห้งในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก



รูปที่ 4 ความเข้มแสง (A) และความเร็วลมภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและภายนอกระหว่างการตากแดด (B) ตัวอย่างเหง้าเร่วน้อย

ตารางที่ 1 ปริมาณความชื้นและวอเตอร์เอกทิวิตีในตัวอย่างเหง้าเร่วน้อยสดเปรียบเทียบกับเหง้าเร่วน้อยแห้ง

วิธีการทำแห้ง	ปริมาณความชื้น (% w.b.)	วอเตอร์เอกทิวิตี
ตัวอย่างสด	82.55 ± 2.95^a	0.996 ± 0.001^a
ตากแดด	7.40 ± 0.95^b	0.366 ± 0.048^b
ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	5.54 ± 0.61^c	0.267 ± 0.018^c

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ผลของวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพทางกายภาพและเคมีของเหง้าเร่วน้อยผง

Effect of Drying Methods on the Physical and Chemical Properties of *Amomum villosum* Lour. Rhizomes Powder

อินทิรา คุ่มญาติ¹ กัลยากร อรุณพันธ์² ภักวาลัญญ์ หนูหมื่น² ชนาکانต์ วงษ์สงฆ์² กฤษณะ อุดด้วง¹
 โฉม บุญจันทร์¹ บุศราภรณ์ มหาโยธี²

Intira Koomyart¹ Kanyakorn Aroonpan² Pakwalun Numuen² Chanakan Wongsong²
 Krissana Autduang¹ Chome Boonchan¹ and Busarakorn Mahayothee²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทำแห้งเหง้าเร่วน้อย (*Amomum villosum* Lour.) โดยใช้เหง้าเร่วน้อยอายุ 1 ปี 6 เดือน หั่นเป็นแผ่นหนา 0.2 เซนติเมตร นำไปทำแห้งแบบชั้นเดียวด้วยการทำแห้ง 3 วิธี ได้แก่ การตากแดด การใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก และการใช้ตู้อบลมร้อน (50 องศาเซลเซียส) โดยทำแห้งจนกระทั่งตัวอย่างมีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก) บดและร่อนเพื่อให้ผงมีขนาดสม่ำเสมอ (75-105 ไมครอน) พบว่า เมื่อเทียบกับตัวอย่างสด การทำแห้งและบดเป็นผงทำให้มีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (TPC) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งอาจเป็นผลจากการลดความชื้นและการทำลายโครงสร้างเซลล์ที่ช่วยเพิ่มการสกัดสารสำคัญ แต่วิธีการทำแห้งทั้ง 3 วิธี ไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ต่อค่า TPC ซึ่งอยู่ในช่วง 14.00–14.55 mg GAE/g dry matter และค่า DPPH ซึ่งอยู่ในช่วง 42.08–45.36 mg Trolox/g dry matter เช่นเดียวกับค่าคุณภาพสี (L^* , a^* และ b^*) ของตัวอย่างเหง้าเร่วน้อยผงจากแต่ละวิธีก็ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการทำแห้งทั้ง 3 วิธี สามารถใช้ผลิตเหง้าเร่วน้อยผงที่มีคุณภาพใกล้เคียงกัน และการแปรรูปเป็นผงช่วยเพิ่มศักยภาพด้านสารออกฤทธิ์ ทำให้เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในเป็นวัตถุดิบหรือต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงต่อไป

คำสำคัญ : เร่วน้อย การทำแห้ง ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก สารประกอบฟีนอลิก ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

¹ สำนักวิชาเกษตรนวัตกรรม สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา ระยอง 21210 ประเทศไทย

School of Innovative Agriculture, Chitralada Technology Institute, Rayong 21210, Thailand

² ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000

ประเทศไทย

Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon

Pathom 73000, Thailand

Abstract

This study aimed to investigate the drying characteristics of *Amomum villosum* Lour. rhizomes using samples aged 1 year and 6 months, sliced to a thickness of 0.2 cm and dried in a single layer by three drying methods: sun drying, greenhouse solar drying, and hot-air oven drying at 50 °C. Drying was continued until the moisture content of the samples decreased to below 10% (wet basis). The dried samples were then ground and sieved to obtain a uniform powder size (75–105 µm). The results showed that drying and powdering significantly increased the total phenolic content (TPC) and antioxidant activity (DPPH) ($p \leq 0.05$) compared with fresh samples. This increase may be attributed to moisture reduction and disruption of cellular structures, which enhanced the extraction of bioactive compounds. However, the three drying methods had no significant effect ($p > 0.05$) on TPC values (14.00–14.55 mg GAE/g dry matter) or DPPH values (42.08–45.36 mg Trolox/g dry matter). Similarly, color parameters (L^* , a^* , and b^*) of *A. villosum* rhizome powder obtained from the different drying methods were not significantly different. These findings indicate that all three drying methods can be used to produce *A. villosum* rhizome powder with comparable quality. Furthermore, processing into powder enhances the bioactive compound potential, making the product suitable for use as a raw material or for further development into high-value products.

Keyword : *Amomum villosum* Lour, Drying, Greenhouse Solar Drying, Phenolic Compounds, Antioxidant Activity

บทนำ

เร่วเป็นพืชในวงศ์ขิง (Zingiberaceae) เป็นพืชสมุนไพรและเครื่องเทศ ซึ่งมีความหลากหลายของสายพันธุ์ที่เรียกต่างกัน เช่น เร่วใหญ่ เร่วน้อย เร่วแดง เร่วดง และเร่วหอม เป็นต้น พบมากในพื้นที่จังหวัดจันทบุรี ระยอง และตราด โดยผลและลำต้นใต้ดินหรือเหง้าของเร่วมีน้ำมันหอมระเหยซึ่งให้กลิ่นหอมเฉพาะตัว จึงนิยมนำมาใช้เป็นเครื่องเทศในอาหารพื้นถิ่น เช่น แกงป่า แกงเผ็ด และก๋วยเตี๋ยวเลียง รวมถึงใช้ดับกลิ่นคาวในอาหารประเภทเนื้อสัตว์ได้ (สุนันท์, 2561) อีกทั้งในทางการแพทย์แผนไทย เร่วยังถูกใช้เป็นยาขับลม บรรเทาอาการท้องอืด ท้องเฟ้อ และช่วยกระตุ้นการย่อยอาหาร นอกจากนี้ยังมีรายงานถึงฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ เช่น การต้านจุลชีพและการต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สุขภาพและเครื่องสำอางในอนาคต ทั้งนี้ น้ำมันหอมระเหยของเร่วหอมยังประกอบด้วยสารสำคัญในกลุ่ม ฟีนอลิก เช่น anethole และ methyl chavicol ซึ่งมีบทบาทในการต้านอนุมูลอิสระ (เอกรัฐ, 2556)

ในเชิงเศรษฐกิจ เร่วจัดเป็นพืชสมุนไพรที่มีศักยภาพสูงในการพัฒนาเป็นสินค้าเกษตรมูลค่าสูง โดยเฉพาะในรูปแบบเครื่องเทศแห้งและวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมสมุนไพร อย่างไรก็ตาม เหง้าเร่วสดมีความชื้นสูงประมาณ 80–85% (wet basis) (สุนันท์, 2561) ส่งผลให้เกิดการเสื่อมเสียได้ง่ายจากจุลินทรีย์และ



การสูญเสียสารสำคัญ การทำแห้งจึงเป็นกระบวนการสำคัญในการลดความชื้น ยืดอายุการเก็บรักษา และเพิ่มความสะดวกในการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่อไป

วิธีการทำแห้งมีผลโดยตรงต่ออัตราการลดความชื้น ระยะเวลาในการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น สี กลิ่น และปริมาณน้ำมันหอมระเหย อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์ โดยมีรายงานว่า การทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำหรือการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสามารถรักษาคุณภาพดังกล่าวได้ดีกว่าการใช้อุณหภูมิสูง ทั้งนี้ ในการผลิตระดับครัวเรือนวิธีที่นิยมใช้ ได้แก่ การตากแดด การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก และการอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน โดยการตากแดดมีต้นทุนต่ำแต่ควบคุมสภาวะและสุขลักษณะได้ยาก ขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถควบคุมสภาวะได้ดีแต่มีต้นทุนด้านพลังงานสูง

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเร่งด่วน (Amomum villosum Lour.) โดยศึกษาผลของวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของเร่งด่วน ทั้งในด้านปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ สมบัติการต้านอนุมูลอิสระ และคุณภาพสี เพื่อให้ได้กระบวนการผลิตเร่งด่วนที่เหมาะสม มีคุณภาพสูง และสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหารและผลิตภัณฑ์สุขภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ อันจะช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับเร่งด่วน และขยายโอกาสทางการตลาดในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของวิธีการทำแห้ง ได้แก่ การตากแดด การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก และการอบแห้งด้วยลมร้อน ต่อคุณภาพของเร่งด่วน (A. villosum Lour.) ในด้านสี ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

เร่งด่วนของเร่งด่วนอายุ 1 ปี 6 เดือน เก็บเกี่ยวในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2569 จากแปลงปลูกในศูนย์การเรียนรู้เกษตรนวัตกรรม สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา อำเภอวังจันทร์ จังหวัดระยอง จากนั้นขนส่งมาที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม เพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง โดยนำเร่งด่วนมาตัดส่วนรากและลำต้นออก ล้างทำความสะอาด (รูปที่ 1) สะเด็ดน้ำ เก็บตัวอย่างด้วยการบรรจุในถุงพลาสติก และเก็บรักษาไว้ในตู้เย็น (อุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียส) เพื่อรอการนำไปทำแห้ง

การศึกษาผลของวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของเร่งด่วน

นำตัวอย่างเร่งด่วนแห้งเป็นแผ่นตามขวางความหนาประมาณ 0.2 เซนติเมตร ซึ่งตัวอย่างเร่งด่วนประมาณ 100 กรัม จัดวางเรียงแบบชั้นเดียวบนถาดสเตนเลสที่รองด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นนำตัวอย่างไปทำแห้งด้วยวิธีตากแดด ณ บริเวณแดดฟ้า ชั้น 3 ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร ทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดครัวเรือน (กว้าง 1.2 เมตร ยาว 2 เมตร) และทำแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนแบบถาด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สำหรับการทำแห้งแบบตากแดดและการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์



ดำเนินการทดลองในช่วงเวลา 2 วัน โดยในวันที่ 1 ทำการอบแห้งตั้งแต่เวลา 08.30–17.30 น. และชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุก 1 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดการทดลองในแต่ละวัน (เวลา 17.30 น.) นำตัวอย่างเก็บไว้ในห้องปฏิบัติการ และคลุมด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นในวันที่ 2 ดำเนินการทำแห้งต่อในช่วงเวลา 08.30–13.30 น. พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุก 1 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักตัวอย่างคงที่ สำหรับการทำให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อน ทำการทดลองอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เวลา 08.30–19.30 น. โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุก 1 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักตัวอย่างคงที่

ตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้งแต่ละวิธีนำมาบดด้วยเครื่องบด รุ่น HR2223 (Philips) เป็นเวลา 1 นาที ที่ระดับความแรงเบอร์ 2 จากนั้นนำไปร่อนผ่านเครื่องร่อนตะแกรงขนาด 140 เมช (105 ไมครอน) และ 200 เมช (75 ไมครอน) บรรจุถุงสุญญากาศ ปิดผนึก และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

เตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging โดยการสกัดตัวอย่างด้วยตัวทำละลาย ตัวอย่างเรว่น้อยสด สับละเอียด 1 กรัม หรือ เรว่น้อยผง 0.1 กรัม ใส่ลงในหลอด Falcon tube เติมน้ำเมทานอล (เข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร) ปิดฝา เขย่าด้วยเครื่องผสม (Vortex mixer) เป็นเวลา 1 นาที แล้ว Sonication ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นกรองเอากากตัวอย่างออกด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4 ปริมาณสารสกัดเป็น 10 มิลลิลิตร ด้วยเมทานอลเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำไปวิเคราะห์คุณภาพ ดังต่อไปนี้

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดโดยวิธี Folin Ciocalteu (Komonsing et al., 2022)

นำสารสกัดตัวอย่าง 0.2 มิลลิลิตร ผสมกับ Folin-Ciocalteu reagent เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำมาเติมน้ำละลายโซเดียมคาร์โบเนต ความเข้มข้น 7.5 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 765 นาโนเมตร โดยรายงานเป็นค่ากรดแกลลิกสมมูลต่อกรัมตัวอย่างแห้ง (mg GAE/g dry matter)

การทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH radical scavenging (DPPH assay) (Komonsing et al., 2022)

นำสารสกัด 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย DPPH ปริมาตร 3 มิลลิลิตร เก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร โดยรายงานเป็นค่าไทโรลออกซ์ (Trolox) ต่อกรัมตัวอย่างแห้ง (mg Trolox/g dry matter)

ค่าสีของเรว่น้อยผง

นำเรว่น้อยผงบรรจุในถ้วยสำหรับวัดค่าสีให้เต็มถ้วย เกลี่ยตัวอย่างให้เรียบเสมอกัน ปิดฝาด้วย แล้ววัดด้วยเครื่องวัดสี (Hunter Lab) และรายงานเป็นค่า L^* a^* b^* Chroma และ Hue angle

การวิเคราะห์ข้อมูล

จากการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งทำการวิเคราะห์ทางด้านสถิติ โดยหาค่าเฉลี่ยและวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) ด้วยโปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 18.0 (SPSS Inc., Chicago, IL < USA)

ผลและวิจารณ์

การศึกษาผลของวิธีการทำแห้งต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

เนื่องจากวิธีการทำแห้งมีผลต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์จากเห็ด จึงได้ศึกษาผลของวิธีการทำแห้งที่แตกต่างกันต่อคุณภาพของเห็ดน้อยผงในด้านปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ (ตารางที่ 1) พบว่า วิธีการทำแห้งเห็ดน้อยทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การตากแดด การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก และการอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ไม่ส่งผลให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ($p > 0.05$) โดยค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกอยู่ในช่วงประมาณ 14.00–14.55 mg GAE/g dry matter และค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระอยู่ในช่วงประมาณ 42.08–45.36 mg Trolox/g dry matter ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม้วิธีการทำแห้งจะมีรูปแบบและสภาพที่แตกต่างกัน แต่ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าคงที่ของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในระดับที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน จากแนวโน้มของผลการทดลอง พบว่าการอบแห้งลมร้อนมีค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด รองลงมาคือการตากแดด และการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ตามลำดับ ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าการอบแห้งลมร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาได้อย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้ลดการสูญเสียสารสำคัญจากปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือการเสื่อมสภาพระหว่างกระบวนการทำแห้งได้ดีกว่า ในขณะที่การตากแดดและการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีความแปรปรวนของสภาพแวดล้อม เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิ และระยะเวลา ซึ่งอาจส่งผลต่อความเสถียรของสารประกอบฟีนอลิก

เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างสด พบว่าการทำแห้งและการอบแห้งส่งผลให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยตัวอย่างสดมีค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเพียง 9.17 mg GAE/g dry matter และค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ 11.15 mg Trolox/g dry matter ซึ่งต่ำกว่าตัวอย่างผงแห้งอย่างชัดเจน การเพิ่มขึ้นดังกล่าวอาจเกิดจากการทำลายโครงสร้างเซลล์พืชจากกระบวนการอบแห้งและการบดลดขนาด เพิ่มพื้นที่ผิว ส่งผลให้สารประกอบฟีนอลิกสามารถถูกสกัดออกมาได้ง่ายขึ้น

นอกจากนี้ กระบวนการให้ความร้อนในระหว่างการทำแห้งอาจช่วยกระตุ้นการปลดปล่อยสารฟีนอลิกที่จับอยู่กับโครงสร้างเซลล์ให้กลายเป็นรูปอิสระ ซึ่งมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่างผงแห้งสูงกว่าตัวอย่างสด แม้ว่าการทำแห้งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ แต่การอบลมร้อนใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น เช่น 60-80 องศาเซลเซียส หรือระยะเวลานานอาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของสารออกฤทธิ์ได้ (สิริมา และคณะ, 2562) ดังนั้น การเลือกวิธีการทำแห้งที่เหมาะสมจึงควรคำนึงถึงสมดุลระหว่างการรักษาสารออกฤทธิ์และประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต

การศึกษาผลของวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพสีของเหว่น้อยผง

จากผลการทดลองพบว่า วิธีการทำแห้งทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การตากแดด การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก และการอบแห้งลมร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส ไม่ส่งผลต่อค่าสีของเหว่น้อยผง ($p > 0.05$) (ตารางที่ 2) โดยค่าความสว่าง (L^*) ของตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งลมร้อนมีแนวโน้มสูงที่สุด รองลงมาคือการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และการตากแดดตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งในระบบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและสภาวะแวดล้อมได้ดีมีแนวโน้มช่วยรักษาความสว่างของผลิตภัณฑ์ได้มากกว่า ขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และสีเหลือง (b^*) ของทุกวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน สะท้อนว่าสารให้สีหลักในเหว่น้อยไม่ได้ถูกทำลายแตกต่างกันอย่างชัดเจนจากวิธีการทำแห้งที่ใช้

นอกจากนี้ ค่า Chroma (C^*) และ Hue angle (h°) ซึ่งบ่งบอกถึงความเข้มและลักษณะโทนสีของผลิตภัณฑ์ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันในทุกวิธี แสดงให้เห็นว่าวิธีการทำแห้งไม่ได้ส่งผลต่อความสดของสีหรือโทนสีของเหว่น้อยผงอย่างมีนัยสำคัญ

แม้ว่าวิธีการทำแห้งที่แตกต่างกันจะไม่ส่งผลต่อค่าสีของเหว่น้อยผงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่แนวโน้มที่พบแสดงให้เห็นว่าการควบคุมสภาวะการอบแห้ง เช่น อุณหภูมิ เวลา และความต่อเนื่องของการทำแห้ง อาจมีบทบาทในการรักษาคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นอาจสัมพันธ์กับปฏิกิริยาทางเคมี เช่น ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Shahmoridi et al., 2025) หรือการเกิดออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลิกในระหว่างกระบวนการทำแห้ง (Chan et al., 2009) ซึ่งควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่ออธิบายกลไกดังกล่าวอย่างละเอียดต่อไป

สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของวิธีการทำแห้ง ได้แก่ การตากแดด การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก และการอบแห้งลมร้อน (50 องศาเซลเซียส) ต่อคุณภาพของเหว่น้อยผง ในด้านปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และค่าสี โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างสด ผลการศึกษาพบว่า การทำแห้งและการบดเป็นผงส่งผลให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับตัวอย่างสด ซึ่งอาจเกิดจากการลดความชื้น การแตกตัวของโครงสร้างเซลล์ระหว่างการทำแห้ง รวมถึงการปลดปล่อยพื้นที่ผิวทำให้สารสำคัญถูกสกัดได้ดีขึ้น โดยวิธีการทำแห้งทั้ง 3 วิธีไม่ส่งผลต่อค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และค่าสีของเหว่น้อยผงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าวิธีการทำแห้งแต่ละวิธีสามารถคงคุณภาพของสารออกฤทธิ์และลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ได้ใกล้เคียงกัน โดยสรุป การแปรรูปเหว่น้อยเป็นผงแห้งสามารถช่วยเพิ่มศักยภาพด้านสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และวิธีการทำแห้งทั้งสามวิธีสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตเหว่น้อยผงได้อย่างเหมาะสม การเลือกวิธีการทำแห้งอาจพิจารณาจากต้นทุนพลังงาน สุขลักษณะและมาตรฐานการดำเนินงาน เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในระดับอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต



เอกสารอ้างอิง

- สิริมา ชินสาร, วิษณีย์ ยืนยงพุทธกาล, นิสานารถ กระแสร์ชวล, มุทิตา แคนม้น, และอำภาพรพรณ ฉลองจันทร์. (2562). ผลของกระบวนการผลิตต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของแว่วหอมผง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวใจเฉลิมพระเกียรติ., 5(1) 41-50.
- สุนันท์ บุตรศาสตร์. (2561). สารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดจากส่วนต่าง ๆ ของแว่ว และการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชาใบแว่ว. สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม. 94 หน้า.
- เอกรัฐ ศรีสุข. การศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพของใบแว่วหอม : มูลค่าเพิ่มจากของเหลือทิ้งทางเกษตร. 2556
- Chan, E. W. C., Lim, Y. Y., & Wong, S. K. (2009). Effects of different drying methods on the antioxidant properties of leaves and tea of ginger species. Food Chemistry, 113(1), 166-172.
- Komonsing, N., Khuwijitjaru, P., Nagle, M., Müller, J., & Mahayothee, B. (2022). Effect of drying temperature together with light on drying characteristics and bioactive compounds in turmeric slice. Journal of Food Engineering, 317, 110695.
- Shahimoridi, A., Ebadi, M.-T., Ayyari, M., & Yamini, Y. (2025). Optimizing drying techniques for turmeric (*Curcuma longa* L.): Impacts on color, curcumin, and essential oil composition. Food Chemistry X, 30, 102914.



รูปที่ 1 เหง้าขมิ้นชันอายุ 1 ปี 6 เดือน ที่ยังไม่ได้ตัดแต่งและทำความสะอาด (ซ้าย) และเหง้าของขมิ้นชันที่ล้างและตัดแต่งแล้ว (ขวา)

ตารางที่ 1 ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระของเหง้าขมิ้นชัน (ขนาดอนุภาค 75-105 ไมครอน) ที่ได้จากกระบวนการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการทำแห้ง	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g dry matter)	ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (mg Trolox/g dry matter)
ตัวอย่างสด	9.17 ± 0.90 ^b	11.15 ± 1.70 ^b
ตากแดด	14.51 ± 6.51 ^a	44.15 ± 3.08 ^a
ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	14.00 ± 5.29 ^a	42.08 ± 1.85 ^a
อบแห้งลมร้อน (50 องศาเซลเซียส)	14.55 ± 4.58 ^a	45.36 ± 3.33 ^a

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงค่าเฉลี่ยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 2 ภาพถ่ายและค่าสีของเรณูน้อยผง (ขนาดอนุภาค 75-105 ไมครอน) ที่ได้จากกระบวนการทำแห้งด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการทำแห้ง	ค่าสี				
	L* ^{ns}	a* ^{ns}	b* ^{ns}	C* ^{ns}	h° ^{ns}
ตากแดด	65.94±1.55	7.98 ± 0.20	31.19 ± 0.73	32.20 ± 0.73	1.32 ± 0.01
					
ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	66.93 ±0.78	7.67 ±0.49	31.39 ±1.13	32.31± 1.22	1.33±0.01
					
อบแห้งลมร้อน (50 องศาเซลเซียส)	67.32 ± 1.35	7.64 ± 0.25	31.33 ± 1.02	32.25 ± 1.02	1.33 ± 0.01
					

หมายเหตุ ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05)



ผลของเส้นใยวันมะพร้าวที่ผ่านการแช่ต่างและระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้างต่อสมบัติของอัลจิเนตไฮโดรเจลคอมโพสิต

Effect of alkaline-treated nata de coco fiber and cross-linking time on the properties of alginate composite hydrogels

ประดิทรศณ ช่างปิ่น¹, กรกมล พูลสุวรรณ¹, สุธธิกานต์ กัลปะ¹, ปราโมทย์ คูวิจิตรจารู¹, และ ขวัญใจ กลิ่นจงกล^{1*}

Pradithat Changpuen¹, Kornkamon Poonswan¹, Suttikan Kanlapa¹, Pramote Khuwijitjaru¹, and Khwanjai Klinchongkon^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการปรับสภาพเส้นใยวันมะพร้าวและระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้างต่อสมบัติของอัลจิเนตไฮโดรเจลคอมโพสิต โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเส้นใยวันมะพร้าวที่ไม่ผ่านการแช่ต่างถูกผสมกับสารละลายไฮโดรเจลคอมโพสิตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.5–2.0 โดยน้ำหนัก และนำไปแช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตตเป็นเวลา 0.5 และ 20 ชั่วโมง เพื่อศึกษาการเกิดฟองอากาศภายในโครงสร้างไฮโดรเจล ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้างเป็น 20 ชั่วโมงสามารถลดการกักเก็บฟองอากาศได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นอัลจิเนตร้อยละ 2.0 ส่งผลให้โครงสร้างเจลมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ในขั้นตอนที่สอง ได้นำระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้างที่เหมาะสมคือ 20 ชั่วโมง มาใช้เปรียบเทียบกับไฮโดรเจล คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยวันมะพร้าวที่ผ่านการแช่ต่างและไม่ผ่านการแช่ต่าง โดยประเมินสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความแน่นเนื้อและความเหนียว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจลคอมโพสิตส่งผลให้ค่าความแน่นเนื้อและความเหนียวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ คอมโพสิตที่ใช้เส้นใยผ่านการแช่ต่างมีสมบัติเชิงกลสูงกว่ากลุ่มที่ใช้เส้นใยไม่ผ่านการแช่ต่าง โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นอัลจิเนตร้อยละ 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการแช่ต่างเส้นใยวันมะพร้าวร่วมกับการเพิ่มระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้างสามารถช่วยลดข้อบกพร่องของโครงสร้างและเพิ่มความแข็งแรงของอัลจิเนตไฮโดรเจลคอมโพสิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาวัสดุไฮโดรเจลและผลิตภัณฑ์อาหารปรับเนื้อสัมผัสต่อไป

คำสำคัญ: ไฮโดรเจลคอมโพสิต, วันมะพร้าว, อัลจิเนต, การแช่ต่าง, สมบัติทางเนื้อสัมผัส

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000 ประเทศไทย

¹Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.



Abstract

This study investigated the effects of nata de coco fiber treatment and crosslinking time on the properties of alginate hydrogel composites. The experiment was divided into two stages. In the first stage, untreated nata de coco fibers were mixed with sodium alginate solutions at concentrations of 0.5–2.0% (w/w) and immersed in calcium lactate solution for 0.5 and 20 h to evaluate air bubble formation within the hydrogel structure. The results showed that increasing the crosslinking time to 20 h significantly reduced trapped air bubbles, particularly at 2.0% alginate concentration, resulting in a more uniform gel structure. In the second stage, the optimal crosslinking time of 20 h was applied to compare hydrogel composites containing alkali-treated and untreated nata de coco fibers. Mechanical properties, including firmness and toughness, were determined. The results demonstrated that increasing sodium alginate concentration significantly increased both firmness and toughness ($p < 0.05$). Furthermore, composites containing alkali-treated fibers exhibited higher mechanical properties than those containing untreated fibers, especially at alginate concentrations of 1.5 and 2.0% (w/w). These findings suggest that alkali treatment of nata de coco fibers combined with prolonged crosslinking time can effectively reduce structural defects and improve the mechanical strength of alginate hydrogel composites. The obtained information may be useful for the development of hydrogel-based materials and texture-modified food products.

Keywords: Composite hydrogel, Nata de coco, Sodium alginate, Alkali treatment, Textural properties

บทนำ

โซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate) เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถเกิดไฮโดรเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน จึงถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารและวัสดุชีวภาพอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถเกิดเจลได้ภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง มีความปลอดภัย และสามารถปรับสมบัติของเจลได้จากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเข้มข้นของอัลจิเนตและสภาวะการเชื่อมข้ามโครงสร้าง (Hu และคณะ, 2021) อย่างไรก็ตาม สารละลายโซเดียมอัลจิเนตมีความหนืดสูงและละลายน้ำได้ค่อนข้างยาก โดยเฉพาะเมื่อใช้ที่ความเข้มข้นสูง ส่งผลให้การเตรียมสารละลายให้มีความสม่ำเสมอต้องอาศัยแรงเฉือนจากการกวนหรือการปั่นผสม

วุ้นมะพร้าว (Nata de coco) เป็นผลิตภัณฑ์แบคทีเรียเซลลูโลสที่มีลักษณะเป็นเส้นใย สามารถอุ้มน้ำได้ดี และมีความแข็งแรงเชิงโครงสร้าง (Torres และคณะ, 2019) ในกระบวนการผลิตวุ้นมะพร้าวเชิงอุตสาหกรรม มักเกิดเศษเหลือจากการตัดแต่งหรือชิ้นส่วนที่มีขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งยังคงมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลสและสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นการนำเศษวุ้นมะพร้าวมาใช้เป็นส่วนประกอบในระบบไฮโดรเจลจึงนับเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอาหาร อีกทั้งยังเป็นการศึกษาศักยภาพของเส้นใยธรรมชาติในการเสริมสร้างโครงสร้างของไฮโดรเจลคอมโพสิต

อีกด้วย อย่างไรก็ตาม การเติมเส้นใยวุ้นมะพร้าวลงในสารละลายโซเดียมอัลจิเนตที่มีความหนืดสูงทำให้การผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันทำได้ยาก จึงจำเป็นต้องใช้แรงผสมสูง เช่น การใช้เครื่องปั่นผสมอาหารรวมกับการกวนด้วยเครื่องกวนเหนือศีรษะ เพื่อช่วยให้เส้นใยกระจายตัวได้ทั่วถึง แต่กระบวนการดังกล่าวอาจทำให้เกิดฟองอากาศภายในระบบไฮโดรเจล ซึ่งส่งผลต่อความสม่ำเสมอของโครงสร้างและอาจลดสมบัติเชิงกลของเจลที่ได้ (Zhang และคณะ, 2025) นอกจากนี้ สิ่งเจือปนหรือสารอินทรีย์ที่ตกค้างบนพื้นผิววุ้นมะพร้าวอาจมีผลต่อการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับโครงข่ายอัลจิเนต การแช่ล้างจึงอาจช่วยปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยและเพิ่มการยึดเกาะในระบบคอมโพสิตได้ (Chen และคณะ, 2021)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้างต่อการเกิดฟองอากาศในไฮโดรเจล และศึกษาผลของการแช่ล้างเส้นใยวุ้นมะพร้าวร่วมกับระดับความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตต่อสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลคอมโพสิต ได้แก่ ค่าความแน่นเนื้อและความเหนียวเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาไฮโดรเจลคอมโพสิตที่มีโครงสร้างสม่ำเสมอและมีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้างด้วยแคลเซียมแลคเตตต่อการเกิดฟองอากาศในอัลจิเนตไฮโดรเจลที่ผสมเส้นใยวุ้นมะพร้าว
2. เพื่อศึกษาผลของการแช่ล้างเส้นใยวุ้นมะพร้าวและความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตต่อสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลคอมโพสิต ได้แก่ ค่าความแน่นเนื้อ และความเหนียว

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมเส้นใยวุ้นมะพร้าว

วุ้นมะพร้าวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ภัฏฐชล ฟู้ดส์ จำกัด จังหวัดสมุทรสงคราม โดยแบ่งเป็น 2 สภาวะ ได้แก่ วุ้นมะพร้าวที่ไม่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และวุ้นมะพร้าวที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามวิธีการที่เป็นมาตรฐานของผู้ผลิต เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนและสารตกค้างบนพื้นผิวที่เกิดจากกระบวนการผลิตวุ้นมะพร้าวโดยจุลินทรีย์ ซึ่งเส้นใยทั้งสองสภาวะถูกล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีค่า pH เป็นกลาง

การเตรียมอัลจิเนตไฮโดรเจลคอมโพสิต

เตรียมส่วนผสมสำหรับการขึ้นรูปไฮโดรเจลโดยกำหนดให้สารผสมทั้งหมดประกอบด้วยโซเดียมอัลจิเนต เส้นใยวุ้นมะพร้าว และน้ำ โดยใช้โซเดียมอัลจิเนตที่มีความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0% (w/w) และใช้เส้นใยวุ้นมะพร้าวในสัดส่วนคงที่ 1% (w/w) ของส่วนผสมทั้งหมด ส่วนที่เหลือเป็นน้ำปราศจากไอออน โดยมีตัวอย่างไฮโดรเจลที่ไม่เติมเส้นใยวุ้นมะพร้าวเป็นกลุ่มควบคุม เนื่องจากสารละลายโซเดียมอัลจิเนตมีความหนืดสูงและผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันได้ยาก โดยเฉพาะเมื่อเติมเส้นใยวุ้นมะพร้าวลงในระบบ จึงใช้เครื่องปั่น



ผสมอาหารช่วยกระจายตัวของเส้นใยในเบื้องต้น ก่อนนำไปกวนต่อด้วยเครื่องกวนเหนือศีรษะ (Overhead stirrer) ที่ความเร็วคงที่จนได้สารผสมที่สม่ำเสมอ

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกศึกษาผลของระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้างต่อการเกิดฟองอากาศภายในไฮโดรเจล โดยใช้เส้นใยวันมะพร้าวที่ไม่ผ่านการแช่ต่างผสมกับสารละลายอัลจินตและขึ้นรูปด้วยวิธี external gelation โดยฉีดของผสมด้วยไซริงค์ขนาด 50 มิลลิลิตร ลงในสารละลายแคลเซียมแลคเตท 4% จากนั้นแช่ไว้เป็นเวลา 0.5 และ 20 ชั่วโมง เพื่อศึกษาการเกิดฟองอากาศ ในขั้นตอนที่สองใช้ระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้างที่เหมาะสมจากการทดลองขั้นแรกเพื่อศึกษาผลของชนิดเส้นใยวันมะพร้าวและความเข้มข้นของโซเดียมอัลจินตต่อสมบัติเชิงกลของอัลจินตไฮโดรเจลคอมโพสิต ตัวอย่างไฮโดรเจลทั้งหมดถูกนำไปพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ก่อนนำไปวิเคราะห์โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์คุณลักษณะของไฮโดรเจล

วิเคราะห์การกักเก็บฟองอากาศภายในไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (รุ่น 2000× HD LCD Digital Microscope, ANESOK 315) ที่กำลังขยาย 500× โดยสุ่มถ่ายภาพตัวอย่างจำนวน 10 ภาพต่อการทดลอง และนับจำนวนฟองอากาศเฉลี่ยต่อหนึ่งกรอบภาพ ซึ่งมีพื้นที่เท่ากับ 0.627 ตารางมิลลิเมตร

สำหรับการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล ทำการทดสอบแรงตัด (Shear force) ด้วยเครื่องวัดแรงดิจิทัลที่ติดตั้งใบมีดสำหรับการตัด ตามวิธีการของ Klinchongkon และคณะ (2025) เพื่อบันทึกค่าความแน่นเนื้อ (Firmness) และความเหนียว (Toughness) ของตัวอย่าง โดยค่าความแน่นเนื้อหมายถึงค่าความต้านทานสูงสุดของตัวอย่างต่อแรงตัด ซึ่งสะท้อนถึงความแข็งแรงของโครงสร้างไฮโดรเจล ส่วนค่าความเหนียวหมายถึงปริมาณพลังงานที่ตัวอย่างสามารถดูดซับได้ก่อนเกิดการแตกหรือขาด คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟแรง-ระยะทางที่ได้จากการทดสอบแรงตัด

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Games-Howell test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ

ผลและวิจารณ์

ผลของระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้างต่อการกักเก็บฟองอากาศ

จากการสังเกตโครงสร้างภายในของไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (ภาพที่ 1) พบว่าระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้างมีผลต่อปริมาณฟองอากาศภายในอัลจินตไฮโดรเจลอย่างชัดเจน โดยตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตทเป็นเวลา 20 ชั่วโมง มีจำนวนฟองอากาศน้อยกว่าตัวอย่างที่แช่เพียง 0.5 ชั่วโมงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 1) โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นโซเดียมอัลจินต 2.0% ซึ่งจำนวนฟองอากาศลดลงจากประมาณ 31 ฟอง เหลือประมาณ 9 ฟองต่อหนึ่งกรอบภาพ การเกิดฟองอากาศในระบบมีความสัมพันธ์กับกระบวนการเตรียมสารผสม เนื่องจากสารละลายโซเดียมอัลจินตมีความหนืดสูงและ

ต้องใช้แรงเหวี่ยงจากการปั่นผสมร่วมกับการกวนด้วยเครื่องกวนเหนือศีรษะ เพื่อช่วยให้เส้นใยุ่นมะพร้าวกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดการกักเก็บอากาศภายในสารผสม โดยเมื่อเกิดการเชื่อมข้ามโครงสร้างอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาเริ่มต้น โครงข่ายเจลที่เกิดขึ้นบริเวณผิวด้านนอกจะจำกัดการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ ทำให้ฟองอากาศบางส่วนถูกกักเก็บอยู่ภายในโครงสร้างเจล (Hu และคณะ, 2021) อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้างเป็น 20 ชั่วโมง แคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถแพร่เข้าสู่ภายในโครงข่ายอัลจิเนตได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น ทำให้เกิดโครงสร้างเจลที่สม่ำเสมอและมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักการแพร่ของไฮดรอกไซด์ในระบบ external gelation ที่การเกิดเจลจะค่อย ๆ พัฒนาจากผิวเข้าสู่แกนกลางของวัสดุ (Hu และคณะ, 2021) นอกจากนี้ ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นยังเอื้อต่อการลอยตัวและการหลุดออกของฟองอากาศที่ตกค้างอยู่ในสารผสมก่อนที่โครงสร้างเจลจะสมบูรณ์ จึงช่วยลดข้อบกพร่องภายในไฮโดรเจลได้ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้างเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสม่ำเสมอของโครงสร้างไฮโดรเจล ซึ่งอาจมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุได้ ดังนั้น ระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้าง 20 ชั่วโมงจึงถูกเลือกใช้เป็นสภาวะในการเตรียมไฮโดรเจลสำหรับการทดลองในขั้นตอนถัดไป เนื่องจากสามารถลดการกักเก็บฟองอากาศและให้โครงสร้างเจลที่มีความสมบูรณ์มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการแช่ที่สั้นกว่า

สมบัติเชิงกลของอัลจิเนตไฮโดรเจลคอมโพสิต

จากการทดสอบแรงตัด พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตส่งผลให้ค่าความแน่นเนื้อ (ภาพที่ 2 A) และความเหนียว (ภาพที่ 2 B) ของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งในกลุ่มควบคุมและกลุ่มคอมโพสิต เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอัลจิเนตทำให้จำนวนตำแหน่งที่สามารถเกิดการเชื่อมข้ามโครงสร้างกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงข่ายเจลมีความหนาแน่นและแข็งแรงมากขึ้น (Hu และคณะ, 2021) อย่างไรก็ตาม ที่ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต 0.5% ตัวอย่างควบคุมไม่สามารถวัดค่าแรงตัดได้ เนื่องจากโครงข่ายเจลมีลักษณะอ่อนนุ่มและไม่สามารถคงรูปได้ สะท้อนให้เห็นว่าความเข้มข้นของอัลจิเนตในระดับต่ำยังไม่เพียงพอต่อการสร้างโครงข่ายเจลที่แข็งแรงและต่อเนื่อง ตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมเส้นใยุ่นมะพร้าวมีแนวโน้มให้ค่าความแน่นเนื้อและความเหนียวสูงกว่ากลุ่มคอมโพสิต โดยเฉพาะที่ระดับความเข้มข้นอัลจิเนตสูง เนื่องจากการเติมเส้นใยุ่นมะพร้าวอาจรบกวนความต่อเนื่องของโครงข่ายอัลจิเนต อีกทั้งฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผสมยังทำหน้าที่เป็นจุดบกพร่องภายในโครงสร้าง ส่งผลให้เจลมีความสามารถในการทนต่อแรงกระทำลดลง

เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มคอมโพสิต พบว่า ตัวอย่างที่ใช้เส้นใยุ่นมะพร้าวผ่านการแช่ต่างมีค่าความแน่นเนื้อและความเหนียวสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ผ่านการแช่ต่างในทุกระดับความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต โดยค่าความแน่นเนื้อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของอัลจิเนตจาก 0.5 เป็น 2.0% เช่นเดียวกับค่าความเหนียวที่เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของโครงข่ายเจล โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นโซเดียมอัลจิเนต 1.5 และ 2.0% ตัวอย่างที่ใช้เส้นใยุ่นมะพร้าวผ่านการแช่ต่างให้ค่าความแน่นเนื้อสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ผ่านการแช่ต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และในทำนองเดียวกัน ค่าความเหนียวของตัวอย่างที่ผ่านการแช่ต่างก็มีค่าสูงกว่าอย่างชัดเจน โดยค่าความเหนียวสูงสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 1,304 gf·mm ในตัวอย่างที่ใช้อัลจิเนต 2.0% ผลดังกล่าวอาจเกิดจากการแช่ต่างช่วยกำจัดสิ่งเจือปนและสารอินทรีย์บนพื้นผิวเส้นใย ส่งผลให้พื้นผิวเส้นใยสะอาดและสามารถ



ยึดเกาะกับโครงข่ายอัลจินต์ได้ดีขึ้น นอกจากนี้การลดสิ่งเจือปนบนพื้นผิวยังอาจช่วยลดเสถียรภาพของฟองอากาศภายในระบบ ทำให้เกิดโครงสร้างเจลที่มีความสม่ำเสมอมากขึ้น ส่งผลให้ไฮโดรเจลคอมโพสิตสามารถต้านทานแรงกระทำและดูดซับพลังงานก่อนการแตกหักได้ดีขึ้น

จากผลการศึกษาี้แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจินต์ การแช่ต่างเส้นใย และระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้าง ล้วนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของอัลจินต์ไฮโดรเจลคอมโพสิต โดยสภาวะที่เหมาะสมสามารถช่วยลดข้อบกพร่องภายในโครงสร้างและเพิ่มความแข็งแรงของไฮโดรเจลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สรุป

การเพิ่มระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้างจาก 0.5 ชั่วโมง เป็น 20 ชั่วโมง ช่วยลดการกักเก็บฟองอากาศภายในอัลจินต์ไฮโดรเจลได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่งผลให้โครงสร้างไฮโดรเจลมีความสม่ำเสมอมากขึ้น การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมอัลจินต์ช่วยเพิ่มค่าความแน่นเนื้อและความเหนียวของไฮโดรเจล ขณะที่การเติมเส้นใยวุ้นมะพร้าวทำให้ค่าทางกลลดลงเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม อย่างไรก็ตาม กลุ่มที่ใช้เส้นใยวุ้นมะพร้าวผ่านการแช่ต่างให้ค่าความแน่นเนื้อและความเหนียวสูงกว่ากลุ่มไม่ผ่านการแช่ต่าง โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นอัลจินต์ 1.5 และ 2.0% แสดงให้เห็นว่าการแช่ต่างช่วยลดสิ่งเจือปนส่งผลให้โครงสร้างไฮโดรเจลคอมโพสิตมีความแข็งแรงมากขึ้น ทั้งนี้ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการนำเศษวุ้นมะพร้าวจากอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัสดุปรับแต่งเนื้อสัมผัสในผลิตภัณฑ์อาหารได้ต่อไป



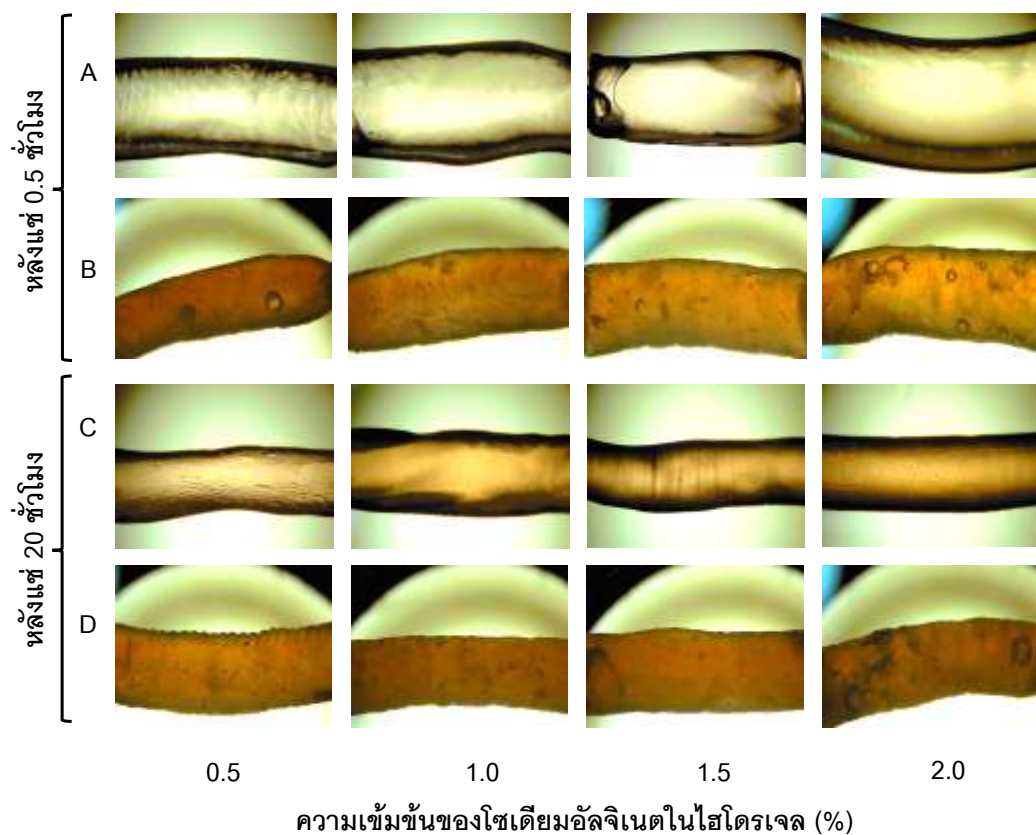
เอกสารอ้างอิง

- Chen, S.-Q., Meldrum, O. W., Liao, Q., Li, Z., Cao, X., Guo, L., Zhang, S., Zhu, J., & Li, L. (2021). The influence of alkaline treatment on the mechanical and structural properties of bacterial cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 271, 118431.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118431>
- Hu, C., Lu, W., Mata, A., Nishinari, K., & Fang, Y. (2021). Ions-induced gelation of alginate: Mechanisms and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 177, 578-588.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.086>
- Klinchongkon, K., Changpuen, P., & Khemmark, S. (2025). The effects of carboxymethyl cellulose impregnation on the texture and rehydration properties of nata de coco noodles. *Food Biophysics*, 20(3), 97. <https://doi.org/10.1007/s11483-025-09987-2>
- Torres, F. G., Arroyo, J. J., & Troncoso, O. P. (2019). Bacterial cellulose nanocomposites: An all-nano type of material. *Materials Science and Engineering C*, 98, 1277-1293. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.01.064>
- Zhang, Y., Li, Y., Luan, X., Meng, B., Liu, J., & Lu, Y. (2025). Effects of Void Characteristics on the Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Polyetheretherketone Composites: Micromechanical Modeling and Analysis. *Polymers*, 17(13), 1721.
<https://doi.org/10.3390/polym17131721>

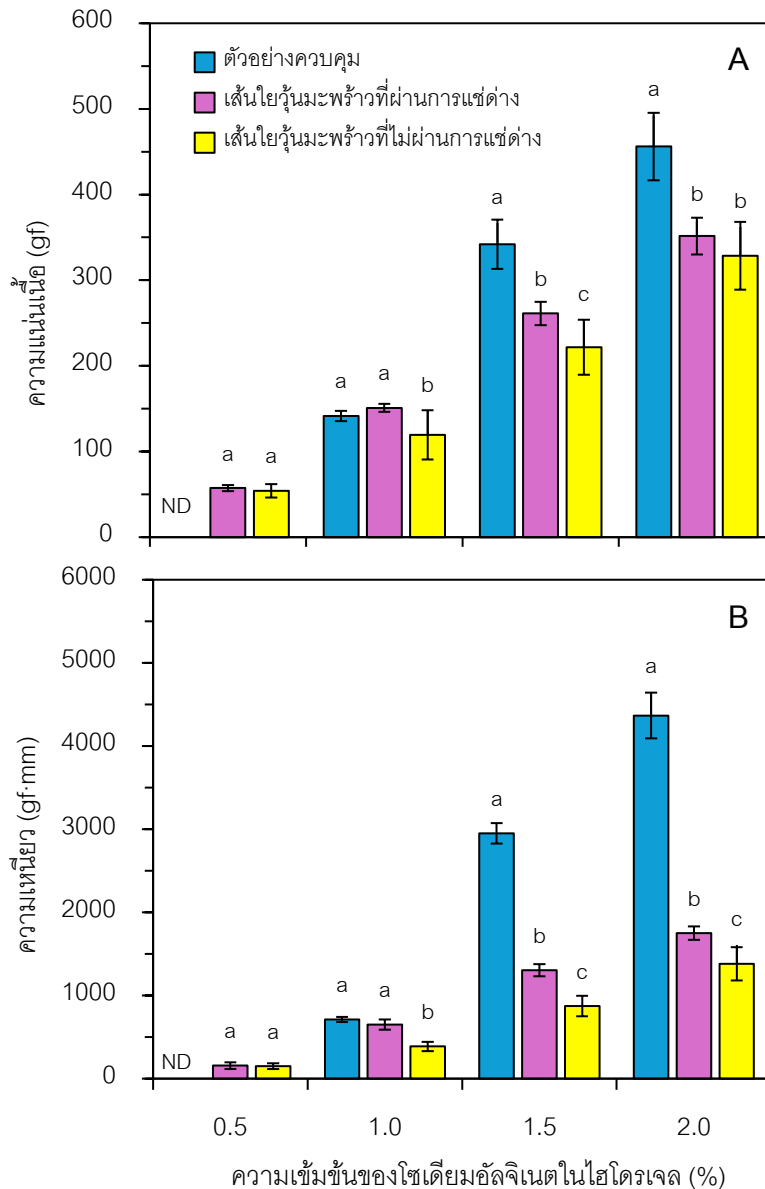
ตารางที่ 1 จำนวนฟองอากาศของไฮโดรเจลคอมโพสิตเสริมเส้นใยุ่นมะพร้าวที่ระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้าง 0.5 และ 20 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของ อัลจิเนตในไฮโดรเจล (%)	ระยะเวลาการเชื่อมข้ามโครงสร้างของไฮโดรเจลคอมโพสิตใน สารละลายก่อกำเนิด	
	0.5 ชั่วโมง	20 ชั่วโมง
0.5	2.5±2.3 ^{cd}	0.6±1.2 ^d
1.0	6.5±5.5 ^{bc}	2.3±1.9 ^{cd}
1.5	8.8±5.3 ^b	4.6±2.6 ^{bc}
2.0	31.4±7.4 ^a	9.4±8.6 ^b

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 1 การกระจายตัวของฟองอากาศในไฮโดรเจลกลุ่มควบคุม (แถว A, C) และกลุ่มคอมโพสิตที่เสริมเส้นใย
 วัณมะพร้าว (แถว B, D) ที่แช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตตเป็นเวลา 0.5 และ 20 ชั่วโมง (กำลังขยาย 500×)



ภาพที่ 2 ค่าความแน่นเนื้อ (firmness) (A) และความเหนียว (toughness) (B) ของอัลจินตไฮโดรเจล
 กลุ่มควบคุม และไฮโดรเจลคอมโพสิตที่เสริมเส้นใยวัณมะพร้าวผ่านการแช่ต่างและไม่ผ่านการแช่ต่างที่ระดับ
 ความเข้มข้นโซเดียมอัลจินตแตกต่างกัน โดยตัวอักษรที่แตกต่างกันเหนือแท่งกราฟแสดงความแตกต่างอย่างมี
 นัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ภายในกลุ่มความเข้มข้นเดียวกัน ส่วน ND หมายถึง ไม่สามารถตรวจวัดค่าได้



CONFERENCE PROCEEDING 2026

จัดโดย :
มหาวิทยาลัยศิลปากร