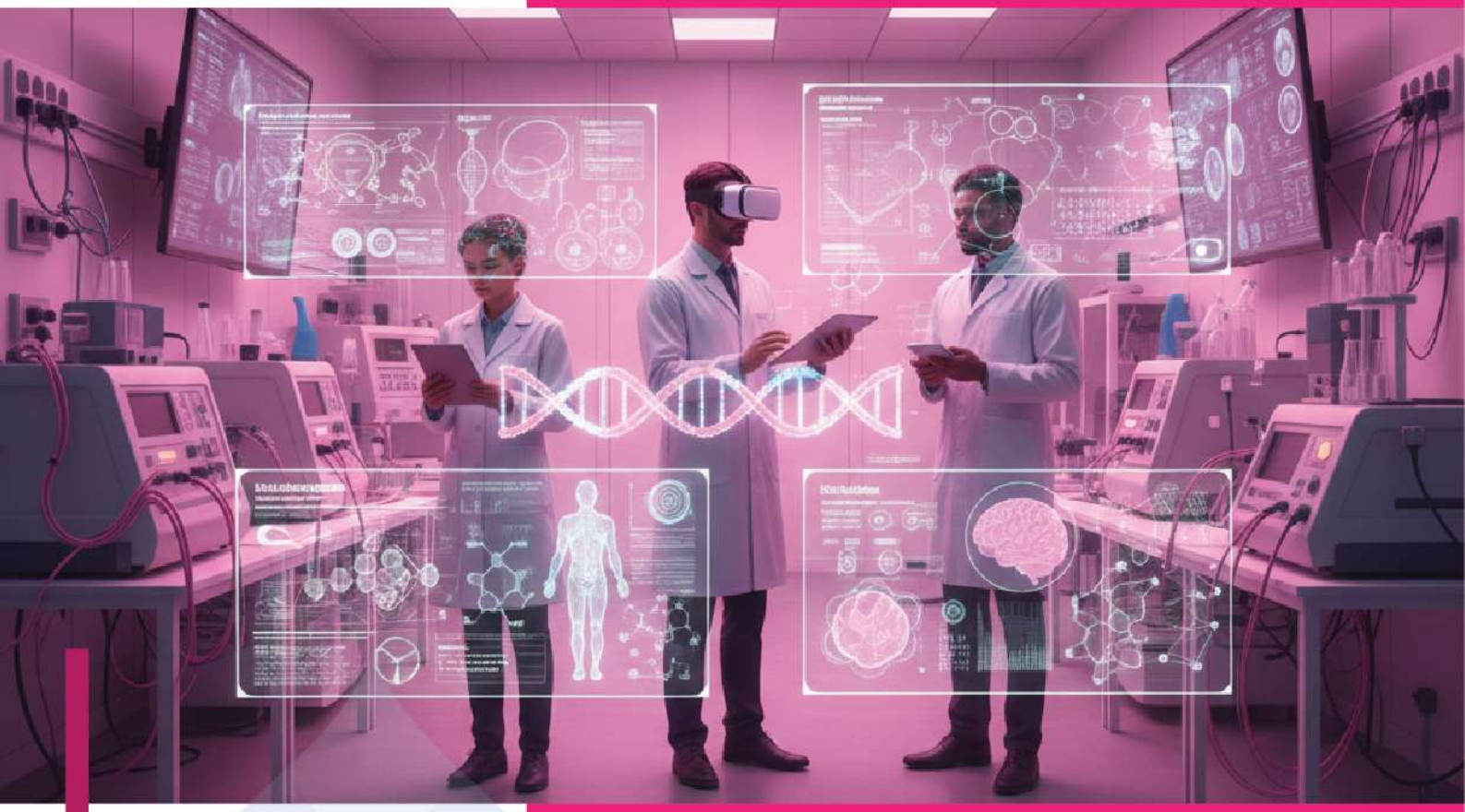
Kalasin University
Journal of Science Technology and Innovation

KALASIN UNIVERSITY

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Kalasin University Journal of Science Technology and Innovation



ISSN : 2821-9406 (Online)

ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 (มกราคม - มิถุนายน 2569)
Vol.5 No.1 (Jan - Jun 2026)

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Kalasin University Journal of Science Technology and Innovation

ข้อมูลเกี่ยวกับวารสาร

ประเภทของบทความ:

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ เป็นวารสารที่เผยแพร่ผลงานทางวิชาการซึ่งตีพิมพ์รูปแบบวารสารอิเล็กทรอนิกส์ โดยรับตีพิมพ์บทความคุณภาพสูงทั้งบทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ บทความวิจัย และ บทความวิชาการ

กำหนดการเผยแพร่:

ปีละ 2 ฉบับ

ฉบับที่ 1 (มกราคม - มิถุนายน)

ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม)

ISSN: 2821-9406 (Online)

ขอบเขตของวารสาร:

ขอบเขตเนื้อหาของผลงานวิชาการที่จะได้รับการพิจารณาตีพิมพ์เป็นบทความวิจัยและบทความทางวิชาการ 4 สาขา ได้แก่

1. วิทยาศาสตร์กายภาพ (Physical Science) ได้แก่ เคมี ฟิสิกส์ คณิตศาสตร์ สถิติ และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

2. วิทยาศาสตร์ชีวภาพ (Biological Science) ได้แก่ ชีววิทยา สัตววิทยา พฤกษศาสตร์ พันธุศาสตร์ เกษตรศาสตร์ อุตสาหกรรมเกษตร เทคโนโลยีชีวภาพ และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

3. วิทยาศาสตร์สุขภาพ (Health Science) ได้แก่ สาธารณสุขศาสตร์ อนามัยสิ่งแวดล้อม สุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม วิทยาศาสตร์การกีฬา อาชีวอนามัยและความปลอดภัย โภชนาการ และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

4. วิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Engineering and Architecture) ได้แก่ วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมชลประทาน วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ การผังเมือง สถาปัตยกรรมศาสตร์ และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการตีพิมพ์บทความ:

บทความที่จะได้รับการพิจารณาตีพิมพ์จะต้องผ่านกระบวนการพิจารณาจากกองบรรณาธิการและผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง (Peer Review) ดังนี้

1. เมื่อกองบรรณาธิการได้รับบทความเข้าสู่ระบบแล้ว ทำการตอบรับบทความเข้าสู่ระบบวารสารออนไลน์ผ่านทางกระดานสนทนาของระบบ ThaiJO หรือช่องทางอื่น

2. กองบรรณาธิการจะตรวจสอบบทความเบื้องต้น ว่าอยู่ในขอบเขตเนื้อหาวารสาร และตรวจความซ้ำซ้อนของบทความ ตรวจรูปแบบของบทความให้เป็นไปตามที่วารสารกำหนด

3. ในกรณีที่กองบรรณาธิการพิจารณาเห็นควรรับบทความไว้พิจารณาตีพิมพ์ กองบรรณาธิการจะดำเนินการส่งบทความเพื่อกลั่นกรองต่อไป โดยจะส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง อย่างน้อย 3 คน ซึ่งมาจากต่างสถาบัน ประเมินคุณภาพของบทความว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมจะลงตีพิมพ์หรือไม่ ซึ่งกระบวนการกลั่นกรองนี้ทั้งผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เขียนจะไม่ทราบข้อมูลซึ่งกันและกัน (Double-blind peer review)

4. เมื่อผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความแล้ว กองบรรณาธิการจะตัดสินใจโดยอิงตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ บทความนั้น ๆ ดังนี้

1) รับตีพิมพ์โดยไม่มีการแก้ไข

2) รับตีพิมพ์โดยมีการแก้ไข และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินอีกครั้ง

3) รับตีพิมพ์โดยมีการแก้ไข และส่งให้บรรณาธิการพิจารณา

4) ปฏิเสธการตีพิมพ์

วารสารจะแจ้งผลการพิจารณาของผู้ทรงคุณวุฒิให้ผู้เขียนรับทราบโดยเร็ว เมื่อผู้นิพนธ์ได้รับผลการพิจารณา ให้ถือว่าผลการพิจารณาของผู้ทรงคุณวุฒิดังกล่าวถือเป็นที่สิ้นสุด

5. กรณีบทความเข้าสู่กระบวนการพิจารณาคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว ไม่สามารถถอนบทความได้หรือส่งบทความไปตีพิมพ์ที่วารสารอื่นได้

ที่ปรึกษา:

รองศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณ สุดสนธิ์	อธิการบดีมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
รองศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์ลิขิต แก้วหานาม	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา บุไธสง	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

บรรณาธิการ:

รองศาสตราจารย์ ดร.เกยูร ดวงอุปมา	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยบรรณาธิการ:

รองศาสตราจารย์ ดร.คคนางค์ รัตนานิคม	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนัชพงษ์ วังคำหาญ	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

กองบรรณาธิการ:

ศาสตราจารย์ ดร.อลงกลด แทนออมทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์ เชิดทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สุทธิบาก	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ ชมนาวัง	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ว่าที่ร้อยเอก ดร.คงเดช พะสีนาม	มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พจนา สีขาว	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชาภรณ์ วันโย	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑามาศ เจียมสาธิต	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ฑีฆะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาจ เภสัชชา	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลักษณา ดูบาส	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพจน์พัทธ์ เมืองโคตร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.รณกร สร้อยนาค	มหาวิทยาลัยพะเยา
อาจารย์ ดร.เกศวรา สิทธิโชค	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (กำแพงแสน)
อาจารย์ ดร.แก้วตา สูตรสุวรรณ	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ทรงคุณวุฒิประจำวารสาร

รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐดนย์ พรรณุเจริญวงษ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ ส่งเสริม	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.พรรณี บัญชรหัตถกิจ	มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต มานะธุระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
รองศาสตราจารย์ ดร.รัตนจิรา รัตนประเสริฐ	มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เกยูร ดวงอุปมา	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ภัทราวดี มากมี	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย พิมหา	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนกันต์ จิตมนัส	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรินทร์ ตรีอินทอง	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา สิงห์ทองชัย	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนูญ ปัญญาทิพย์	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัยณรงค์ ทรงคาศรี	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทรียา พลซา	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พลากร สืบสำราญ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพจน์พัทธ์ เมืองโคตร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรนันท์ รัตสีวอ	มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตตะวัน กุโบลา	มหาวิทยาลัยราชศรีสะเกษ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พราวมาส เจริญรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย หาระโคตร	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิจักขณ์ อรุณลักษณ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิศิษฎ์ ทองคำ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทกานต์ นุชสุข	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรดิตถ์ โพธิตันติมงคล	มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนภร สิริตระกูลศักดิ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยภูมิ สุขสำราญ	มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย เหลาหา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัฒน์ ศุภโกศล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไวรุจน์ อิ่มโพ	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลการ ทรงศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อัจฉรา สุมังเกษตร	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กัมปนาท ไชยเพชร	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
อาจารย์ ดร.สุไพลิน พิชัย	มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย
อาจารย์ ดร.กฤษฎางค์ เสนาวงษ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
อาจารย์ ดร.บุญสิริ ปิตตาแสง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อาจารย์ ดร.กาญจนา จรัญศิริไพศาล	โรงเรียนชุมแพศึกษา

อาจารย์ ดร.ทอรุ้ง ประนิล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ดร.อนันต์ พิริยะภัทรกิจ	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี แห่งประเทศไทย (วว.)
ดร.ภญ.วริศรา เจียมสาธิต	วิทยาลัยการสาธารณสุขสิรินธร จังหวัดขอนแก่น
ดร.อติชาติ โรจนกร	บริษัท นูออโว พลัส จำกัด
นางสาววรรณวิมล ทุมมี	โรงพยาบาลกาฬสินธุ์

พิสูจน์อักษรภาษาอังกฤษ:

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศาตรา สหัสทัศน์	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
Mr.Jonathan Wary	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ออกแบบปกวารสาร:

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพนธ์ เนียมสา	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ประสานงาน:

นางสาวนภัทรธิดา พรมดีราช	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

สถานที่ติดต่อ:
สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
62/1 ถ.เกษตรสมบูรณ์ ต.กาฬสินธุ์ อ.เมืองกาฬสินธุ์ จ.กาฬสินธุ์ 46000 โทรศัพท์ 0 4381 1128 ต่อ 6120

บทบรรณาธิการ

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ได้รวบรวมบทความเพื่อตีพิมพ์สำหรับปีที่ 5 ฉบับที่ 1 จำนวน 15 บทความ ดังนี้ 1) ระดับความร้อนของการทำงานในอู่ซ่อมรถยนต์เขตเทศบาลอำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์ ผู้นิพนธ์ อนุรักษ์ ปิ่นทอง และ ชัยรัตน์ ศรีบุญจันทร์ 2) ผลของอัตราส่วนเนื้อปลาสวายและปลานิลต่อคุณภาพลูกชิ้นปลา ผู้นิพนธ์ จักรินทร์ ตรีอินทอง และ ปิยะฉัตร วิริยะอำไพวงศ์ 3) Antimicrobial activity of mulberry (Morus alba) leave extract against foodborne pathogens in fermented fish (Pla-som) ผู้นิพนธ์ Nittaya Saengprajak, Patcharaporn Tippayawat, Kantima Sirisantimethakom and Ratthaphol KraiKlang 4) การพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูสติ้งเพื่อจำแนกโรคเบาหวาน ขึ้นจอประสาทตาโดยใช้คุณสมบัติซีมเล็ตเวฟเลตส์ ผู้นิพนธ์ ชัชวาลย์ ศรีมนตรี และ ธนรัฐ โชติพันธ์ 5) การศึกษาพฤติกรรมและจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน ผู้นิพนธ์ ณัฐวิภา พันธุ์สะอาด, เชิดพงษ์ เชี่ยวชาญวัฒนา และ จักรมาส เลาหวณิช 6) แอปพลิเคชันการจับคู่ในกราฟถ่วงน้ำหนักสำหรับปัญหาการจัดสรรงาน ผู้นิพนธ์ โรจนี ขุมมงคล, จินตหรา จารัตน์, ดำรงค์ ถาวร, นฤมล แย้มอาสา และ วัชรินทร รักษาศักดิ์ชัย 7) ผลของการพัฒนารูปแบบการฟื้นฟูสมรรถภาพต่อเนื่องในผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมอง อำเภอวานรนิวาส จังหวัดสกลนคร ผู้นิพนธ์ พิชชาพร พลทะสอน 8) นวัตกรรมระบบบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษาด้วยเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ ผู้นิพนธ์ ศุภชัย ใบปอด, จักรพันธ์ ศรีวงษา, ทินกร คุณาสิทธิ์, เอกรินทร์ ศรีลาพัฒน์, พวงผกา คุณาสิทธิ์ และ สิริวิวัฒน์ ละตา 9) การพัฒนาเครื่องมือประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรง สำหรับประชาชนในพื้นที่อำเภอนามน จังหวัดกาฬสินธุ์ ผู้นิพนธ์ กฤษฎา วรรณจักร 10) การประเมินสมรรถนะระบบอบแห้งวัตถุดิบผลิตเครื่องดนตรีอีสานด้วยพลังงานความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ กรณีศึกษา บ้านท่าเรือ อำเภอนาหว้า จังหวัดนครพนม ผู้นิพนธ์ อาทิตย์ ศิริสวัสดิ์ และ เอนก นรสาร 11) ผลของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยียกระถาง ผู้นิพนธ์ สิงหนาถ โถทอง และ เอกรินทร์ สารีพัว 12) อิทธิพลของสายพันธุ์และพื้นที่ปลูกต่อผลผลิตและสมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลัง ผู้นิพนธ์ สิทธิชัย ไชยลังกา และ เอกรินทร์ สารีพัว 13) ความรอบรู้ด้านดิจิทัลและองค์กรแห่งการเรียนรู้ที่มีผลต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี 14) นรากร สารีแหล้ และ จิระพรรณ สุปัญญา 14) Design and Development of a Batter Mixing Machine for Khanom La to Preserve Local Wisdom and Enhance Community Sustainability ผู้นิพนธ์ Choemsak Chuaidon, Natthaphong Nakkhwan, Thanatpon Rodphunchoo, Pongpun Ratchapakdee, Sermsak Kerdwan, Sutaporn Getpun, Rungrote Jeendoung and Banthita Poosabmee Ponatong 15) ผลของการเปลี่ยนแปลงความเค็มในการเลี้ยงปลากะพงขาว (Lates calcarifer) ต่อการเจริญเติบโต คุณค่าทางโภชนาการ และคุณภาพเนื้อ ผู้นิพนธ์ จรรยพร อินทะสะระ, นัทท์ นันทพงศ์ และ พรพิมล เชื้อดวงผุย

บทความในฉบับนี้มาจากนักวิจัยและนักวิชาการที่มีความหลากหลายสังกัด โดยทุกบทความทั้งหมดได้ผ่านการกลั่นกรองและพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Reviewers) จำนวน 3 คน ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญที่มาจากหลากหลายหน่วยงานเป็นผู้พิจารณาเพื่อความสมบูรณ์ของบทความ และแจ้งให้ผู้นิพนธ์นำบทความไปปรับปรุงแก้ไขให้เป็นการเรียบร้อยก่อนเข้าสู่กระบวนการตีพิมพ์เผยแพร่ของวารสาร

ในโอกาสนี้ ขอขอบคุณคณาจารย์ นักวิชาการ นักศึกษา และผู้สนใจทุกท่านที่ให้ความสนใจร่วมส่งบทความเผยแพร่ในวารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ และขอขอบคุณกองบรรณาธิการ คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประเมินและตรวจสอบบทความทุกท่านมา ณ โอกาสนี้



(รองศาสตราจารย์ ดร.เกยูร ดวงอุปมา)
บรรณาธิการ

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 (มกราคม - มิถุนายน 2569)

ข้อมูลเกี่ยวกับวารสาร ก

กองบรรณาธิการ ค

บทบรรณาธิการ จ

บทความ

ระดับความร้อนของการทำงานในอู่ซ่อมรถยนต์เขตเทศบาลอำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์ 1-16

อนุรักษ์ ปิ่นทอง

ชัยรัตน์ ศรีบุญจันทร์

ผลของอัตราส่วนเนื้อปลาสวายและปลานิลต่อคุณภาพลูกชิ้นปลา 17-32

จักรินทร์ ตรีอินทอง

ปิยะฉัตร วิริยะอำไพวงศ์

Antimicrobial activity of mulberry (Morus alba) leave extract against foodborne pathogens in fermented fish (Pla-som) 33-43

Nittaya Saengprajak

Patcharaporn Tippayawat

Kantima Sirisantimethakom

Ratthaphol KraiKlang

การพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูสติ้งเพื่อจำแนกโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาโดยใช้คุณสมบัติซีมเล็ตเวฟเลตส์ 44-60

ชัชวาลย์ ศรีมนตรี

ธนรัฐ โชติพันธ์

การศึกษาพฤติกรรมและจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน 61-78

ณัฐวิภา พันธุ์สะอาด

เชิดพงษ์ เชี่ยวชาญวัฒนา

จักรมาส เลาหวณิช

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 (มกราคม - มิถุนายน 2569)

แอปพลิเคชันการจับคู่ในกราฟถ่วงน้ำหนักสำหรับปัญหาการจัดสรรงาน 79-100

โรจนี ขุมมงคล
จินตหรา จารัตน์
ดำรงค์ ถาวร
นฤมล แย้มอาสา
วัชรินทร รักษาศักดิ์ชัย

ผลของการพัฒนารูปแบบการฟื้นฟูสมรรถภาพต่อเนื่องในผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมอง อำเภอวานรนิวาส จังหวัดสกลนคร 101-113

พิชชาพร พลทะสอน

นวัตกรรมระบบบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษาด้วยเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ 114-129

ศุภชัย ใบปอด
จักรพันธ์ ศรีวงษา
ทินกร คุณาสิทธิ์
เอกรินทร์ ศรีลาพัฒน์
พวงผกา คุณาสิทธิ์
สิริวิวัฒน์ ละตา

การพัฒนาเครื่องมือประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรงสำหรับประชาชนในพื้นที่อำเภอนามน จังหวัดกาฬสินธุ์ 130-144

กฤษฎา วรรณจักร

การประเมินสมรรถนะระบบอบแห้งวัตถุดิบผลิตเครื่องดนตรีอีสานด้วยพลังงานความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ กรณีศึกษา บ้านท่าเรือ อำเภอนาหว้า จังหวัดนครพนม 145-164

อาทิตย์ ศิริสวัสดิ์
เอนก นรสาร

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 (มกราคม - มิถุนายน 2569)

ผลของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยียกระถาง 165-177

สิงหนาถ โถทอง

เอกรินทร์ สารีพัว

อิทธิพลของสายพันธุ์และพื้นที่ปลูกต่อผลผลิตและสมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลัง 177-191

สิทธิชัย ไชยลังกา

เอกรินทร์ สารีพัว

ความรอบรู้ด้านดิจิทัลและองค์กรแห่งการเรียนรู้ที่มีผลต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี 192-207

นรากร สารีแหล้

จิระพรรณ สุปัญญา

Design and Development of a Batter Mixing Machine for Khanom La to Preserve Local Wisdom and Enhance Community Sustainability 208-218

Choemsak Chuaidon

Natthaphong Nakkhwan

Thanatpon Rodphunchoo

Pongpun Ratchapakdee

Sermsak Kerdwan

Sutaporn Getpun

Rungrote Jeendoung

Banthita Poosabmee Ponatong

ผลของการเปลี่ยนแปลงความเค็มในการเลี้ยงปลากะพงขาว (Lates calcarifer) ต่อการเจริญเติบโต คุณค่าทางโภชนาการ และคุณภาพเนื้อ 219-234

จรรยพร อินทะสะระ

นัทท์ นันทพงศ์

พรพิมล เชื้อดวงผุย

บทความวิจัย (Research Article)

ระดับความร้อนของการทำงานในอู่ซ่อมรถยนต์เขตเทศบาลอำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์

Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) of Work in The Car Garage, Somdet Municipality, Kalasin Province

อนุรักษ์ ปิ่นทอง[1] และ ชัยรัตน์ ศรีบุญจันทร์[1*]
Anurak Pintong[1] and Chairat Sriboonjan[1*]
[1]*คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ มหาวิทยาลัยกาสินธุ์*
[1]*Faculty of Science and Health Technology, Kalasin University*
[*]Corresponding author; email: Chairat.sriboonjan@gmail.com

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
26 พฤศจิกายน 2568	14 มกราคม 2569	17 มกราคม 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงพรรณนาแบบภาคตัดขวาง มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดและประเมินระดับความร้อน ดัชนีความร้อนและภาระงานของการทำงานภายในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก โดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน เปรียบเทียบระดับความร้อนของการทำงานของอู่ซ่อมรถยนต์ทั้ง 2 แห่ง และผลกระทบของความร้อนของการทำงานต่อผู้ปฏิบัติงานงานภายในอู่ซ่อมรถยนต์ โดยใช้วิธีการตรวจวัดระดับความร้อนของการทำงานตามมาตรฐานของกฎกระทรวงในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่างและเสียง พ.ศ. 2559 ซึ่งทำการตรวจวัดในระหว่างช่วงตุลาคม - พฤศจิกายน พ.ศ. 2561 ผลการศึกษา พบว่า อู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็กมีค่าระดับความร้อนของการทำงาน เท่ากับ 28.68$\pm$0.70 และ 29.76$\pm$1.02 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และค่าดัชนีความร้อน เท่ากับ 34.68$\pm$1.08 และ 37.32$\pm$1.47 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ภาระงานของผู้ปฏิบัติงานในอู่ซ่อมรถยนต์ทั้ง 2 แห่ง พบว่า ผู้ปฏิบัติงานฝ่ายซ่อมบำรุงเครื่องยนต์และเปลี่ยนอะไหล่และฝ่ายเจียร์อะไหล่รถยนต์และประกอบมีภาระงานปานกลาง และผู้ปฏิบัติงานฝ่ายเคาะและทุบอะไหล่ส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์มีภาระงานหนัก ซึ่งผู้ปฏิบัติงานของทุกฝ่ายของอู่ซ่อมรถยนต์ทั้ง 2 แห่ง ได้รับความร้อนของการทำงานไม่เกินค่ามาตรฐาน การเปรียบเทียบระดับความร้อนของการทำงานอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็กมีค่าระดับความร้อนของการทำงานมากกว่าอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่ (p-value < 0.05) และระดับความร้อนจากการทำงานมีผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายและสภาพจิตใจต่อผู้ปฏิบัติงาน

คำสำคัญ : ระดับความร้อน, อู่ซ่อมรถยนต์, ภาระงาน

Abstract

This research was a cross – sectional study. The objectives were to measure and assess the wet bulb globe temperature (WBGT), heat index and workload in car garages by comparing them with standards, to compare WBGT between large and small car garages, and to study the effects of heat stress in the workplace on employees in car garages. Heat stress in the workplace was measured using a WBGT meter, with measurement methods in accordance with the standards of the management of occupational safety, health, and working environment concerning heat, lighting, and sound (B.E. 2559). The study was conducted during October to November 2018. The results showed that the large and small car garages had WBGT values of 28.68±0.70 °C and 29.76±1.02 °C respectively and heat index values of 34.68±1.08 °C and 37.32±1.47 °C respectively. The workload of employees in both car garage showed that the staff involved with engine maintenance and replacement of spare parts, car parts and assemblies had moderate workloads and the staff involved in knocking and breaking car parts had heavy workloads. The comparison of WBGT with the standard showed that the employees in all departments received WBGT levels not exceeding the standard. Comparison between garages showed that the small car garage had significantly higher WBGT than the large car garage (p-value < 0.05). Heat stress in the workplace affected both physical and psychological aspects of employees.

Keywords : Wet Bulb Globe Temperature (WBGT), Car Garage, Workloads

บทนำ

ความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ทั้งในชีวิตประจำวันและในการทำงาน โดยความร้อนเป็นอันตรายทางกายภาพที่สำคัญอย่างหนึ่งในสถานประกอบการและโรงงานอุตสาหกรรม ผู้ปฏิบัติงานต้องประสบปัญหาความร้อนจากอุณหภูมิของกระบวนการผลิตหรือการทำงานของเครื่องจักรกล การทำงานในสถานประกอบการและโรงงานอุตสาหกรรม ร่างกายจะได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนหรือแหล่งพลังงานความร้อน 2 แหล่ง คือ ความร้อนจากภายในร่างกาย โดยได้จากกระบวนการเผาผลาญสารอาหารในร่างกาย (Metabolism) และความร้อนจากภายนอกร่างกาย โดยได้รับความร้อนจากสิ่งแวดล้อม (Environmental Heat) เช่น จากสภาพการทำงาน กระบวนการทำงานจากเครื่องจักรกล ซึ่งความร้อนที่สามารถถ่ายเทระหว่างคนและสิ่งแวดล้อมในรูปของการนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) และการระเหย (Evaporation) [1, 2] ผลกระทบของความร้อนจากการทำงานที่มีต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน โดยร่างกายจะได้รับหรือสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมโดยการถ่ายเทความร้อนเพื่อให้เกิดสมดุลความร้อนในร่างกาย แต่ถ้าร่างกายยังคงมีความร้อนสะสมต่อเนื่อง ร่างกายตอบสนองเพื่อควบคุมอุณหภูมิแกนให้คงที่โดยการขับเหงื่อและเพิ่มอัตราการไหลเวียนเลือดมาที่ผิว อาจเป็นผลให้ร่างกายขาดน้ำ เสียสมดุลของเกลือแร่ หัวใจเต้นเร็วขึ้น การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยานี้จึงถูกใช้เป็นดัชนีความร้อน (Heat Index, HI) เป็นดัชนีที่คำนวณจากสมการถดถอยบนพื้นฐานของข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ สามารถประยุกต์ใช้ได้ดีกับสภาพอากาศของประเทศไทยที่มีค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 26 องศาเซลเซียส และ 39 เปอร์เซ็นต์ ดัชนีความร้อนรายปีทั่วทุกภาคของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในอัตรา 0.17 - 0.93 องศาเซลเซียสต่อทศวรรษ โดยที่ดัชนีความร้อนรายปีมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดในช่วงเดือนมีนาคมถึงเมษายน ในขณะที่ดัชนีความร้อนในภาพรวมของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ p-value น้อยกว่า 0.01 ในอัตรา 0.34 องศาเซลเซียสต่อทศวรรษ หรือ 1.50 องศาเซลเซียส

ในรอบ 44 ปีที่ผ่านมา [3] อาการแสดงหรือความเจ็บป่วยจากความร้อน ได้แก่ โรคลมแดด (Heat Stroke) ตะคริวเนื่องจากความร้อน (Heat Cramp) เหนื่อยล้าเนื่องจากความร้อน (Heat Exhaustion) การหมดสติชั่วคราว (Heat Syncope) ผดผื่นจากความร้อน (Heat Rash) การบวมน้ำจากความร้อน (Heat Edema) การชักเกร็งจากความร้อน (Heat Tetany) โรคลมร้อน (Heat Stroke) และอาจเป็นอันตรายถึงแก่ชีวิตได้ มักเกิดกับผู้ที่ปฏิบัติงานในพื้นที่ที่มีความร้อนและความชื้นสูง ทำให้ร่างกายไม่สามารถควบคุมความร้อนได้ [4, 5] ดังนั้นการประเมินระดับความร้อนในการทำงาน ตามประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง หลักเกณฑ์วิธีดำเนินการตรวจวัดและวิเคราะห์สภาวะการทำงานเกี่ยวกับระดับความร้อน แสงสว่างหรือเสียงภายในสถานประกอบกิจการ ระยะเวลา และประเภทกิจการที่ต้องดำเนินการ [6] กำหนดให้ใช้ “อุณหภูมิเวตบัลบโกลบ” (Wet Bulb Globe Temperature, WBGT) โดยได้นำปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความร้อนที่สะสมในร่างกายมาพิจารณา ได้แก่ ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในร่างกายขณะทำงานและความร้อนจากสิ่งแวดล้อมการทำงาน การประเมินระดับความร้อนในสถานประกอบกิจการที่ผู้ปฏิบัติงานมีการสัมผัสกับความร้อนในการทำงานจะดำเนินการอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง หรือกรณีที่มีการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงเครื่องจักรอุปกรณ์ กระบวนการผลิต วิธีการทำงานหรือการดำเนินการใด ๆ ที่อาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับความร้อน ให้ดำเนินการโดยตรวจวัดและวิเคราะห์สภาวะการทำบริเวณพื้นที่หรือบุคคลที่อาจได้รับผลกระทบภายใน 90 วันนับจากวันที่มีการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลง [7]

ตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 [8, 9] กำหนดให้อู่ซ่อมรถยนต์เป็นโรงงานลำดับ 95 คือ โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับยานที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์รถพ่วง จักรยานสามล้อ จักรยานสองล้อ หรือส่วนประกอบของยานดังกล่าวอย่างหนึ่งอย่างใด (1) การซ่อมแซมยานที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์หรือส่วนประกอบของยานดังกล่าวเป็นโรงงานจำพวกที่ 3 ที่ต้องขอใบอนุญาตประกอบกิจการ โดยมีเงื่อนไขสำคัญคือเครื่องจักรที่ใช้ต้องมีกำลังแรงม้าเกิน 50 แรงม้า หรือหากเครื่องจักรน้อยกว่า 50 แรงม้า แต่เป็นโรงงานที่ถูกประกาศกำหนดโดยรัฐมนตรี ถือว่าเป็นโรงงานประเภทที่ 3 ที่ต้องขอใบอนุญาตเช่นกัน ซึ่งกระทรวงสาธารณสุขได้กำหนดให้อู่ซ่อมรถยนต์เป็นกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ [10] สุณัฏฐา โน้ตสุภา และ อุไรวรรณ อินทร์ม่วง (2555) [11] ได้ศึกษาสภาพปัญหาด้านอนามัยสิ่งแวดล้อมของอู่ซ่อมรถยนต์ และอู่เคาะพ่นสีรถยนต์ในเขตเทศบาลเมืองสกลนคร พบว่า มีการดำเนินการไม่ได้มาตรฐานด้านอนามัยสิ่งแวดล้อม ร้อยละ 71.40 โดยมีการจัดการเรื่องอุณหภูมิหรือความร้อนภายในอู่ซ่อมรถยนต์ ร้อยละ 38.78 กิจกรรมในการทำงานของอู่ซ่อมรถยนต์ ได้แก่ การซ่อมแซมและบำรุงรักษารถยนต์ เช่น การเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง การซ่อมระบบเบรกและแอร์ การตรวจเช็ครถยนต์ครบวงจร การเจียร์ อะไหล่รถยนต์ การตัดและการเชื่อมโลหะ ประกอบอะไหล่ การเคาะและทุบอะไหล่ส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์ ทำให้เกิดความร้อนในการทำงานของเครื่องจักร หากผู้ปฏิบัติงานได้รับสัมผัสความร้อนจากเครื่องจักรหรือทำงานเป็นเวลานานอาจส่งผลต่อสุขภาพ

ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดและประเมินระดับความร้อน ดัชนีความร้อนและภาระงานของผู้ปฏิบัติงานภายในอู่ซ่อมรถยนต์ทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กโดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน เปรียบเทียบระดับความร้อนของการทำงานของอู่ซ่อมรถยนต์ทั้ง 2 แห่ง และผลกระทบของความร้อนของการทำงานต่อผู้ปฏิบัติงานงานภายในอู่ซ่อมรถยนต์ โดยผลการศึกษาสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงและป้องกันอันตรายจากความร้อนจากการทำงานแก่ผู้ปฏิบัติงานในอู่ซ่อมรถยนต์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อตรวจวัดและประเมินระดับความร้อน ดัชนีความร้อนและภาระงานของผู้ปฏิบัติงานภายในอู่ซ่อมรถยนต์ เขตเทศบาลอำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์

2. เพื่อเปรียบเทียบระดับความร้อนของการทำงานภายในอู่ซ่อมรถยนต์ เขตเทศบาลอำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์ กับค่ามาตรฐาน

3. เพื่อเปรียบเทียบระดับความร้อนของการทำงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก เขตเทศบาลอำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์

4. เพื่อศึกษาผลกระทบของความร้อนของการทำงานต่อผู้ปฏิบัติงานภายในอู่ซ่อมรถยนต์ เขตเทศบาลอำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงพรรณนาแบบภาคตัดขวาง (Cross – sectional study)

สถานที่ศึกษา

อู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็กในเขตเทศบาลอำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์

ระยะเวลา

ระยะเวลาการตรวจวัดระดับความร้อนของการทำงาน 2 ชั่วโมง ช่วงเวลา 13.00 – 15.00 น. จำนวน 12 ครั้ง (2 สัปดาห์ เวลาทำการ ตั้งแต่วันจันทร์ - วันเสาร์) โดยทำการตรวจวัดในช่วงเดือนตุลาคม ถึง พฤศจิกายน พ.ศ. 2561

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องวัดความร้อน WBGT รุ่น Quest Temp 36 ยี่ห้อ 3M ได้มาตรฐาน ISO7243

การดำเนินการวิจัย

1. การตรวจวัดระดับความร้อนเป็นไปตามประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง หลักเกณฑ์ วิธีการตรวจวัด และการวิเคราะห์สภาวะการทำงานเกี่ยวกับระดับความร้อน แสงสว่าง หรือเสียง รวมทั้งระยะเวลาและประเภทกิจการที่ต้องดำเนินการ [6, 12] โดยทำการตรวจวัด

1) อุณหภูมิกระเปาะเปียก

2) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง

3) อุณหภูมิโกลบ

4) ค่าระดับความร้อน (Wet Bulb Globe Temperature, WBGT) แบบภายในอาคาร

5) ความชื้นสัมพัทธ์

6) ความเร็วลม

กำหนดจุดตรวจวัด อู่ซ่อมรถยนต์ทั้ง 2 แห่ง ซึ่งเป็นอาคารพื้นที่โล่ง ทุกฝ่ายทำงานในพื้นที่เดียวกัน จำนวน 1 จุด

2. การประเมินภาระงานของผู้ปฏิบัติงานเป็นตามมาตรฐานกฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2559 [13, 14] ดังนี้

2.1 การประเมินภาระงานเป็นการหาอัตราการเผาผลาญอาหารเฉลี่ยในร่างกายของคนงานขณะทำงานในกิจกรรมต่าง ๆ จำนวน 2 ชั่วโมง โดยหาพลังงานที่ใช้ทำงานได้ดังนี้

1) ท่าทางการเคลื่อนไหวของร่างกาย

2) กิจกรรม/การปฏิบัติงาน

3) เมตาโบลิสม์พื้นฐานของร่างกาย

2.2 ประเภทภาระงานและมาตรฐานระดับความร้อน

1) งานเบา คือ ลักษณะงานที่ใช้แรงน้อยหรือใช้กำลังงานที่ทำให้เกิดการเผาผลาญอาหารในร่างกายไม่เกิน 200 กิโลแคลอรีต่อชั่วโมง โดยมาตรฐานระดับความร้อนไม่เกินค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 34 องศาเซลเซียส

2) งานปานกลาง คือ ลักษณะงานที่ใช้แรงปานกลางหรือใช้กำลังงานที่ทำให้เกิดการเผาผลาญอาหารในร่างกายเกิน 200 กิโลแคลอรีต่อชั่วโมง ถึง 350 กิโลแคลอรีต่อต่อชั่วโมง โดยมาตรฐานระดับความร้อนไม่เกินค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 32 องศาเซลเซียส

3) งานหนัก คือ ลักษณะงานที่ใช้แรงมากหรือใช้กำลังงานที่ทำให้เกิดการเผาผลาญอาหารในร่างกายเกิน 350 กิโลแคลอรีต่อชั่วโมง โดยมาตรฐานระดับความร้อนไม่เกินค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ 30 องศาเซลเซียส

2.3 การศึกษาภาระงานของผู้ปฏิบัติงานในอู่ซ่อมรถยนต์ทั้งหมด 3 ฝ่าย ได้แก่

1) ฝ่ายซ่อมบำรุงเครื่องยนต์และเปลี่ยนอะไหล่ (ER)

2) ฝ่ายเจียร์อะไหล่รถยนต์และประกอบอะไหล่ (CA)

3) ฝ่ายเคาะและทุบอะไหล่ส่วนต่างๆของรถยนต์ (KB)

3. สัมภาษณ์แบบเชิงลึกถึงผลกระทบของความร้อนต่อผู้ปฏิบัติงานในอู่ซ่อมรถยนต์ โดยใช้แบบสัมภาษณ์ลักษณะกึ่งโครงสร้างเกี่ยวกับผลกระทบความร้อนที่ส่งผลต่อผู้ปฏิบัติงาน แบบสัมภาษณ์ประกอบด้วย 3 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป

ตอนที่ 2 ผลกระทบของความร้อนต่อสุขภาพ

ตอนที่ 3 แนวทางป้องกันอันตรายจากความร้อน

โดยประชากรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ผู้ปฏิบัติงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่ จำนวน 3 คน และผู้ปฏิบัติงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็ก จำนวน 6 คน

การประมวลผล

1. ประมวลผลข้อมูลระดับความร้อนของการทำงานและภาระงานโดยใช้วิธีดำเนินการตามมาตรฐานกฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2559 [13, 14]

2. ประเมินค่าดัชนีความร้อน (Heat Index, HI) ใช้สมการของ Lans P. Rothfusz [15]

ค่าดัชนีความร้อน (HI) $= -42.379 + 2.04901523T + 10.14333127RH - 0.22475541TRH - 0.00683783T^2 - 0.05481717RH^2 + 0.00122874T^2RH + 0.00085282TRH^2 - 0.00000199T^2RH^2$

T = อุณหภูมิอากาศ (°F)

RH = ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

การประเมินและแปลผลค่าดัชนีความร้อนตามประกาศกรมอนามัยเรื่อง ค่าเฝ้าระวังผลกระทบต่อสุขภาพจากค่าดัชนีความร้อน (Heat Index) พ.ศ. 2567 [16]

สถิติที่ใช้ในการศึกษา

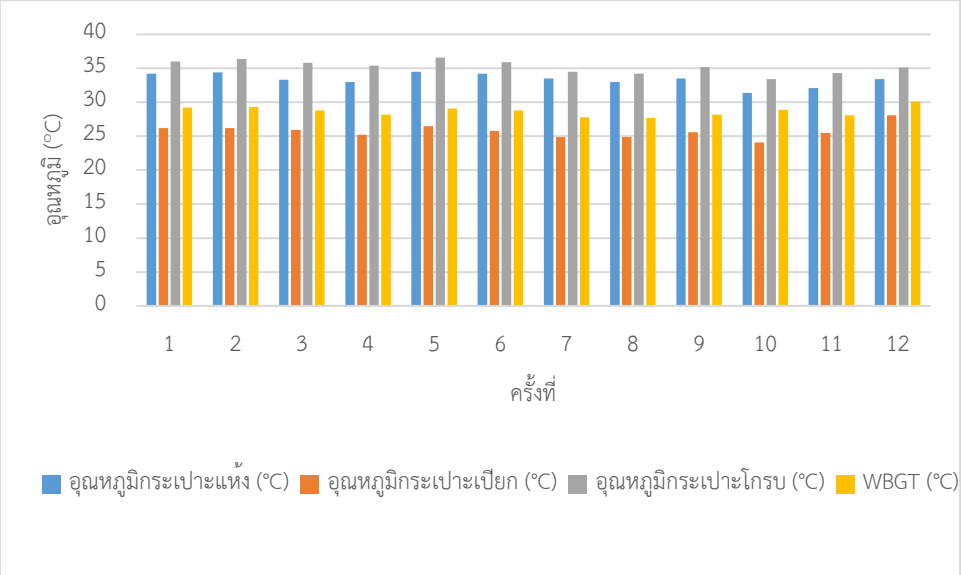
1. สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2. สถิติเชิงอนุมาน ได้แก่ Independent Samples t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการเปรียบเทียบค่าระดับความร้อนของการทำงานระหว่างอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

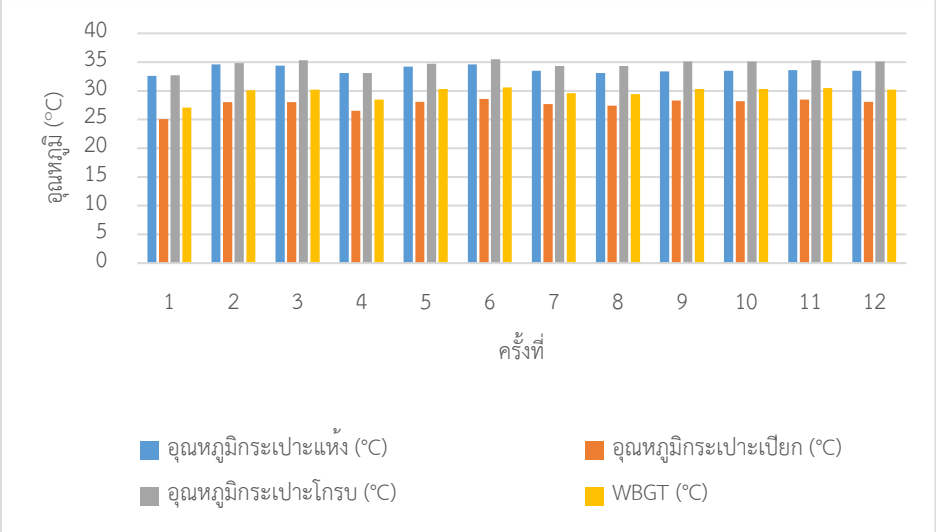
1. ระดับความร้อนของการทำงานในอู่ซ่อมรถยนต์

อู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่เป็นอาคารแบบปิดมีพื้นที่ที่ใช้ในการปฏิบัติงาน 525 ตารางเมตร มีความสูง 5 เมตร จำนวนช่องซ่อม 4 ช่อง มีเครื่องปั๊มลม จำนวน 2 เครื่อง เครื่องยกเครื่องยนต์ จำนวน 2 เครื่อง ขาตั้งซ่อมเครื่องยนต์ จำนวน 2 เครื่อง แท่นอัดไฮโดริก จำนวน 2 เครื่อง เครื่องถอดน็อต จำนวน 2 เครื่อง เครื่องเจียร์ จำนวน 2 เครื่อง และลิฟท์ยกรถยนต์ จำนวน 4 เครื่อง ซึ่งลักษณะงานที่ใช้เครื่องจักรและวัสดุอุปกรณ์ในการทำงานซ่อมแซมบำรุงรักษารถยนต์ ซึ่งทำให้เกิดความร้อนตลอดเวลาของการทำงาน ผลการศึกษา พบว่า อู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่มีอุณหภูมิกระเปาะแห้ง เท่ากับ 33.38±0.93 องศาเซลเซียส อุณหภูมิกระเปาะเปียก เท่ากับ 25.74±1.00 องศาเซลเซียส อุณหภูมิกระเปาะโกลบ เท่ากับ 35.23±0.98 องศาเซลเซียส ระดับความร้อนของการทำงาน เท่ากับ 28.68±0.70 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 1 กราฟแสดงระดับความร้อนของการทำงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่

อู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็กเป็นอาคารแบบกึ่งเปิด 1 ด้าน มีพื้นที่ที่ใช้ในการปฏิบัติงาน 200 ตารางเมตร มีความสูง 5 เมตร จำนวนช่องซ่อม 2 ช่อง มีเครื่องปั๊มลม จำนวน 1 เครื่อง เครื่องยกเครื่องยนต์ จำนวน 2 เครื่อง ขาตั้งซ่อมเครื่องยนต์ จำนวน 2 เครื่อง แท่นอัดไฮโดริก จำนวน 1 เครื่อง เครื่องถอดน็อต จำนวน 1 เครื่อง เครื่องเจียร์ จำนวน 1 เครื่อง และลิฟท์ยกรถยนต์ จำนวน 2 เครื่อง ซึ่งลักษณะงานที่ใช้เครื่องจักรและวัสดุอุปกรณ์ในการทำงานซ่อมแซมบำรุงรักษารถยนต์ ซึ่งทำให้เกิดความร้อนตลอดเวลาของการทำงาน ผลการศึกษา พบว่า อู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็กมีอุณหภูมิกระเปาะแห้ง เท่ากับ 33.67±0.63 องศาเซลเซียส อุณหภูมิกระเปาะเปียก เท่ากับ 27.71±0.99 องศาเซลเซียส อุณหภูมิกระเปาะโกลบ เท่ากับ 34.61±0.89 องศาเซลเซียส ระดับความร้อนของการทำงาน เท่ากับ 29.76±1.02 องศาเซลเซียส



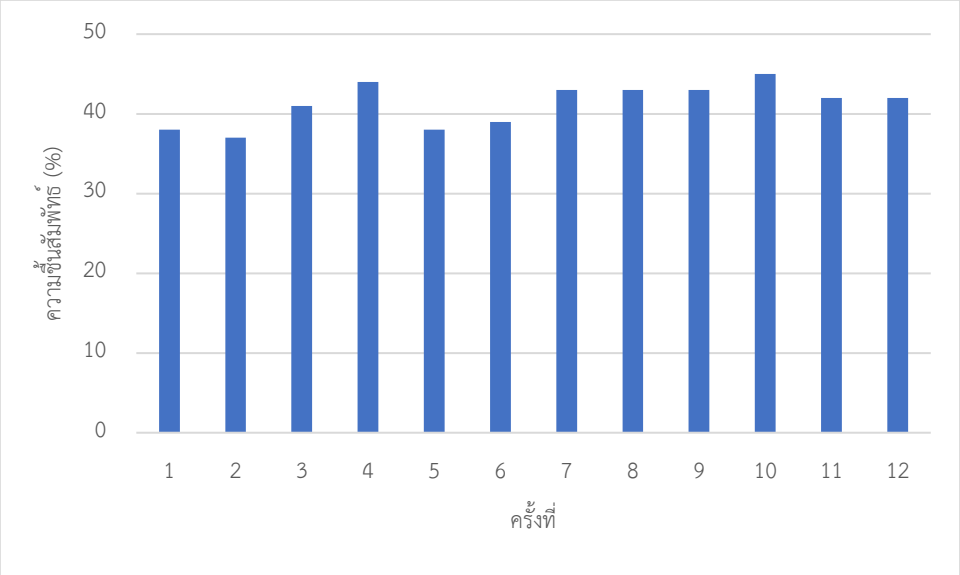
ภาพที่ 2 กราฟแสดงระดับความร้อนของการทำงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็ก

ความร้อนในอู่ซ่อมรถยนต์มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 27.70 - 30.60 °C [17] โดยลักษณะของความร้อนในการทำงานแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ความร้อนแห้งเป็นความร้อนที่หลุดจากอุปกรณ์ในกรรมวิธีการผลิตที่ร้อน ซึ่งมักจะอยู่รอบ ๆ บริเวณที่ทำงาน และความร้อนชื้นเป็นสภาพที่มีไอน้ำเพื่อเพิ่มความชื้นในอากาศ ซึ่งเกิดจากกรรมวิธีผลิตแบบเปียกแหล่งกำเนิดความร้อนในอุตสาหกรรมมักเกิดมาจากเตาหลอม เตาเผา เตาอบหม้อไอน้ำ และบางครั้งเกิดจากในขบวนการผลิตซึ่งมีผลต่อผู้ปฏิบัติงานหรือคนงานที่ต้องทำงานในบริเวณใกล้เคียง [2] สุณัฏฐา โน้ตสุภา และ อุไรวรรณ อินทร์ม่วง (2555) [11] ได้อธิบายถึงผู้ที่ปฏิบัติงานในอู่ซ่อมรถยนต์และอู่เคาะพ่นสีรถยนต์สามารถสัมผัสความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนของเครื่องจักรและการพาความร้อนของอุณหภูมิของอากาศ เมื่อผู้ปฏิบัติงานสัมผัสความร้อนจากเครื่องจักรหรือทำงานเป็นเวลานานอาจส่งผลต่อสุขภาพได้ ในการตรวจวัดระดับความร้อนที่มีผลต่อสุขภาพมีปัจจัยเกี่ยวข้องหลายอย่าง เช่น อัตราเมตาบอลิซึมในร่างกาย ระดับความร้อนในอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ซึ่งลมธรรมชาติสามารถช่วยในการระเหยของเหงื่อจึงช่วยในการลดอุณหภูมิของร่างกาย [18]

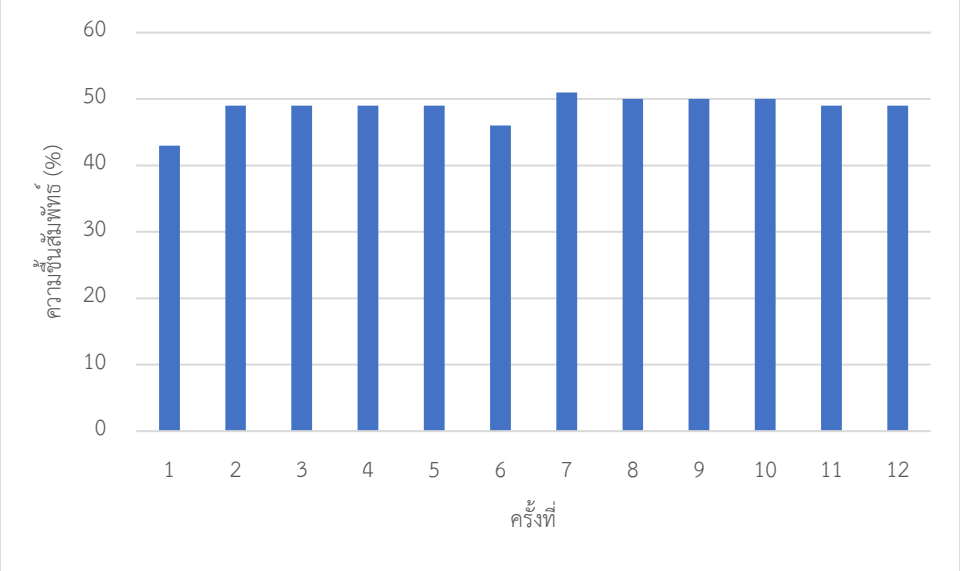
2. ค่าดัชนีความร้อนในอู่ซ่อมรถยนต์

ความชื้นสัมพัทธ์ในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก เท่ากับ 41.25$\pm$2.63 เปอร์เซ็นต์ และ 48.67$\pm$2.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเร็วลม เท่ากับ 0.97$\pm$0.43 เมตร/วินาที และ 0.72$\pm$0.17 เมตร/วินาที ตามลำดับ และค่าดัชนีความร้อน เท่ากับ 34.68$\pm$1.08 องศาเซลเซียส และ 37.32$\pm$1.47 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่า อยู่ในระดับเตือนภัยที่กำหนดค่าดัชนีความร้อน 33.00 – 41.90 องศาเซลเซียส ซึ่งผลกระทบของค่าดัชนีความร้อนในระดับเตือนภัย คือ เมื่อสัมผัสความร้อนเป็นเวลานาน อาจมีความเสี่ยงที่จะเป็นตะคริวจากความร้อน เกิดโรคเพลียแดดจากความร้อนได้และอาจส่งผลให้เกิดโรคลมร้อนหรือฮีทสโตรก [16] ซึ่งค่าดัชนีความร้อนในประเทศไทยมีการใช้ตัวแปรพื้นฐาน คือ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ [19] ในการคำนวณตามสมการของ Lans P. Rothfusz [15] โดยค่าเฝ้าระวังผลกระทบต่อสุขภาพจากค่าดัชนีความร้อนมี 4 ระดับ คือ ระดับเฝ้าระวัง (Caution) ระดับเตือนภัย (Extreme Caution) ระดับอันตราย (Danger) และระดับอันตรายมาก (Extreme danger) ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่าดัชนีความร้อน ได้แก่ 1) อุณหภูมิอากาศเป็นตัวแปรหลักของค่าดัชนีความร้อน ยิ่งอุณหภูมิอากาศสูงจะยิ่งรู้สึกร้อน 2) ความชื้นสัมพัทธ์ เพราะความชื้นสัมพัทธ์เกี่ยวข้องกับการระเหยของเหงื่อ

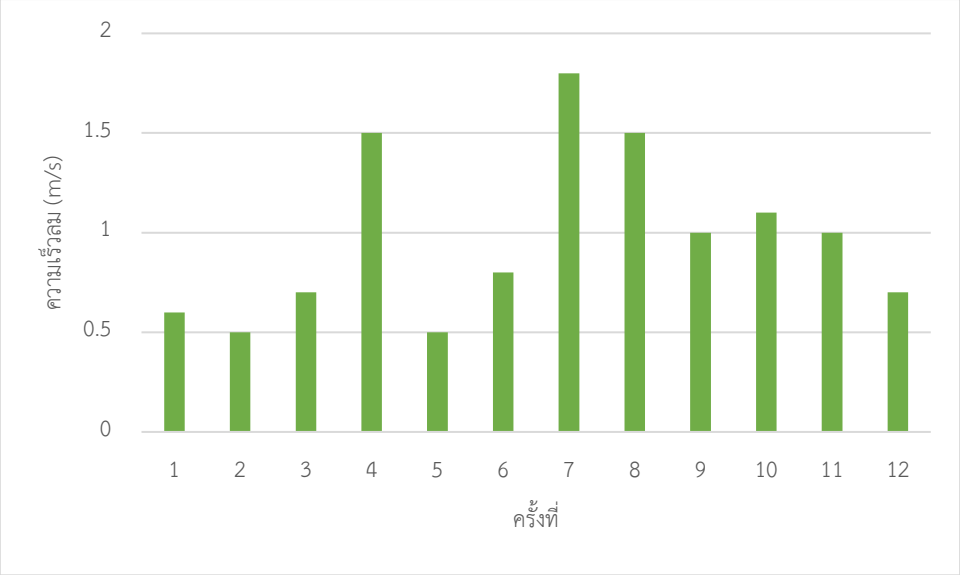
ความชื้นสัมพัทธ์สูงจะขัดขวางการระเหยของเหงื่อ ซึ่งเป็นกลไกหลักในการระบายความร้อนของร่างกาย และ 3) ความเร็วลม เพราะลมช่วยพัดพาเหงื่อให้ระเหยเร็วขึ้น ทำให้รู้สึกเย็นลงและช่วยลดผลกระทบของความชื้นสูงได้ [16, 19]



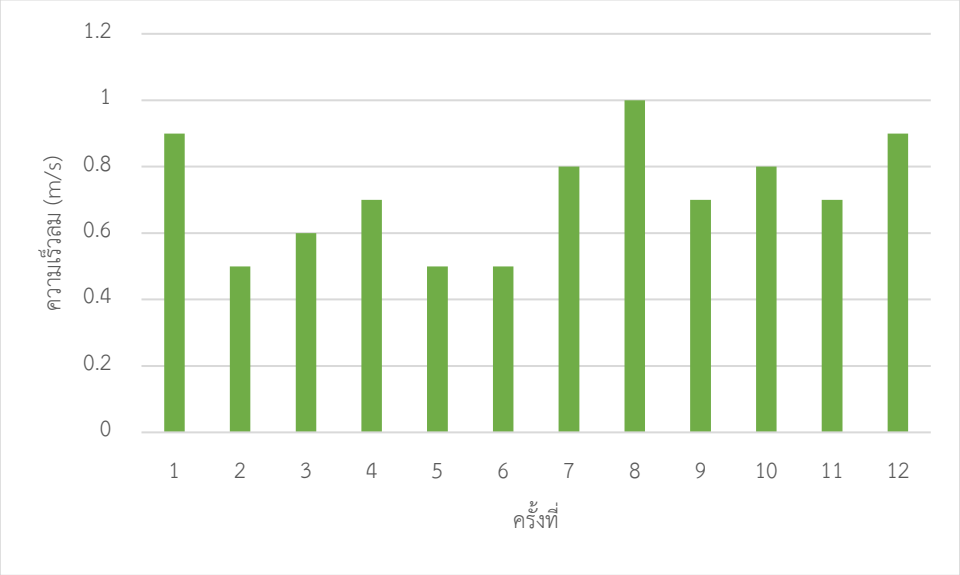
ภาพที่ 3 กราฟแสดงความชื้นสัมพัทธ์ของการทำงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่



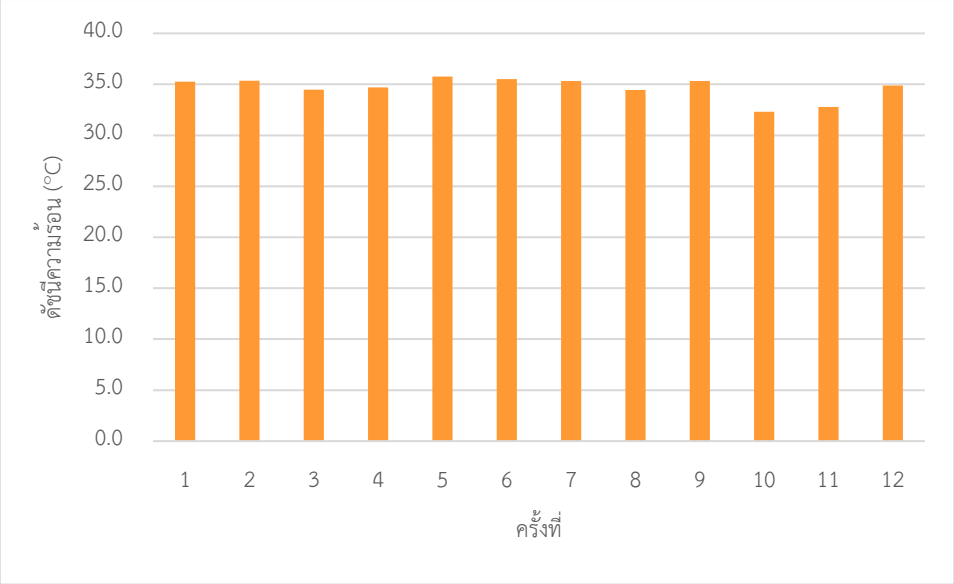
ภาพที่ 4 กราฟแสดงความชื้นสัมพัทธ์ของการทำงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็ก



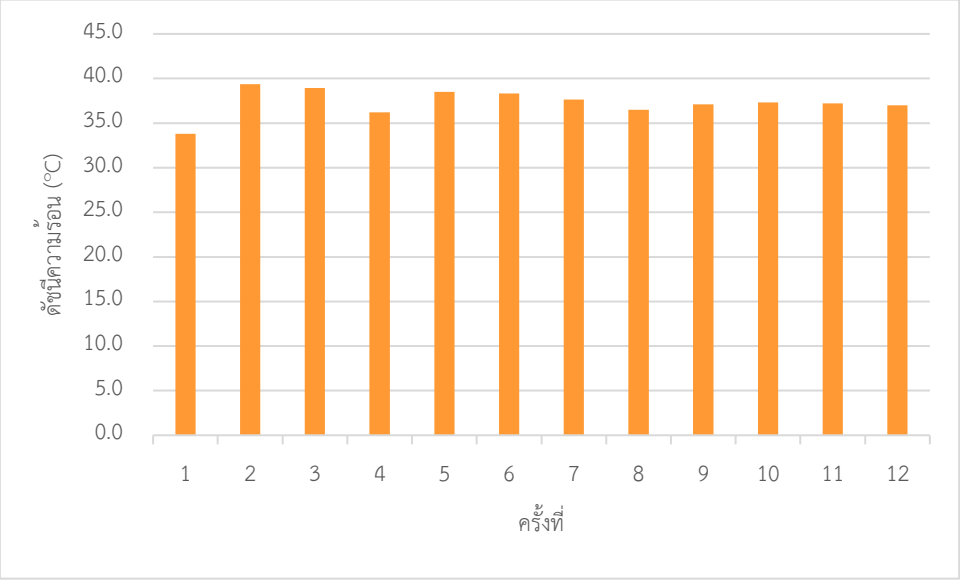
ภาพที่ 5 กราฟแสดงความเร็วลมของการทำงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่



ภาพที่ 6 กราฟแสดงความเร็วลมของการทำงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็ก



ภาพที่ 7 กราฟแสดงดัชนีความร้อนของการทำงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่

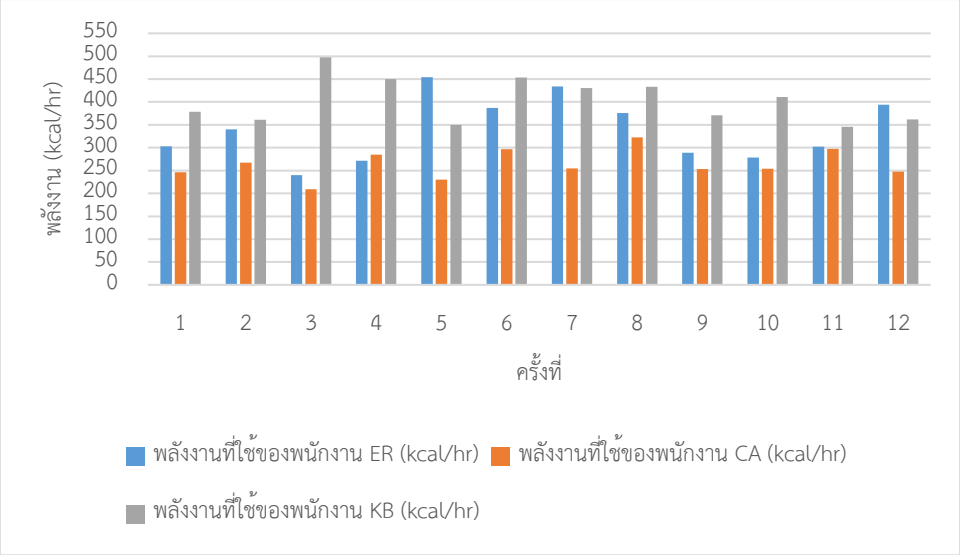


ภาพที่ 8 กราฟแสดงดัชนีความร้อนของการทำงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็ก

3. ภาระงานขณะการทำงานของผู้ปฏิบัติงานในอู่ซ่อมรถยนต์

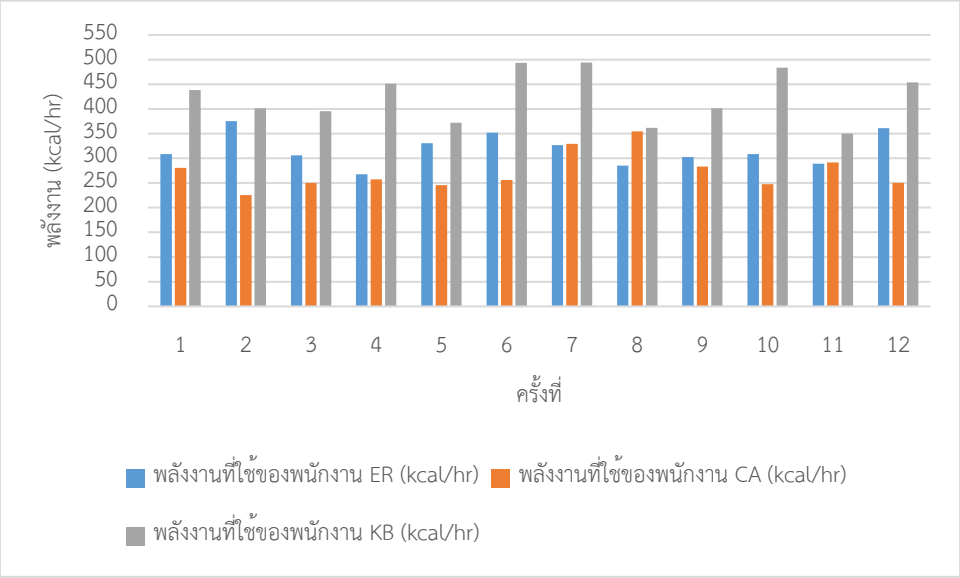
ภาระงานของผู้ปฏิบัติงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก โดยทำการศึกษาภาระงานทั้งหมด 3 ฝ่าย ได้แก่ 1) ฝ่ายซ่อมบำรุงเครื่องยนต์และเปลี่ยนอะไหล่ 2) ฝ่ายเจียร์อะไหล่รถยนต์และประกอบอะไหล่ และ 3) ฝ่ายเคาะและทุบอะไหล่ส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์

พลังงานที่ใช้ของผู้ปฏิบัติงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่ ฝ่ายซ่อมบำรุงเครื่องยนต์และเปลี่ยนอะไหล่ เท่ากับ 339.20$\pm$68.80 กิโลแคลอรี่/ชั่วโมง เป็นภาระงานปานกลาง ฝ่ายเจียร์อะไหล่รถยนต์และประกอบ เท่ากับ 263.60$\pm$31.70 กิโลแคลอรี่/ชั่วโมง เป็นภาระงานปานกลาง และฝ่ายเคาะและทุบอะไหล่ส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์ เท่ากับ 403.60$\pm$49.20 กิโลแคลอรี่/ชั่วโมง เป็นภาระงานหนัก



ภาพที่ 9 กราฟแสดงพลังงานที่ใช้ของผู้ปฏิบัติงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่

พลังงานที่ใช้ของผู้ปฏิบัติงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็ก ฝ่ายซ่อมบำรุงเครื่องยนต์และเปลี่ยนอะไหล่ เท่ากับ 317.80±32.30 กิโลแคลอรี่/ชั่วโมง เป็นภาระงานปานกลาง ฝ่ายเจียร์อะไหล่รถยนต์และประกอบ เท่ากับ 272.70±37.50 กิโลแคลอรี่/ชั่วโมง เป็นภาระงานปานกลาง และฝ่ายเคาะและทุบอะไหล่ส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์ เท่ากับ 424.60±51.30 กิโลแคลอรี่/ชั่วโมง เป็นภาระงานหนัก



ภาพที่ 10 กราฟแสดงพลังงานที่ใช้ของผู้ปฏิบัติงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็ก

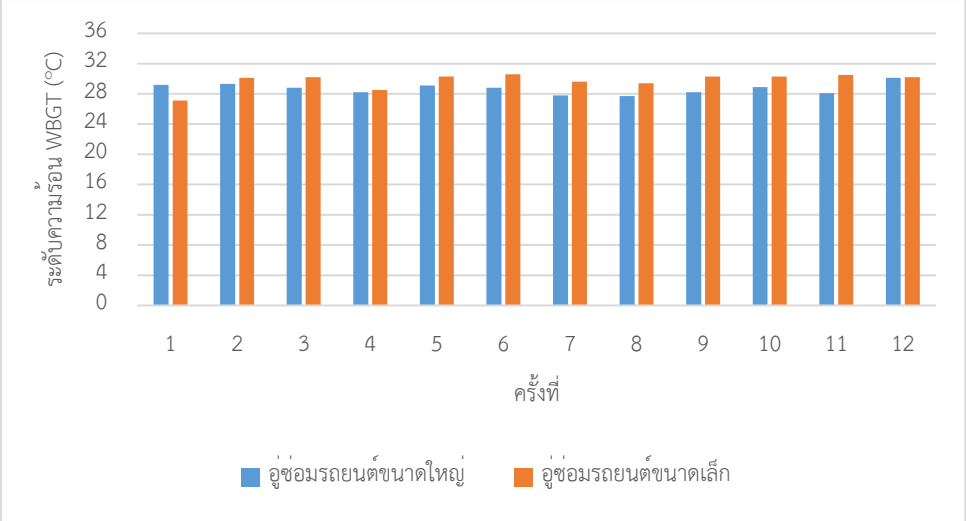
4. การเปรียบเทียบระดับความร้อนของการทำงานกับค่ามาตรฐาน

การเปรียบเทียบระดับความร้อนของการทำงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็กกับค่ามาตรฐานของกฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อม

ในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2559 [13] ซึ่งระดับความร้อนของอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่ เท่ากับ 28.68±0.70 องศาเซลเซียส และอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็ก เท่ากับ 29.76±1.02 องศาเซลเซียส พบว่า ผู้ปฏิบัติงานฝ่ายซ่อมบำรุงเครื่องยนต์และเปลี่ยนอะไหล่และฝ่ายเจียร์อะไหล่รถยนต์และประกอบอะไหล่ของอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็กมีภาระงานปานกลาง โดยมาตรฐานกำหนดไว้ว่าลูกจ้างทำในลักษณะงานปานกลางต้องมีมาตรฐานระดับความร้อนไม่เกินค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเวตบัลป์โกลบ 32 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่เกินมาตรฐาน และผู้ปฏิบัติงานฝ่ายเคาะและทุบอะไหล่ส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์ของอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็กมีภาระงานหนัก โดยมาตรฐานกำหนดไว้ว่าลูกจ้างทำในลักษณะงานหนักต้องมีมาตรฐานระดับความร้อนไม่เกินค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเวตบัลป์โกลบ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่เกินมาตรฐาน ตามมาตรฐานกฎกระทรวงในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2559 [13] ได้กำหนดภาระงานหรือความหนักเบาของการทำงาน เป็น 3 ลักษณะ คือ งานเบา งานปานกลางและงานหนัก ตามพลังงานที่เกิดขึ้นของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งผู้ปฏิบัติงานทั้ง 3 ฝ่ายของอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็กมีภาระงานเหมือนกัน คือ ฝ่ายซ่อมบำรุงเครื่องยนต์และเปลี่ยนอะไหล่มีภาระงานปานกลาง ฝ่ายเจียร์อะไหล่รถยนต์และประกอบอะไหล่มีภาระงานปานกลาง และฝ่ายเคาะและทุบอะไหล่ส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์มีภาระงานหนัก ซึ่งภาระงานหรือความหนักเบาของการทำงานขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานของผู้ปฏิบัติงานนั้น ๆ เมื่อเปรียบเทียบระดับความร้อนของการทำงานกับค่ามาตรฐาน พบว่า ผู้ปฏิบัติงานทั้ง 3 ฝ่ายของอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็กทำงานในพื้นที่ที่มีระดับความร้อนไม่เกินค่ามาตรฐาน สอดคล้องกับงานวิจัยของวิทชย เพชรเลียบ และคณะ (2563) [17] ที่ตรวจวัดระดับความร้อนในอู่ซ่อมรถยนต์ 8 แห่งในอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา อยู่ในช่วง 27.70 - 30.60 องศาเซลเซียส ซึ่งภาระงานของผู้ปฏิบัติงานในอู่ซ่อมรถยนต์เป็นงานปานกลาง โดยทำงานในพื้นที่ที่มีระดับความร้อนไม่เกินค่ามาตรฐาน ที่มาตรฐานกำหนดไว้ไม่เกิน 32 องศาเซลเซียส

5. การเปรียบเทียบระดับความร้อนของการทำงานระหว่างสถานประกอบการ

การเปรียบเทียบระดับความร้อนของการทำงานระหว่างอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก พบว่า ค่า p-value เท่ากับ 0.007 ค่าระดับความร้อนของการทำงาน ทั้ง 2 สถานประกอบการมีความแตกต่างกัน อู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็กมีค่าระดับความร้อนของการทำงาน (29.76±1.02 องศาเซลเซียส) มากกว่าอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่ (28.68±0.70 องศาเซลเซียส) เนื่องจากอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็กมีพื้นที่ที่ใช้ในการปฏิบัติงาน 200 ตารางเมตร มีความสูง 5 เมตร ซึ่งมีพื้นที่ในการปฏิบัติงานน้อยกว่าและการจัดวางเครื่องจักรในการปฏิบัติงานอยู่ชิดติดกัน อีกทั้งพื้นที่ในการปฏิบัติงานเป็นอาคารแบบกึ่งเปิด 1 ด้าน จึงทำให้มีการระบายอากาศได้ค่อนข้างน้อย โดยมีระดับความเร็วลม เท่ากับ 0.72±0.17 เมตร/วินาที จึงทำให้พื้นที่ปฏิบัติงานมีการสะสมความร้อนมากกว่า และอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่มีพื้นที่ที่ใช้ในการปฏิบัติงานทั้งหมด 525 ตารางเมตร มีความสูง 5 เมตร ซึ่งมีพื้นที่ในการใช้ในการปฏิบัติงานมากกว่าและการจัดวางเครื่องจักรในการปฏิบัติงานอยู่ห่างกัน อีกทั้งพื้นที่ในการปฏิบัติงานเป็นลักษณะพื้นที่เปิดจึงทำให้มีการระบายอากาศได้มากกว่า โดยมีระดับความเร็วลม เท่ากับ 0.97±0.43 เมตร/วินาที ทำให้พื้นที่ปฏิบัติงานมีการสะสมความร้อนได้น้อยกว่า ซึ่งอากาศสามารถถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน จึงทำให้สามารถระบายความร้อนได้ [20]



ภาพที่ 11 กราฟแสดงระดับความร้อนของการทำงานของอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก

6. ผลกระทบของระดับความร้อนต่อผู้ปฏิบัติงาน

ผลกระทบของระดับความร้อนต่อผู้ปฏิบัติงานในอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก พบว่า ผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายและจิตใจทำให้เกิดอาการกระหายน้ำ เหนื่อยล้า เป็นตะคริว มือชาและหงุดหงิด เมื่อร่างกายได้รับความร้อนหรือสร้างความร้อนขึ้นจึงจำเป็นต้องถ่ายเทความร้อนออกไป โดยร่างกายจะพยายามรักษาสมดุลของอุณหภูมิให้คงที่ 37.00±1.00 องศาเซลเซียส เพื่อให้อวัยวะต่าง ๆ ภายในร่างกายทำงานได้ปกติ หากร่างกายไม่สามารถรักษาสมดุลความร้อนได้จะมีผลกระทบทั้งด้านจิตใจ (Psychological Effects) เช่น หงุดหงิด อ่อนเพลีย กระสับกระส่าย ไม่มีสมาธิ [5] เมื่อร่างกายได้รับความร้อนหรือสร้างความร้อนขึ้นจะต้องถ่ายเทความร้อนออกไป เพื่อรักษาสมดุลของอุณหภูมิร่างกาย หากร่างกายไม่สามารถรักษาสมดุลของระบบควบคุมความร้อนได้ จะทำให้ร่างกายเกิดอาการผิดปกติหรืออาการเจ็บป่วย (Physical Effects) ได้แก่ การมีไข้ ตะคริวเนื่องจากความร้อน เป็นลมเนื่องจากความร้อนในร่างกายสูง อ่อนเพลียเนื่องจากความร้อน ผดผื่นขึ้นตามบริเวณผิวหนัง อาการการขาดน้ำ การหมดสติชั่วคราวจากความร้อน บวมน้ำจากความร้อน ชักเกร็งจากความร้อนและโรคจิตประสาทเนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการสัมผัสความร้อนสูงจัดเป็นเวลานาน ทำให้เกิดอาการวิตกกังวล ไม่มีสมาธิในการทำงาน ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง ส่งผลทำให้นอน ไม่หลับและมักเป็นต้นเหตุให้เกิดอุบัติเหตุในการทำงาน [2, 5, 21] ซึ่งอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็กไม่มีอุปกรณ์ป้องกันความร้อนสำหรับผู้ปฏิบัติงาน และผู้ปฏิบัติงานมีวิธีป้องกันความร้อน คือ การใช้พัดลมในการระบายความร้อน การดื่มน้ำเย็นเพื่อช่วยคลายร้อนและพยายามใช้เวลาในการทำงานกับเครื่องจักรให้น้อยที่สุด

สำหรับแนวทางป้องกันและควบคุมอันตรายในการทำงานที่ต้องสัมผัสความร้อน โดยใช้หลักการการควบคุมตามลำดับชั้น (Hierarchy of Controls) โดยจัดลำดับมาตรการควบคุมอันตรายในที่ทำงาน เริ่มจากวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดไปจนถึงวิธีที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด เพื่อสร้างสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัยตั้งแต่ต้นทาง [2, 7, 21, 22] ซึ่งสามารถดำเนินการได้ดังนี้

1) การใช้แผ่นกันความร้อนหรือการใช้ฉนวนโดยหุ้มแหล่งกระจายความร้อน ซึ่งเป็นการลดการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน

2) การออกแบบและปรับปรุงระบบระบายอากาศให้สามารถถ่ายเทความร้อนระหว่างภายในและภายนอกอาคาร

3) การตั้งติดพัดลมระบายอากาศ ทำให้อากาศมีการไหลเวียนจะช่วยระบายเหงื่อของผู้ปฏิบัติงาน

4) การลดระยะเวลาการทำงาน เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานไม่ต้องสัมผัสกับความร้อนนานเกินไป

5) การให้ความรู้ สร้างเจตคติและพฤติกรรมความปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงานในการทำงาน

6) การจัดน้ำดื่มและน้ำเกลือแร่ให้ผู้ปฏิบัติงาน

7) ตรวจสุขภาพประจำปี

8) การใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลที่เกี่ยวข้องกับความร้อน

สรุปผล

อู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็กมีค่าระดับความร้อนของการทำงาน เท่ากับ 28.68$\pm$0.70 และ 29.76$\pm$1.02 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดเล็กมีค่าระดับความร้อนของการทำงานมากกว่าอู่ซ่อมรถยนต์ขนาดใหญ่ (p-value < 0.05) ความร้อนในอู่ซ่อมรถยนต์เกิดจากการทำงานของเครื่องจักร ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อระดับความร้อนที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับ ได้แก่ อัตราเมตาบอลิซึมในร่างกาย ระดับความร้อนในอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลม ภาระงานของผู้ปฏิบัติงานทั้ง 3 ฝ่ายของอู่ซ่อมรถยนต์ทั้ง 2 แห่งมีภาระงานเหมือนกัน คือ ฝ่ายซ่อมบำรุงเครื่องยนต์และเปลี่ยนอะไหล่ และฝ่ายเจียร์อะไหล่รถยนต์และประกอบอะไหล่มีภาระงานปานกลาง ส่วนฝ่ายเคาะและทุบอะไหล่ส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์มีภาระงานหนัก ซึ่งผู้ปฏิบัติงานทั้ง 3 ฝ่ายทำงานในพื้นที่ที่มีระดับความร้อนไม่เกินค่ามาตรฐาน และค่าดัชนีความร้อน เท่ากับ 34.68$\pm$1.08 และ 37.32$\pm$1.47 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับเตือนภัย ผลกระทบของระดับความร้อนต่อสุขภาพร่างกายและจิตใจของผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นจึงต้องมีแนวทางป้องกันและควบคุมอันตรายในการทำงานที่ต้องสัมผัสความร้อนและให้ความรู้ สร้างเจตคติและพฤติกรรมความปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงานในการทำงาน

เอกสารอ้างอิง

1. วิทยา อยู่สุข. อาชีวอนามัยและความปลอดภัย. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: หจก.เบสท์ กราฟฟิค เพรส; 2552. 252.
2. ชนกานต์ สกุลแถว. ความร้อนกับการทำงาน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2556; 5(1): 21-24. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/JSTNSRU/article/view/42075/34760
3. อัศมน ลิ่มสกุลม, วุฒิชัย แพงแก้ว, นิดาลักษณ์ อรุณจันทร. การพัฒนาดัชนีความร้อนและการประยุกต์ใช้ศึกษาคลื่นความร้อนในประเทศไทย. ใน: อนงค์ ชานะมูล. รายงานผลงานวิจัยศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม ปี 2558 – 2560. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี: ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อมกรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. หน้า 13-24. https://shorturl.asia/BjDHz
4. สุมิตรา ดอกเข็ม, วันทนี พันธุ์ประสิทธิ์, วรกมล บุณยโยธิน, อรุณรักษ์ คูเปอร์ มีใย, อริยะ บุญงามชัยรัตน์. ดัชนีชี้วัดการตอบสนองของร่างกายต่อความร้อนที่เหมาะสมสำหรับคนงานในโรงงานหล่อหลอมโลหะ. วารสารความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม. 2560; 26(1): 51-60. https://www.ohswa.or.th/attachments/view/?attach_id=260868
5. ทัศน์พงษ์ ตันติปัญจพรม. ความร้อน: ผลกระทบต่อสุขภาพ การตรวจวัด ค่ามาตรฐานและการปรับตัวให้ทนต่อสถาพความร้อน. วารสารความปลอดภัยและสุขภาพ. 2562; 12(3): 1-16. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/JSH/article/view/187302

6. ประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง หลักเกณฑ์ วิธีการตรวจวัด และการวิเคราะห์สภาวะการทำงานเกี่ยวกับระดับความร้อน แสงสว่าง หรือเสียง รวมทั้งระยะเวลาและประเภทกิจการที่ต้องดำเนินการ ประกาศในราชกิจจา เล่ม 135 ตอนพิเศษ 57 ง วันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561
7. อภิรดี ศรีโอภาส. แนวการตรวจวัดความร้อนในสถานประกอบกิจการ. วารสารความปลอดภัยและสุขภาพ. 2558; 8(30): 33–38. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/JSH/article/view/136542/101800
8. กฎกระทรวง (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 109 ตอนที่ 37 วันที่ 4 เมษายน 2535
9. กฎกระทรวงกำหนดประเภท ชนิด และขนาดของโรงงาน พ.ศ. 2563 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 137 ตอนที่ 62 ก วันที่ 5 สิงหาคม 2563
10. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง กิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ พ.ศ. 2558 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 132 ตอนพิเศษ 165 ง วันที่ 17 กรกฎาคม 2558
11. สุณัฏฐา โน้ตสุภา, อุไรวรรณ อินทร์ม่วง. สภาพปัญหาด้านอนามัยสิ่งแวดล้อมของอู่ซ่อมและอู่เคาะพ่นสีรถยนต์และแนวทางการแก้ไขปัญหา ในเขตเทศบาลเมืองสกลนคร. วารสารวิจัยสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2555; 5(3): 65-76. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/kkujphr/article/view/118246/90744
12. ประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง หลักเกณฑ์ วิธีการตรวจวัด และการวิเคราะห์สภาวะการทำงานเกี่ยวกับระดับความร้อน แสงสว่าง หรือเสียง รวมทั้งระยะเวลาและประเภทกิจการที่ต้องดำเนินการ (ฉบับที่ 2) ประกาศในราชกิจจา เล่ม 139 ตอนพิเศษ 7 ง วันที่ 11 มกราคม พ.ศ. 2565
13. กฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ.2559 ประกาศในราชกิจจาเล่ม 133 ตอนที่ 91 ก วันที่ 7 ตุลาคม พ.ศ.2559
14. กองความปลอดภัยแรงงาน. แนวทางการตรวจวัดและประเมินสภาพแวดล้อมในการทำงานและการดำเนินการตามพระราชบัญญัติความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: กองความปลอดภัยแรงงาน กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน กระทรวงแรงงาน; 2561. 94.
15. Lans P. Rothfusz. The Heat Index Equation (or, More Than You Ever Wanted to Know About Heat Index) [Internet]. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Meteorology, Fort Worth, TX, USA: 2018 [updated 1990 Jan 7; cited 2018 Sep 25]; Available from: https://www.weather.gov/media/ffc/ta_htindx.PDF
16. ประกาศกรมอนามัยเรื่อง ค่าเฝ้าระวังผลกระทบต่อสุขภาพจากค่าดัชนีความร้อน (Heat Index) พ.ศ. 2567
17. วิทชย เพชรเลียบ, พานิช แก่นกาญจน์, ณัฐวรรณ เลิศภิญโญชัยถาวร. การประเมินสิ่งแวดล้อมการทำงาน และภาวะสุขภาพตามความเสี่ยงจากการทำงานของพนักงานในอู่ซ่อมรถยนต์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา. วารสารสาธารณสุขมหาวิทยาลัยบูรพา. 2563; 15(2):109-120. https://journal.lib.buu.ac.th/index.php/health/article/view/7293
18. จีรนันท์ จะเกร็ง, ฉันทนา ผดุงทศ, ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุด. ผลกระทบต่อสุขภาพจากการสัมผัสพลังงานความร้อนขณะทำงานในกลุ่มคนทำนาเกลือจังหวัดสมุทรสงคราม. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี). 2553; 2(1): 10-18. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/swujournal/article/view/33456/28375

19. กลุ่มวิจัยและพัฒนาสารสนเทศอุตุนิยมวิทยา กองบริการดิจิทัลอุตุนิยมวิทยา. ค่าดัชนีความร้อน (Heat Index, HI). แหล่งข้อมูล : http://www.rnd.tmd.go.th/doc/public/เอกสารเผยแพร่ความรู้_ค่าดัชนีความร้อน (24AUG).pdf สืบค้นวันที่ 2 ตุลาคม 2567
20. สุดาว เลิศวิสุทธิไพบูลย์. การตรวจวัดและประเมินสภาพความร้อนและความเย็น. ใน: อภิรดี ศรีโอภาส. สุขศาสตร์อุตสาหกรรม: การประเมิน หน่วยที่ 6–10. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยลัยสุโขทัยธรรมาธิราช. หน้า 6-1-6-95.
21. เกียรติศักดิ์ บัตรสูงเนิน. อาชีวอนามัยและความปลอดภัยพื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่1. นครราชสีมา:สาขาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย สำนักวิชาแพทย์ศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุรนารี; 2557. 235.
22. จุฑามาศ ปิ่นทอง, ธิดารัตน์ อ่อนสุด, อรวรรณ ชำนาญพุดซา. ความรู้ เจตคติ และพฤติกรรมความปลอดภัยมีความสัมพันธ์ต่ออาการจากการสัมผัสความร้อนของพนักงานฝ่ายผลิตในโรงงานหลอมโลหะแห่งหนึ่งในจังหวัดชลบุรี. วารสารความปลอดภัยและสุขภาพ. 2565; 15(2): 146-159. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/JSH/article/view/252484/175579

บทความวิจัย (Research Article)

ผลของอัตราส่วนเนื้อปลาสวายและปลานิลต่อคุณภาพลูกชิ้นปลา

Effects of Striped Catfish and Nile Tilapia Mince Ratios on Fish Ball Quality

จักรินทร์ ตรีอินทอง[1*] และ ปิยะฉัตร วิริยะอำไพวงศ์[2]
Jukkarin Treeinthong[1*] and Piyachat Wiriyaampaiwong[2]
[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีการประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
[1]Department of Fishery Technology, Faculty of Agricultural Technology, Kalasin University
[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
[2]Department of Biotechnology, Faculty of Agricultural Technology, Kalasin University
*Corresponding author; email: jukkarin.tr@ksu.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
19 กันยายน 2568	2 กุมภาพันธ์ 2569	9 กุมภาพันธ์ 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของอัตราส่วนเนื้อปลาสวายบดไม่ล้างน้ำ (unwashed striped catfish mince; UW-SC) และเนื้อปลานิลบดล้างน้ำ (washed Nile tilapia mince; W-NT) ต่อสมบัติของเจลปลาผสมและคุณภาพของลูกชิ้นปลา โดยการแปรอัตราส่วนเป็นร้อยละ 25:75, 50:50 และ 75:25 นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C นาน 20 นาที ตามด้วย 90 °C นาน 20 นาที (40/90°C) และ 60 °C นาน 20 นาที ตามด้วย 90 °C นาน 20 นาที (60/90°C) เปรียบเทียบกับเจลปลานิลที่ 40/90°C (0:100) และเจลปลาสวายที่ 60/90°C (100:0) จากนั้นคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อใช้ทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค (100 คน) และวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ผลการศึกษาพบว่า การผสม UW-SC ตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไปส่งผลให้เจลปลาผสมมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ขณะที่เจลปลาผสมอัตราส่วน 25:75 (40/90°C) และ 75:25 (60/90°C) มีความแข็งแรงเจลสูงที่สุด ($p<0.05$) การเพิ่มปริมาณ UW-SC มีแนวโน้มทำให้ค่าการเกาะตัว ระยะทางที่หัววัดกดก่อนทะลุ ความขาว และร้อยละการสูญเสียน้ำหนักลดลง อย่างไรก็ตามจากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่า ลูกชิ้นปลาผสมทุกสูตรได้รับคะแนนความชอบโดยรวมในระดับชอบปานกลาง โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบรวม จึงได้คัดเลือกสูตรอัตราส่วน 75:25 (UW-SC:W-NT) ที่ผ่านการให้ความร้อนสภาวะ 60/90 °C เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดเพื่อไปทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคจำนวน 100 คน โดยผลการทดสอบ พบว่า ลูกชิ้นปลาผสมมีการยอมรับร้อยละ 92 และการตัดสินใจซื้อร้อยละ 79 ในด้านคุณค่าทางโภชนาการมีโปรตีนร้อยละ 14.81 แต่มีไขมัน คอเลสเตอรอล และโซเดียมต่ำ อีกทั้งมีความปลอดภัยต่อการบริโภค ดังนั้นการผสมเนื้อปลาสวายและปลานิลด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจึงเป็นแนวทางสำหรับการผลิตลูกชิ้นปลาที่มีคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสที่ดี และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคได้

คำสำคัญ: ลูกชิ้นปลา, ปลาสวาย, ปลานิล, สมบัติเจล, การยอมรับของผู้บริโภค

Abstract

This research aimed to evaluate the effects of different ratios of unwashed striped catfish mince (UW-SC) and washed Nile tilapia mince (W-NT) on the gel properties of mixed fish gels and the quality of fish balls. The mince ratios were varied at 25:75, 50:50, and 75:25 (UW-SC:W-NT) and subjected to two heating conditions: heating at 40 °C for 20 min followed by 90 °C for 20 min (40/90 °C), and heating at 60 °C for 20 min followed by 90 °C for 20 min (60/90 °C). These treatments were compared with Nile tilapia gel heated at 40/90 °C (0:100) and striped catfish gel heated at 60/90 °C (100:0). Subsequently, the optimal formulation was selected for consumer acceptance testing (100 panelists) and nutritional value analysis. The results indicated that the incorporation of UW-SC at levels of 50% or higher significantly increased hardness of mixed fish gels ($p < 0.05$). The mixed fish gels at ratios of 25:75 (40/90 °C) and 75:25 (60/90 °C) exhibited the highest gel strength ($p < 0.05$). Increasing the proportion of UW-SC tended to decrease cohesiveness, breaking distance, whiteness, and expressible water. However, sensory evaluation revealed that all mixed fish ball formulations received moderate overall liking scores, with no significant differences among treatments ($p>0.05$). Based on textural properties, taste, and overall liking, the formulation with a 75:25 ratio of UW-SC:W-NT subjected to the 60/90 °C heating condition was selected as the most suitable for consumer acceptance testing with 100 panelists. Consumer acceptance testing demonstrated an acceptance rate of 92% and a purchase decision of 79%. Nutritional analysis showed that mixed fish balls contain 14.81% protein, with low fat, cholesterol, and sodium contents, and was safe for consumption. Therefore, blending striped catfish mince and Nile tilapia mince at an appropriate ratio represents a promising approach for producing fish balls with desirable textural quality and high consumer acceptance.

Keywords: fish ball, striped catfish, Nile tilapia, gel properties, consumer acceptance

บทนำ

ลูกชิ้นปลา เป็นผลิตภัณฑ์ที่นิยมบริโภคกันอย่างกว้างขวางในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เนื่องจากเนื้อสัมผัสมีความยืดหยุ่นและคุณค่าทางโภชนาการ ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ส่วนใหญ่นิยมผลิตจากปลาทะเลมากกว่าปลาน้ำจืด เนื่องจากปลาทะเลมักให้เนื้อสีขาว มีเนื้อสัมผัส และรสชาติดีกว่า ในขณะที่ปลาน้ำจืดโดยทั่วไปมักมีความสามารถในการเกิดเจล (gelling ability) อยู่ในระดับปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับปลาทะเล [1] โดยความสามารถในการเกิดเจลมีผลโดยตรงต่อลักษณะของเนื้อสัมผัสของลูกชิ้นปลา เนื้อสัมผัสที่มีความยืดหยุ่นของลูกชิ้นปลาเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงรูปของโปรตีนโดยเกลือร้อยละ 2-3 ไปละลายโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ (myofibrillar protein) ทำให้เนื้อปลาบดมีความหนืดมากขึ้นเรียกว่า เพส (paste) เมื่อนำเพสไปให้ความร้อน โมเลกุลของโปรตีนเกิดการคลายตัว (unfolding) แล้วเกิดการรวมตัวกันอย่างช้า ๆ ด้วยพันธะเคมีชนิดต่าง ๆ เกิดเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติที่สามารถจับน้ำหรือสารอื่น ๆ ที่มีโมเลกุลต่ำไว้ภายในได้เกิดเป็นเจลโปรตีน (protein gel) ที่มีความแข็งและยืดหยุ่น [2] อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันปลาน้ำจืดได้รับความสนใจมากขึ้นในฐานะแหล่งวัตถุดิบทางเลือกในการใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ยืดหยุ่น โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมซูริมิ เนื่องจากมีการเพาะเลี้ยงในต้นทุนที่ค่อนข้างต่ำ และปลาสามารถกำหนดขนาดที่เหมาะสมได้ในระยะเวลาการเลี้ยงที่สั้น [3] ในประเทศจีนปลาน้ำจืดที่นิยมนำมาใช้ เช่น ปลาหัวโต (bighead carp) ปลาลิ่น (silver carp) และปลาเฉาฮื้อ (grass carp) และปลา black carp [3] การปรับปรุงคุณภาพเจลของปลาน้ำจืดมีรายงานในหลายแนวทาง ไม่ว่าจะเป็นการเติมสารปรุงแต่งอาหาร เช่น ตัวยับยั้งเอนไซม์

โปรตีเอส (protease inhibitors) protein cross-liker หรือสารไฮโดรคอลลอยด์ [3] การปรับสภาวะกระบวนการผลิตให้เหมาะสม หรือการผสมเนื้อปลาที่มีความสามารถในการเกิดเจลสูงเข้ากับเนื้อปลาที่มีความสามารถต่ำเพื่อปรับปรุงคุณภาพเจล หนึ่งในเทคนิคที่ได้รับความนิยมคือ การผสมปลาต่างชนิดกัน ซึ่งมักใช้ในผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นปลา เนื่องจากปลาต่างชนิดมีคุณสมบัติของเจลโปรตีนแตกต่างกัน การผสมเนื้อปลาเข้าด้วยกันจึงช่วยปรับปรุงคุณภาพและตอบสนองความต้องการผู้บริโภค Panpipat et al. [4] รายงานว่า การผสมซูริมิปลาทูเนื้อคล้ำเข้ากับซูริมิปลากะพง (เนื้อขาว) ในอัตราส่วน 1:2 ให้เจลโปรตีนที่มีสีและคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับเจลของซูริมิปลากะพงเพียงอย่างเดียว โดยคุณสมบัติของเจลที่ดีขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของปลาเนื้อคล้ำที่ใช้ในสูตร ขณะที่ลูกชิ้นปลาที่ผลิตจากการผสมปลาลิ้นหมาและปลานิลในอัตราส่วน 80:20 โดยเติมแป้งมันสำปะหลังร้อย 10 และผ่านการให้ความร้อนที่ 40 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที ตามด้วยการต้มที่ 90 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที มีคุณสมบัติด้านกลิ่นที่ดีและให้ความสามารถในการเกิดเจลสูงที่สุด [5] การผสมซูริมิจากเนื้อปลาทรายแดงหางเหลืองกับซูริมิจากปลาลิ่นที่อัตราส่วน 1:3 ทำให้เจลโปรตีนมีความแข็งแรงเจล ความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) และความขาวเพิ่มขึ้น และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการปรุงสุก (cooking loss) ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเจลโปรตีนปลาทรายแดงหางเหลืองและเจลโปรตีนของปลาลิ่นที่ไม่มีการผสมเนื้อปลา [6] อย่างไรก็ตาม เทคนิคการผสมเนื้อปลายังมีการใช้ผสมระหว่างเนื้อปลาทะเลกับปลาทะเล ปลาทะเลและน้ำจืดเป็นส่วนมาก แต่การผสมเนื้อปลาน้ำจืดกับปลาน้ำจืดด้วยกันยังมีการใช้ค่อนข้างน้อย ดังนั้นผู้วิจัยจึงเกิดความสนใจในการใช้เทคนิคการผสมเนื้อปลาในการผลิตลูกชิ้นปลา โดยผู้วิจัยเลือกใช้ปลาน้ำจืดสองชนิดในท้องถิ่นและเป็นปลาน้ำจืดเศรษฐกิจ ได้แก่ ปลาสวายและปลานิล โดยปลาสวายที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นปลาน้ำจืดที่จับได้จากอ่างเก็บน้ำเขื่อนลำปาว จังหวัดกาฬสินธุ์ ซึ่งเป็นปลาธรรมชาติที่มีปริมาณจับได้มาก มีคุณค่าทางโภชนาการสูง แต่ยังมีการใช้ประโยชน์จากเนื้อปลาค่อนข้างน้อยเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องกลิ่น และมีราคาต่อหน่วยค่อนข้างต่ำ ขณะที่ปลานิลเป็นปลาน้ำจืดที่เกษตรกรจังหวัดกาฬสินธุ์มีการเลี้ยงในกระชังจำนวนมากบริเวณอ่างเก็บน้ำเขื่อนลำปาว เนื้อปลามีสีขาว มีไขมันต่ำ นิยมจำหน่ายแบบปลามีชีวิตซึ่งต้องมีขนาดตรงตามความต้องการของตลาด (ขนาด 0.8-1.2 กิโลกรัม) อย่างไรก็ตาม ปลานิลที่มีขนาดไม่ได้ตามความต้องการของตลาด หรือปลานิลที่มักประสบปัญหาตายกระทันหันยังมีการใช้ประโยชน์ในการแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าค่อนข้างน้อยเนื่องจากเกษตรกรยังขาดองค์ความรู้ งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการรายงานวิธีการเตรียมเนื้อปลาบดและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเซ็ทตัวของเนื้อปลาทั้งสอง โดยสภาวะการเตรียมเนื้อปลาสวายบดที่เหมาะสมคือ เนื้อปลาสวายบดล้างน้ำและมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเซ็ทตัวอยู่ที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที [7] ขณะที่สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเนื้อปลานิลคือ เนื้อปลานิลบดล้างน้ำและมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเซ็ทตัวอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที [8] ทั้งนี้ การล้างเนื้อปลาบดเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการเกิดเจลของโปรตีนซึ่งช่วยขจัดโปรตีนซาร์โคพลาสมิก ไขมัน และสารที่ละลายน้ำได้ ส่งผลให้ความเข้มข้นของโปรตีนไมโอฟิบริลลาร์เพิ่มมากขึ้นและสามารถสร้างโครงข่ายเจลโปรตีนที่มีความแข็งแรง ยืดหยุ่น และมีคุณภาพด้านประสาทสัมผัสที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามโปรตีนที่จำเป็นและคุณค่าทางโภชนาการอาจลดลงหากการล้างเนื้อปลาบดมีจำนวนครั้งที่มากเกินไป [2] ด้วยเหตุนี้ การนำเนื้อปลาน้ำจืดทั้งสองชนิดมาผลิตเป็นลูกชิ้นปลาโดยการใช้เทคนิคการผสมเนื้อปลาจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าของสัตว์น้ำ และยังเพิ่มช่องทางในการใช้ประโยชน์ให้กับเกษตรกร โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทยืดหยุ่นจากปลาได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของเนื้อปลาสวายและปลานิลต่อสมบัติของเจลปลาและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของลูกชิ้นปลา
2. เพื่อศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อลูกชิ้นปลาผสมที่คัดเลือกได้
3. เพื่อศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของลูกชิ้นปลาผสมที่คัดเลือกได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมเนื้อปลาสวาย

เตรียมเนื้อปลาสวายบดตามวิธีการของ จักรินทร์ ตรีอินทอง และคณะ [7] โดยซื้อปลาสวายขนาด 5,000 – 7,000 กรัมต่อตัว ซึ่งเป็นปลาสวายธรรมชาติที่จับได้จากอ่างเก็บน้ำเขื่อนลำปาวจากวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแปรรูปปลาบ้านท่าเรือภูสิงห์ ต.ภูสิงห์ อ.สหัสขันธ์ จ.กาฬสินธุ์ นำมาตัดหัว ควักไส้ และล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด จากนั้นแล่เอาเฉพาะกล้ามเนื้อขาวและหนังออกจากกัน นำเฉพาะส่วนกล้ามเนื้อขาวไปล้างด้วยน้ำสะอาด 1 ครั้ง หั่นเป็นชิ้นแล้วนำไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดเนื้อ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อมาใช้ในการศึกษาต่อไป โดยเนื้อปลาสวายบดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ เนื้อสวายบดไม่ล้างน้ำ (unwashed stripe catfish mince; UW-SC)

2. การเตรียมเนื้อปลานิล

เตรียมเนื้อปลานิลบดดัดแปลงจากวิธีการของ จักรินทร์ ตรีอินทอง [8] โดยซื้อเนื้อปลานิลแล่ (ปลานิลขนาด 400-600 กรัมต่อตัว) จากวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแปรรูปปลาบ้านท่าเรือภูสิงห์ ต.ภูสิงห์ อ.สหัสขันธ์ จ.กาฬสินธุ์ นำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด จากนั้นแล่ส่วนกล้ามเนื้อขาวและหนังออกจากกัน นำเฉพาะส่วนกล้ามเนื้อขาวไปล้างด้วยน้ำสะอาด 1 ครั้ง หั่นเป็นชิ้นแล้วนำไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดเนื้อ นำเนื้อปลานิลบดไปล้างน้ำเย็นอัตราส่วนเนื้อปลานิลบดต่อน้ำเย็นเท่ากับ 1:3 (w/w) นาน 10 นาที จำนวน 1 ครั้ง โดยมีการคนเป็นครั้งคราว จากนั้นกรองเนื้อปลานิลบดด้วยผ้าขาวบาง 4 ชั้น บีบน้ำล้างออกจากเนื้อปลาให้มากที่สุด จากนั้นนำเนื้อปลานิลบดไปล้างด้วยน้ำเกลือเย็นความเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/v) นาน 10 นาที จำนวน 1 ครั้ง โดยมีการคนเป็นครั้งคราว กรองแยกเนื้อปลานิลบดแล้วบีบน้ำออกจากเนื้อปลาให้มากที่สุด เนื้อปลานิลบดล้างน้ำ (washed Nile tilapia mince; W-NT) เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อมาใช้ในการศึกษาต่อไป

3. ศึกษาผลของอัตราส่วนเนื้อปลาสวายและปลานิลต่อคุณภาพเจลปลาและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของลูกชิ้นปลา

เตรียมเจลปลาตามวิธีการของ จักรินทร์ ตรีอินทอง และคณะ [7] โดยสับผสมเนื้อปลาบดกับเกลือร้อยละ 3 (w/w) เป็นเวลา 6 นาที และปรับความชื้นด้วยน้ำแข็งบดโดยให้มีความชื้นสุดท้ายเป็นร้อยละ 80 แปรอัตราส่วนร้อยละของ UW-SC ต่อ W-NT เป็น 25:75, 50:50, 75:25 ตามลำดับ เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ได้แก่ เจลปลานิลล้วน (อัตราส่วน 0:100) และเจลปลาสวายล้วน (อัตราส่วน 100:0) แบ่งเนื้อปลาที่บดผสมแล้วออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 นำไปบรรจุโลหะปลอดสนิมขนาด 25 x 25 มิลลิเมตร แล้วห่อด้วยแผ่นพลาสติกใสมัดหัวท้ายให้แน่น (เจลปลา) ขณะที่ส่วนที่ 2 นำไปขึ้นรูปเป็นลูกชิ้น โดยการขึ้นรูปเป็นลูกชิ้นมีการเติมส่วนผสมอื่นเข้าไปปั่นผสมเพื่อเพิ่มรสชาติให้กับผู้ทดสอบชิม ได้แก่ น้ำตาลทรายร้อยละ 3.5 และพริกไทยป่นร้อยละ 1 ของน้ำหนักเนื้อปลา (ลูกชิ้นปลา) จากนั้นนำไปให้ความร้อน 2 ระดับ ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (อุณหภูมิความแปรปรวน ± 1°C) โดยทั่วไปการใช้เทคนิคการผสมเนื้อปลาสองชนิดจำเป็นต้องให้เนื้อปลาผสมทุกอัตราส่วนมีการให้ความร้อนในขั้นตอนการเซ็ทตัวของทั้งสองสภาวะของปลาน้ำจืดที่นำมาใช้ โดยอุณหภูมิในการการเซ็ทตัว (setting) ที่เหมาะสมของปลานิลและปลาสวายคือ 40 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที [8] และ 60 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที [7] ตามลำดับ ดังนั้น เนื้อปลาผสมทุกอัตราส่วนในการศึกษานี้นำไปให้ความร้อน 2 แบบ ได้แก่ 1) ที่ระดับอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที ต่อด้วยอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที (40/90°C) และ 2) ที่ระดับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที ต่อด้วยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที (60/90°C) สำหรับตัวอย่างควบคุม ได้แก่ เนื้อปลานิลล้วนอัตราส่วน 0:100 ให้ความร้อนที่ 40/90°C และเนื้อปลาสวายล้วนอัตราส่วน 100:0 ให้ความร้อนที่ 60/90°C จากนั้นนำเจลปลาและลูกชิ้นปลาที่ผ่านการให้ความร้อนแช่ในน้ำเย็นผสมน้ำแข็งนาน 10 นาที นำเจลปลาและลูกชิ้นปลาไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 1 คืน ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณภาพ

4. การวิเคราะห์คุณภาพของเจลปลาและลูกชิ้นปลา

4.1 การทดสอบการเจาะทะลุของเจล (puncture test) นำเจลปลาออกจากกระบอกโลหะปลอดสนิม นำไปวัดความแข็งแรงเจลด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) รุ่น TA-XT plus ยี่ห้อ Stable Micro Systems ประเทศอังกฤษ ใช้หัวกดแบบ spherical 5s ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร กดลงไปในตัวอย่างด้วยความเร็วคงที่ 1.1 มิลลิเมตร/วินาที เป็นระยะทาง 15 มิลลิเมตร วัดค่าของแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุ (breaking force) (กรัม) และระยะทางที่หัววัดกดก่อนทะลุ (breaking distance) (มิลลิเมตร) แล้วคำนวณค่าความแข็งแรงเจล (กรัม.เซนติเมตร) จากแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุคูณด้วยระยะทางที่หัววัดกดก่อนทะลุ ทำทดสอบ 5 ซ้ำต่อตัวอย่าง [9]

4.2 การวัดโครงร่างทางเนื้อสัมผัส (texture profile analysis; TPA) นำเจลปลาออกจากกระบอกโลหะปลอดสนิม วัด TPA ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) รุ่น TA-XT plus ยี่ห้อ Stable Micro Systems ประเทศอังกฤษ โดยใช้หัวกดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร กดลงไปในตัวอย่างเป็นระยะทางร้อยละ 60 ของความสูงในรูปแบบของการกดสองครั้ง (two bite) ด้วยความเร็วคงที่ 2 มิลลิเมตร/วินาที วัดค่าความแข็ง (hardness) ความยืดหยุ่น (springiness) และค่าการเกาะตัว (cohesiveness) ทำการทดสอบ 5 ซ้ำต่อตัวอย่าง

4.3 การวัดความขาว (whiteness) นำเจลปลาไปวัดค่า CIE L* a* b* ด้วยเครื่องวัดสี รุ่น Ultra Scan PRO ยี่ห้อ Hunter Lab ประเทศสหรัฐอเมริกา จำนวน 6 ซ้ำต่อตัวอย่าง แล้วนำไปคำนวณค่าความขาว ตามสูตรของ [10] ดังนี้

$$\text{ความขาว (whiteness)} = 100\text{-}[(100\text{-}L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{0.5}$$

4.4 การวัดค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (% expressible water; EW) ตัดตัวอย่างให้มีขนาด 0.5 x 1.0 x 0.5 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักและจดบันทึก จากนั้นวางตัวอย่างระหว่างกระดาษกรอง Whatman No. 1 โดยวางกระดาษกรองด้านล่าง 3 ชิ้น ด้านบน 2 ชิ้น แล้วใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน 5 กิโลกรัม กดทับเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักโดยเครื่องทศนิยม 4 ตำแหน่ง แล้วคำนวณค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักโดยใช้สูตร [11]

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ)} = (\text{น้ำหนักเจลปลาก่อนทับ-น้ำหนักเจลปลาหลังทับ})/\text{น้ำหนักเจลปลาก่อนทับ} \times 100$$

4.5 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของลูกชิ้นปลาผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยวิธีทดสอบความชอบ (9-point hedonic scale) ในคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบรวม โดยคะแนน 9 คือ ชอบมากที่สุด และคะแนน 1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด ใช้ผู้ทดสอบทั่วไปจำนวน 30 คน (แบบไม่เจาะจง) โดยเตรียมตัวอย่างลูกชิ้นปลาด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นบรรจุลูกชิ้นปลาลงในถ้วยพลาสติกใสชนิดมีฝาปิด ถ้วยละ 1 ลูก ก่อนนำมาเสิร์ฟให้ผู้ทดสอบเป็นรายบุคคล การทดสอบดำเนินการภายในห้องปฏิบัติการทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยผู้วิจัยชี้แจงขั้นตอนและวิธีประเมินให้ผู้ทดสอบทราบก่อนเริ่มการทดสอบ จากนั้นจึงเสิร์ฟตัวอย่างลูกชิ้นปลาทีละรหัสในลำดับที่สุ่ม เพื่อประเมินความชอบตามแบบประเมินคะแนนที่กำหนด

คัดเลือกสูตรลูกชิ้นปลาผสมจำนวน 1 สูตร โดยพิจารณาคัดเลือกจากผลการวิเคราะห์คุณภาพของเจลปลาและคุณภาพทางประสาทสัมผัสเพื่อใช้สำหรับการศึกษาในขั้นตอนต่อไป โดยกำหนดเกณฑ์การคัดเลือกเป็นสูตรที่มีคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสที่ดีและมีคะแนนทดสอบทางประสาทสัมผัสสูงที่สุด

5. ศึกษาการยอมรับของผู้บริโภค

ผลิตลูกชิ้นปลาผสมตามสภาวะที่คัดเลือกได้จากข้อ 4 จำนวน 1 สูตร นำไปทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคทั่วไป จำนวน 100 คน (แบบไม่เจาะจง) โดยสอบถามถึงทัศนคติที่มีต่อผลิตภัณฑ์ ระดับความชอบด้วยวิธีทดสอบความชอบ (9-point hedonic scale) และการยอมรับของผู้บริโภคต่อลูกชิ้นปลา

6. ศึกษาคุณภาพของลูกชิ้นปลาผสม

ผลิตลูกชิ้นปลาผสมตามสูตรที่คัดเลือกได้จำนวน 1 สูตร นำไปวิเคราะห์คุณภาพดังนี้

6.1 องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และคาร์โบไฮเดรต [12]

6.2 ค่าความขาว

6.3 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด [13]

6.4 คุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ พลังงานทั้งหมด ไขมันทั้งหมด ไขมันอิ่มตัว คอเลสเตอรอล น้ำตาลทั้งหมด โซเดียม โพแทสเซียม ตามวิธี [14] และแคลเซียม ตามวิธี AOAC [12]

7. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ completely randomized design (CRD) ในการศึกษาคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส ความขาว และ expressible water ของเจลปลา และวางแผนการทดลองแบบ randomized complete block design (RCBD) ในการศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของลูกชิ้นปลาผสม วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p<0.05$) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) สำหรับการศึกษาการยอมรับของผู้โภค ในส่วนของข้อมูลทั่วไป การยอมรับผลิตภัณฑ์ การตัดสินใจซื้อ คำนวณเป็นค่าร้อยละ ส่วนการทดสอบความชอบและคุณภาพของลูกชิ้นปลาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลของอัตราส่วนเนื้อปลาสวายและปลานิลต่อสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเจลปลา

การทดสอบเนื้อสัมผัสของเจลปลาโดยวิธี puncture test และ texture profile analysis (TPA) ซึ่งเป็นการประเมินคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยวิธี puncture test เป็นการวัดแบบเจาะทะลุซึ่งวัดความหนาแน่นและความอัดแน่นของโครงข่ายสามมิติของเจลโปรตีนที่เกิดจากการรวมตัวของโปรตีน (protein aggregation) ขณะที่วิธี TPA เป็นการวัดการกดตัวอย่างซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อประเมินคุณสมบัติการเกาะตัวของเจลโปรตีน [15] ผลการทดสอบด้วยวิธี puncture test (Table 1) พบว่า เจลปลาสวายล้วนมีค่า breaking force, breaking distance และ gel strength สูงกว่าเจลปลานิลล้วนอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยเจลปลานิลล้วนมีค่า gel strength ค่อนข้างต่ำ (39.40±14.38 กรัม·เซนติเมตร) การผสมเนื้อปลาสวายกับเนื้อปลานิลในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า เจลปลาผสมที่อัตราส่วน 25:75 (40/90°C) และ 75:25 (60/90°C) มีค่า breaking force, breaking distance และ gel strength สูงสุด ($p<0.05$) เมื่อเทียบกับเจลปลาผสมอัตราส่วนอื่น ๆ และเจลปลานิลล้วน แต่มีค่าดังกล่าวไม่แตกต่างจากเจลปลาสวายล้วน ($p>0.05$) โดยเจลปลาผสมที่อัตราส่วน 25:75 (40/90°C), 50:50 (60/90°C) และ 75:25 (60/90°C) มีค่า breaking force สูงกว่าเจลปลานิลล้วน ($p<0.05$) ขณะที่เจลปลาผสมที่อัตราส่วน 50:50 และ 75:25 ที่ 40/90°C และเจลปลาผสมที่อัตราส่วน 25:75 และ 50:50 ที่ 60/90°C มีค่า breaking distance และ gel strength ต่ำกว่าเจลปลาผสมที่อัตราส่วน 25:75 (40/90°C), 75:25 (60/90°C) และเจลปลาสวายล้วน ($p<0.05$) แต่ไม่แตกต่างจากเจลปลานิลล้วน ($p>0.05$)

จากผลการทดลองจะเห็นว่า เจลปลานิลล้วนมีค่า breaking force, breaking distance และ gel strength ต่ำที่สุด เนื่องจากเนื้อปลานิลที่ใช้ผ่านการแล่และแช่น้ำแข็ง 15 ชั่วโมงก่อนเตรียมเจล ความสดของปลาและชนิดของปลามีผลต่อคุณภาพและความสามารถในการเกิดเจล [16] เจลโปรตีนของปลานิลมีค่าความแข็งแรงเจลต่ำซึ่งแสดงให้เห็นว่า โปรตีน

ของปลานิลมีความสามารถในการเกิดเจลต่ำ ซึ่งอาจเกิดเอนไซม์โปรตีเอสในเนื้อปลานิลเกิดการย่อยโปรตีนมากก่อน เมื่อนำมาผ่านการล้างน้ำด้วยน้ำเกลือร้อยละ 0.3 (w/v) แม้ว่าจะช่วยขจัดโปรตีนซาร์โครพลาสมิก (sarcoplasmic protein) ซึ่งเป็นแหล่งของเอนไซม์โปรตีเอสส่วนใหญ่ออกไปได้ แต่ไม่สามารถขจัดเอนไซม์กลุ่ม myofibrillar type proteinase ออกไปได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Suwansakornkul [17] ซึ่งรายงานว่า การล้างเนื้อปลาบดไม่ได้มีส่วนช่วยปรับปรุงความแข็งแรงเจลในปลาปากคม แต่กลับแสดงผลในการส่งเสริมการทำงานของ myofibrillar type proteinase ต่อการสลายตัวของ myosin heavy chain ของเจลปลา Maeso และ Wanieso ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากการทดลองเจลปลาผสมที่อัตราส่วน 25:75 ให้ความร้อนที่ 40/90°C (อุณหภูมิเซ็ทตัวที่เหมาะสมของปลานิล) มีค่า breaking force, breaking distance และ gel strength เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเกิดจากผลของการเสริมกันระหว่างโปรตีนจากปลาทั้งสองชนิด ซึ่งอาจช่วยเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ และช่วยปรับปรุงการจับกันระหว่างโปรตีนกับโปรตีน [6] นอกจากนี้ ค่าเนื้อสัมผัสดังกล่าวที่เพิ่มขึ้นของเจลปลาผสมที่อัตราส่วน 25:75 ซึ่งมีปริมาณปลานิลร้อยละ 75 นั้น อาจเกิดจากเอนไซม์ทรานกลูทามิเนส (tranglutaminase; TGase) ในเนื้อปลานิลบางส่วนที่ยึดเหนี่ยวกับโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ไม่ได้ถูกกำจัดออกไประหว่างการล้างเนื้อปลาบด ซึ่งการทำงานของเอนไซม์ TGase ในกล้ามเนื้อปลานิลมีกิจกรรมที่สูงและมีกิจกรรมสูงสุดที่อุณหภูมิช่วง 40-50 องศาเซลเซียส [18] โดยเอนไซม์ TGase จะช่วยสร้างพันธะที่ทำให้เจลโปรตีนมีความแข็งแรงมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การผสมเนื้อปลาสวายตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไป (ที่สภาวะ 40/90°C) ทำให้เจลปลาผสมมีความแข็งแรงเจลลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า โปรตีนปลาสวายสามารถเกิดเจลได้ค่อนข้างต่ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ จักรินทร์ ตรีอินทอง และคณะ [19] ที่รายงานว่า เนื้อปลาสวายบดไม่สามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงความคงตัวของโปรตีนปลาสวายต่อความร้อน (thermal stability) ทำให้โปรตีนปลาสวายที่อุณหภูมิดังกล่าวอาจจะยังไม่เกิดการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนและไม่เกิดการคลายเกลียวของโปรตีน ส่งผลให้โมเลกุลโปรตีนของเนื้อปลาสวายไม่สามารถจับกันได้เพื่อสร้างโครงข่ายสามมิติที่จับน้ำไว้ภายใน ทำให้ค่าความแข็งแรงเจลลดลง ขณะที่สภาวะการให้ความร้อน 60/90°C พบว่า เจลปลาผสมที่อัตราส่วน 50:50 และ 75:25 มีค่า breaking force สูงกว่าเจลปลานิลล้วน ขณะที่ค่า breaking distance และ gel strength มีค่าสูงกว่าเจลปลานิลล้วนที่อัตราส่วน 75:25 โดยเจลปลาผสมที่ใช้เนื้อปลานิลที่อัตราส่วนร้อยละ 25-50 นำไปให้ความร้อนที่ 60/90°C มีค่า breaking force, breaking distance และ gel strength น้อยกว่าเจลปลาสวายล้วน ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าเกิดจากเอนไซม์ myofibrillar type proteinase ในเนื้อปลานิลซึ่งไม่ถูกกำจัดด้วยการล้างน้ำเกลือร้อยละ 0.3 (w/v) และทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ไปทำให้เกิดการสลายตัวของเจลส่งผลให้เจลปลาผสมที่ได้มีความแข็งแรงเจลลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ [20] ที่รายงานว่า ซูริมิที่ผลิตจากปลานิลมีเอนไซม์โปรตีเอสชนิด serine type proteinase ซึ่งมีกิจกรรมการเกิด proteolysis สูงสุดที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส แต่มีผลค่อนข้างน้อยในเจลปลาผสมที่อัตราส่วนปลาสวายต่อปลานิลเท่ากับ 75:25 (ปลานิลร้อยละ 25) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า อัตราส่วนของเนื้อปลามีผลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเจลปลาผสม โดยเจลปลาผสมที่มีอัตราส่วนของปลาชนิดใดมากกว่าและมีการให้อุณหภูมิในการเซ็ทตัวที่เหมาะสมกับชนิดปลานั้นมีแนวโน้มช่วยเพิ่มค่า breaking force, breaking distance และ gel strength เมื่อเปรียบเทียบกับการให้อุณหภูมิในการเซ็ทตัวที่ไม่เหมาะสม

Table 1 breaking force, breaking distance and gel strength of fish gel prepared from unwashed striped catfish mince (UW-SC) and washed Nile tilapia mince (W-NT) at different ratios

Ratios of UW-SC: W-NT (heating condition)	Breaking force (g)	Breaking distance (mm)	Gel strength (g.cm)
0: 100 (40/90°C)	66.97±13.49 ^{d}	5.77±0.92 ^{b}	39.40±14.38 ^{b}
25: 75 (40/90°C)	154.25±15.16 ^{ab}	10.35±1.19 ^{a}	159.69±23.91 ^{a}
25: 75 (60/90°C)	94.37±22.44 ^{cd}	6.77±0.81 ^{b}	65.09±21.35 ^{b}
50: 50 (40/90°C)	103.36±39.69 ^{cd}	7.54±1.86 ^{b}	83.25±48.52 ^{b}
50: 50 (60/90°C)	108.66±22.73 ^{bc}	7.71±1.07 ^{b}	85.72±27.51 ^{b}
75: 25 (40/90°C)	97.34±7.83 ^{cd}	6.83±0.87 ^{b}	66.87±12.03 ^{b}
75: 25 (60/90°C)	146.02±39.29 ^{a}	10.48±1.32 ^{a}	156.55±54.96 ^{a}
100: 0 (60/90°C)	146.93±48.98 ^{ab}	12.18±2.44 ^{a}	188.09±93.64 ^{a}

$^{a-d}$ Mean in the same column with different letters are significantly different ($p<0.05$)

ผลการวิเคราะห์ TPA ของเจลปลาผสม (Table 2) พบว่า เจลปลานิลล้วนมีค่า hardness (522.20 กรัม) และ springiness (0.658) สูงกว่า แต่มีค่า cohesiveness (0.692) น้อยกว่าเจลปลาสวายล้วน ($p<0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเจลปลานิลล้วน มีความแข็งและความยืดหยุ่นมากกว่า แต่มีแรงเกาะตัวภายในเจลน้อยกว่าเจลปลาสวายล้วน โดยค่าความแข็ง (hardness) ที่วัดได้นั้นคือ ค่าแรงที่ใช้ในการทำให้ตัวอย่างเสียรูปซึ่งแสดงถึงแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างระหว่างฟันกรามเพื่อเปลี่ยนรูปร่างตัวอย่าง ขณะที่ความยืดหยุ่น (springiness) คือ ระดับความสามารถในการคืนตัวกลับมาเหมือนเดิมเมื่อมีการถอนแรงกดออกไปจากตัวอย่าง ส่วนค่าการเกาะตัวของเจล (cohesiveness) แสดงถึงความแข็งแกร่งของพันธะภายในที่เกิดขึ้นในตัวอย่างแล้วทำให้ตัวอย่างทนต่อแรงที่มากระทำก่อนที่ตัวอย่างจะขาดหรือแยกออกจากกัน [21] เมื่อนำเนื้อปลาทั้งสองชนิดมาผสมกัน พบว่า เจลปลาผสมที่ทุกอัตราส่วนของทั้งสองสภาวะการให้ความร้อนมีค่า hardness สูงกว่าเจลปลาสวายล้วน ($p<0.05$) ขณะที่เจลปลาผสมที่อัตราส่วน 50:50 (40/90°C), 50:50 (60/90°C) และ 75:25 (40/90°C) มีค่า hardness ไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) และมีค่าสูงกว่าเจลปลานิลล้วน ($p<0.05$) โดยเจลปลาผสมที่อัตราส่วน 75:25 (40/90°C) มีค่า hardness สูงที่สุด (773.04 กรัม) เมื่อพิจารณาค่า cohesiveness พบว่า เจลปลาผสมที่ทุกอัตราส่วนของทั้งสองสภาวะการให้ความร้อนมีค่า cohesiveness ต่ำกว่าเจลปลาสวายล้วน ($p<0.05$) ขณะที่เจลปลาผสมที่อัตราส่วน 25:75 (40/90°C), 50:50 (40/90°C) และ 75:25 (60/90°C) มีค่า cohesiveness สูงกว่าเจลปลานิลล้วน ($p<0.05$) และมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับเจลปลาผสมอื่น ๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่า การผสมเนื้อปลาสวายในอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถช่วยปรับปรุงค่าการเกาะตัวของเจลได้เมื่อเปรียบเทียบกับเจลปลานิลล้วนซึ่งมีค่าการเกาะตัวต่ำสุด ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเติมปลาสวายลงไปช่วยปรับปรุงโครงสร้างเจลปลานิลให้เหนียวและทนทานต่อแรงกดได้ดีขึ้น สำหรับค่า springiness พบว่า เจลปลาผสมที่ทุกอัตราส่วนมีค่า springiness สูงกว่าเจลปลาสวายล้วน ($p<0.05$) ขณะที่เจลปลาผสมที่อัตราส่วน 75:25 (60/90°C) มีค่า springiness สูงกว่าเจลปลานิลล้วนและเจลปลาผสมที่อัตราส่วน 25:75 (40/90°C), 50:50 (40/90°C) และ 25:75 (60/90°C) ($p<0.05$) แต่มีค่าไม่แตกต่างจากเจลปลาผสมที่อัตราส่วน 75:25 (40/90°C) และ 50:50 (60/90°C) ($p>0.05$) การผสมเนื้อปลาทั้งสองชนิดส่งผลดีต่อลักษณะเนื้อสัมผัสเจลโปรตีนปลามากกว่าการใช้เนื้อปลาชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงอย่างเดียว โดย ปลาสวายช่วยเพิ่มค่าการเกาะตัวของเจล ในขณะที่ปลานิลช่วยเพิ่มด้านโครงสร้างความแข็งและความยืดหยุ่นของเจล

Table 2 hardness, cohesiveness and springiness of fish gel prepared from unwashed striped catfish mince (UW-SC) and washed Nile tilapia mince (W-NT) at different ratios

Ratios of UW-SC: W-NT (heating condition)	hardness (g)	cohesiveness	springiness
0: 100 (40/90°C)	522.20±66.34 [c]	0.692±0.062 [e]	0.658±0.052 [b]
25: 75 (40/90°C)	523.93±82.29 [c]	0.814±0.024 [b]	0.682±0.055 [b]
25: 75 (60/90°C)	610.99±174.16 [bc]	0.727±0.069 [de]	0.679±0.105 [b]
50: 50 (40/90°C)	668.66±44.51 [ab]	0.801±0.021 [bc]	0.665±0.056 [b]
50: 50 (60/90°C)	713.30±67.10 [ab]	0.752±0.024 [cde]	0.723±0.052 [ab]
75: 25 (40/90°C)	773.04±99.95 [a]	0.724±0.023 [de]	0.726±0.063 [ab]
75: 25 (60/90°C)	647.47±43.79 [abc]	0.764±0.057 [bcd]	0.817±0.339 [a]
100: 0 (60/90°C)	282.81±101.68[d]	0.883±0.034 [a]	0.562±0.107 [c]

[a-e] Mean in the same column with different letters are significantly different ($p<0.05$)

2. ผลของอัตราส่วนเนื้อปลาสวายและปลานิลต่อค่าความขาวและ expressible water ของเจลปลา

ผลการทดสอบค่าความขาว และ expressible water ของเจลปลาผสม (Table 3) พบว่า เจลปลานิลล้วนมีค่าความขาวมากที่สุด ($p<0.05$) โดยมีค่าความขาวเท่ากับ 85.00 ส่วนเจลปลาสวายล้วนมีค่าความขาวน้อยกว่าเจลปลานิล ($p<0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 82.24 ทั้งนี้เนื่องจากปลานิลเป็นปลาเนื้อขาวและผ่านการเตรียมเนื้อปลาด้วยการล้างเนื้อปลาบด 2 ครั้ง ซึ่งช่วยกำจัดเม็ดสีและเลือดออกไปจากเนื้อปลา ขณะที่ปลาสวายมีเนื้อสีส้มอ่อนอมแดง ไม่ผ่านการล้างเนื้อปลาบด เมื่อนำเนื้อปลาทั้งสองมาเตรียมเจลจึงส่งผลให้เจลปลาผสมมีค่าความขาวลดลงเล็กน้อยตามสัดส่วนเนื้อปลาสวาย โดยเจลปลาผสมมีค่าความขาวอยู่ในช่วง 81.99 - 83.66 สำหรับค่า expressible water (EW) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการอุ้มน้ำของเจล หากค่า EW มีค่าน้อยแสดงว่า เจลมีความสามารถอุ้มน้ำได้ดี น้ำจึงไม่สูญเสียออกมาจากเจลปลาซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับความฉ่ำของเนื้อสัมผัส ผลการทดสอบพบว่า เจลปลานิลล้วนมีค่า EW สูงที่สุด (ร้อยละ 75.65) หมายความว่า เจลมีการสูญเสียน้ำจากเจลมากที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าโครงสร้างเจลปลานิลอาจไม่แข็งแรงสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงเจลของเจลปลานิลล้วนที่มีค่าต่ำ ส่งผลให้ไม่สามารถกักเก็บน้ำไว้ได้ดี ขณะที่เจลปลาสวายล้วนมีค่า EW ต่ำที่สุด (ร้อยละ 61.33) และต่ำกว่าเจลปลานิลล้วน ($p<0.05$) ซึ่งแสดงว่า เจลปลาสวายล้วนสามารถอุ้มน้ำได้ดีกว่าเจลปลานิลล้วน ความสามารถในการอุ้มน้ำที่ดีแสดงถึงความสามารถในการเกิดเจลที่ดีของโปรตีนซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสที่เจลปลาสวายล้วนมีค่าความแข็งแรงเจลและการเกาะตัวสูงกว่าเจลปลานิลล้วน ทั้งนี้ความสามารถในการอุ้มน้ำของเจลโปรตีนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างของเจล โดยเจลที่มีโครงสร้างแข็งแรงกว่าจะสามารถกักเก็บน้ำไว้ได้มากและมีค่า expressible moisture ที่ต่ำ [22] เมื่อนำเนื้อปลาทั้งสองชนิดมาผสมกัน พบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเนื้อปลาสวายทำให้เจลปลาผสมมีค่า EW ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเจลปลานิลล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการผสมเนื้อปลาที่มีความสามารถในการเกิดเจลต่ำกับเนื้อปลาที่มีความสามารถในการเกิดเจลสูงเข้าด้วยกัน การเกิดเจลจะแปรผันตามปริมาณเนื้อปลาที่มีความสามารถในการเกิดเจลต่ำ เนื่องจากโปรตีน ไมโอซินจากปลาที่เกิดซูวาริ (suwari) ได้ต่ำไม่สามารถจับกับโปรตีนไมโอซินจากปลาที่เกิดซูวาริได้ดี [23]

Table 3 Whiteness and expressible water of fish gel prepared from unwashed striped catfish mince (UW-SC) and washed Nile tilapia mince (W-NT) at different ratios

Ratios of UW-SC: W-NT (heating condition)	Whiteness	Expressible water (%)
0: 100 (40/90°C)	85.00±0.83 ^{a}	75.65±3.24 ^{a}
25: 75 (40/90°C)	82.49±0.54 ^{cd}	71.71±2.04 ^{ab}
25: 75 (60/90°C)	82.71±0.98 ^{cd}	63.17±2.30 ^{cd}
50: 50 (40/90°C)	82.97±0.60 ^{bc}	68.24±1.15 ^{bc}
50: 50 (60/90°C)	82.23±0.45 ^{cd}	63.87±5.06 ^{cd}
75: 25 (40/90°C)	83.66±0.21 ^{b}	67.12±3.74 ^{bc}
75: 25 (60/90°C)	81.99±0.69 ^{d}	63.18±1.42 ^{cd}
100: 0 (60/90°C)	82.24±0.45 ^{cd}	61.33±1.90 ^{d}

$^{a-d}$ Mean in the same column with different letters are significantly different ($p<0.05$)

3. ผลของอัตราส่วนเนื้อปลาสวายและปลานิลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของลูกชิ้นปลาผสม

จากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของลูกชิ้นปลาผสมระหว่างเนื้อปลาสวายและเนื้อปลานิลในอัตราส่วนต่าง ๆ (Table 4) พบว่า คะแนนความชอบด้านรสชาติของลูกชิ้นปลาผสมที่อัตราส่วน 25:75 และ 75:25 ในทั้งสองสภาวะการให้ความร้อนได้รับคะแนนความชอบสูงกว่าลูกชิ้นปลานิลล้วนอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) และมีแนวโน้มคะแนนสูงกว่าลูกชิ้นปลาสวายล้วน โดยกลุ่มอัตราส่วนดังกล่าวมีคะแนนเฉลี่ยอยู่ในระดับชอบปานกลาง (7.12 - 7.20 คะแนน) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส และความชอบรวม พบว่า การผสมเนื้อปลาทั้งสองชนิดในทุกอัตราส่วนของทั้งสองสภาวะการให้ความร้อน (40/90°C และ 60/90°C) ไม่มีความแตกต่างกัน ($p>0.05$) โดยได้รับคะแนนอยู่ในช่วงชอบเล็กน้อย ถึง ชอบปานกลาง

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสประกอบกับผลการทดสอบด้านเนื้อสัมผัส พบว่า เจลปลานิลล้วนมีความขาวสูงสุด ให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความแข็งแบบแข็งเปราะ (high hardness, low gel strength) และเจลมีการสูญเสียน้ำหนักง่าย ขณะที่เจลปลาสวายให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความเหนียวและความแข็งแรงเจลดี (high cohesiveness, high gel strength) เจลมีความสามารถกักเก็บน้ำได้ดี แต่มีความขาวน้อยกว่าเจลปลานิลล้วน เมื่อนำเนื้อปลาทั้งสองชนิดมาผสมกันด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า เจลปลาผสมที่ให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความแข็งแรง มีความยืดหยุ่นและเหนียว เจลสามารถอุ้มน้ำได้ดี และมีคะแนนความชอบรวมไม่แตกต่างจากสูตรอื่น ๆ ได้แก่ สูตรลูกชิ้นปลาผสมอัตราส่วน 75:25 ที่ 60/90°C จึงคัดเลือกลูกชิ้นปลาผสมสูตรดังกล่าวเพื่อใช้ในการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อไป

Table 4 Sensory quality of fish ball prepared from unwashed striped catfish mince (UW-SC) and washed Nile tilapia mince (W-NT) at different ratios

Ratios of UW-SC: W-NT (heating condition)	appearance ^{ns}	color ^{ns}	odor ^{ns}	taste	texture ^{ns}	overall liking ^{ns}
0: 100 (40/90°C)	7.76±1.09	7.68±0.94	6.88±1.36	6.24±1.59 ^{b}	7.04±1.37	7.00±1.00
25: 75 (40/90°C)	7.80±1.04	7.80±0.91	6.92±1.11	7.12±1.30 ^{a}	7.60±1.19	7.40±1.15

Ratios of UW-SC: W-NT (heating condition)	appearance ^{ns}	color ^{ns}	odor ^{ns}	taste	texture ^{ns}	overall liking ^{ns}
25: 75 (60/90°C)	7.84±1.03	7.72±0.79	7.16±1.07	7.20±1.50 ^{a}	7.52±0.96	7.52±1.08
50: 50 (40/90°C)	7.68±1.14	7.56±0.82	7.04±1.13	6.80±1.47 ^{ab}	7.28±1.31	7.24±0.97
50: 50 (60/90°C)	7.44±1.36	7.32±1.43	6.68±1.37	6.44±1.76 ^{b}	6.96±1.64	6.96±1.57
75: 25 (40/90°C)	7.60±1.29	7.36±1.32	6.80±1.29	7.20±1.35 ^{a}	7.68±1.18	7.52±1.00
75: 25 (60/90°C)	7.76±1.13	7.56±1.19	7.04±1.31	7.20±1.38 ^{a}	7.32±1.37	7.48±1.23
100: 0 (60/90°C)	7.56±1.58	7.24±1.59	6.32±1.86	6.72±1.72 ^{ab}	7.56±0.77	7.32±1.11

$^{a-b}$ Mean in the same column with different letters are significantly different ($p<0.05$)

^{ns} Mean in the same column are not significantly different ($p>0.05$)

4. **ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อลูกชิ้นปลาเนื้อผสม**

ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค จำนวน 100 คน (Table 5) พบว่า ผู้ทดสอบเป็นเพศหญิงและเพศชายคิดเป็นร้อยละ 51 และ 49 ตามลำดับ ส่วนใหญ่ผู้ทดสอบอยู่ในกลุ่มอายุมากกว่า 20-30 ปี (ร้อยละ 52) รองลงมาคือกลุ่มผู้บริโภคอายุ 41-50 ปี (ร้อยละ 20) กลุ่มอายุ 31-40 ปี (ร้อยละ 16) กลุ่มอายุต่ำกว่า 20 ปี (ร้อยละ 8) และกลุ่มอายุมากกว่า 50 ปี (ร้อยละ 4) ตามลำดับ โดยร้อยละ 65 มีการศึกษาอยู่ที่ระดับปริญญาตรี รองลงมาคือสูงกว่าระดับปริญญาตรีร้อยละ 24 ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มนักเรียน/นักศึกษาร้อยละละ 48 รองลงมา ได้แก่ อาชีพรับราชการ/รัฐวิสาหกิจ (ร้อยละ 26) รายได้ส่วนใหญ่ของผู้ทดสอบร้อยล 38 อยู่ที่น้อยกว่า 5,000 บาทต่อเดือน รองลงมาคือ มีรายได้มากกว่า 20,000 บาทต่อเดือน (ร้อยละ 26) สำหรับผลการทดสอบความชอบ (Table 6) พบว่า ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบในคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบรวมอยู่ที่ระดับชอบปานกลาง (7.06 - 7.64 คะแนน) ขณะที่คะแนนความชอบด้านกลิ่นอยู่ที่ระดับชอบเล็กน้อย (6.71 คะแนน) การยอมรับและการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ของผู้ทดสอบ (Table 7) พบว่า ผู้บริโภคให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ร้อยละ 92 และตัดสินใจซื้อร้อยละ 79 สำหรับเหตุผลในการตัดสินใจซื้อเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย คือ รสชาติอร่อย อยากทดลองบริโภคผลิตภัณฑ์ มีความแปลกใหม่ของผลิตภัณฑ์ มีคุณค่าทางโภชนาการที่ดีต่อสุขภาพ และสะดวกต่อการบริโภค คิดเป็นร้อยละ 26.75 23.57 21.66 16.56 และ 11.46 ตามลำดับ ลักษณะของลูกชิ้นปลาผสมแสดงดัง Figure 1

Table 5 General information of 100 respondents in the survey on consumer attitudes and preferences toward mixed fish ball

	General information	Percentage
Gender	Male	49
	Female	51
Age	< 20 years	8
	20-30 years	52
	31-40 years	16
	41-50 years	20
	>50 years	4
Education level	Primary school – Secondary school	5

	General information	Percentage
	Diploma / Vocational Certificate	6
	Bachelor's degree	65
	Higher than bachelor's degree	24
Occupation	Student/ Undergraduate student	48
	Civil servant / State enterprise employee	26
	Private company employee	2
	Business owner / Self-employed	9
	Others (e.g., Research Assistant, Homemaker)	15
Monthly income	Less than 5,000 Baht	38
	5,001-10,000 Baht	16
	10,001-20,000 Baht	20
	More than 20,000 Baht	26

Table 6 Consumer preference scores of mixed fish ball (n = 100)

Attributes	Average ± standard deviation
Appearance	7.64 ± 1.29
Color	7.55 ± 1.52
Odor	6.71 ± 1.72
Taste	7.06 ± 1.72
Texture	7.29 ± 1.57
Overall liking	7.13 ± 1.67

Table 7 Consumer acceptance and purchase decision of the product with reasons (n = 100)

Factor		Percentage
Product acceptance		
Accept		92
Not accept		8
Purchase decision		
In the case of purchase		79
Because	they wanted to try the product *	23.57
	Easy to consume *	11.46
	Nutritious and beneficial for health *	16.56
	Novelty of the product *	21.66

Factor		Percentage
Delicious taste *		26.75
In the case of not purchasing		21
Because	they disliked the appearance of the product	12
	Unfamiliar with the product *	24
	Unpleasant taste*	52
	Fishy odor *	8
	Unpleasant texture *	4

* Percentage is calculated by dividing the number of responses for a specific reason by the total number of responses, multiplied by 100



Figure 1 Mixed Fish Ball

5. คุณภาพของลูกชิ้นปลาผสม

คุณภาพของลูกชิ้นปลาผสมที่ผลิตได้จากปลาสวายและปลานิล อัตราส่วน 1:3 ให้ความร้อนที่ 60/90°C (Table 8) พบว่า มีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 79.65, 14.81, 0.43, 1.43 และ 2.53 ตามลำดับ ลูกชิ้นปลา 100 กรัม ให้พลังงานทั้งหมด 73 กิโลแคลรี ไขมันอิ่มตัว 0.17 กรัม คอเลสเตอรอล 29.86 มิลลิกรัม ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 1.06 กรัม โซเดียม 62.04 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โพแทสเซียม 313.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และแคลเซียม 43 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม สำหรับค่าความขาว มีค่า 81.99 และมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเท่ากับ 5.70×10^2 CFU/g จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ลูกชิ้นปลาผสมเป็นแหล่งอาหารโปรตีน มีไขมัน คอเรสเตอรอล และโซเดียมต่ำ เหมาะสำหรับผู้บริโภคที่รักสุขภาพ ลูกชิ้นปลาเนื้อผสมที่ได้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค เนื่องจากมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ลูกชิ้นปลา (มผช. 328/2547) ซึ่งกำหนดจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดต้องไม่เกิน 1×10^4 CFU/g [24]

Table 8 Quality of mixed fish ball prepared from UW-SC and W-NT in a 3:1 ratio with heating at 60/90°C

Quality of mixed fish ball	Average ± standard deviation
Moisture (%)	79.65±0.04
Protein (%)	14.81±0.05
Fat (%)	0.43±0.00
Ash (%)	1.43 ±0.02
Carbohydrate (%)	2.53±0.03
Total Energy (kcal/100 g)	73
Saturated fat (g/100g)	0.17
Cholesterol (mg/100g)	29.86
Total sugar (g/100g)	1.06
Sodium (mg/kg)	62.04
Potassium (mg/kg)	313.60
Calcium (mg/100g)	43
Whiteness	81.99 ± 0.69
Total Plate Count (CFU/g)	$5.70x10^2$

สรุปผล

การผสมเนื้อปลาในอัตราส่วนที่เหมาะสมโดยการใช้อุณหภูมิในการเซ็ทตัวที่เหมาะสมกับชนิดปลาช่วยเพิ่มคุณภาพเจลได้ โดยเจลปลาผสมที่อัตราส่วน 25:75 (ที่ 40/90°C) และ 75:25 (ที่ 60/90°C) ให้ค่า breaking force และ gel strength สูงที่สุด ($p<0.05$) เจลที่มีส่วนผสมของเนื้อปลาสวายตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไป ให้ค่า hardness สูงสุด โดยการเติมเนื้อปลาสวายช่วยเพิ่มค่า cohesiveness ของเจล ในขณะที่เนื้อปลานิลช่วยเพิ่มความแข็งและความยืดหยุ่นของเจล การเพิ่มปริมาณเนื้อปลาสวายมีแนวโน้มทำให้ค่าความขาวลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ปลาสวายช่วยให้เจลมีค่า expressible water ลดลง ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการอุ้มน้ำที่ดีขึ้น ทั้งนี้ลูกชิ้นปลาผสมมีแนวโน้มคะแนนความชอบด้านรสชาติสูงกว่าลูกชิ้นปลานิลล้วน โดยสูตรที่เหมาะสมที่สุดคือ ลูกชิ้นปลาอัตราส่วน 75:25 (ปลาสวาย:ปลานิล) ให้ความร้อนที่ 60/90°C เนื่องจากให้เนื้อสัมผัสที่แข็งแรง ยืดหยุ่น เหนียว อุ้มน้ำได้ดี และได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูง เมื่อนำไปทดสอบการยอมรับจากผู้บริโภคทั่วไป (100 คน) พบว่า มีการยอมรับร้อยละ 92 และมีการตัดสินใจซื้อร้อยละ 79 โดยลูกชิ้นปลาผสมมีโปรตีนสูง (ร้อยละ 14.81) แต่มีไขมัน คอเลสเตอรอล และโซเดียมต่ำ มีความปลอดภัยต่อการบริโภค ดังนั้นการผสมเนื้อปลาสวายและปลานิลด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจึงเป็นแนวทางสำหรับการผลิตลูกชิ้นปลาที่มีคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสที่ดีและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีการประมง สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร และ สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำการทดลองครั้งนี้ “งานวิจัยเรื่องนี้ ได้รับการสนับสนุนจากกองทุน ส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ พ.ศ. 2568”

เอกสารอ้างอิง

1. Martín-Sánchez AM, Navarro C, Pérez-Álvarez JA, Kuri V. Alternatives for efficient and sustainable production of surimi: A review. Compr Rev Food Sci Food Saf. 2009; 8(4): 359-374.
2. Suzuki T. Fish and Krill Protein Processing Technology. London: Applied Science Publ; 1981.
3. Buamard N, Singh A, Benjakul S. Improvement of surimi gel quality using protein cross-linker, hydrocolloids and protease inhibitor. Turk J Fish Aquat Sci. 2024; 24: TRJFAS24808. doi:10.4194/TRJFAS24808
4. Panpipat W, Chaijan M, Benjakul S. Gel properties of croaker–mackerel surimi blend. Food Chemistry. 2010; 122(4): 1122-1128.
5. อรทัย เปี่ยมปรีดา, จิราพร รุ่งเลิศเกรียงไกร. การผลิตลูกชิ้นปลาจากเนื้อปลาสองชนิด. อาหาร. 2546: 33(1): 35-44.
6. Yi S, Huo Y, Qiao C, Wang W, Li X. Synergistic gelation effects in surimi mixtures composed of *Nemipterus virgatus* and *Hypophthalmichthys molitrix*. J Food Sci. 2019; 84(12): 3634-3641. doi:10.1111/1750-3841.14761
7. จักรินทร์ ตรีอินทอง, ฤทธิ์ชัย คำโฮง, วนัฐวิน ภูขมร. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นปลาสวาย. วารสารแก่นเกษตร. 2562; 47(พิเศษ2): 461-466. https://ag2.kku.ac.th/kaj/PDF.cfm?filename=742.pdf&id=3797&keeptrack=4
8. จักรินทร์ ตรีอินทอง. การปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนในลูกชิ้นจากปลาน้ำจืด [วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2559.
9. Marine Fisheries Research Department (MFRD). Laboratory Manual on Analytical Methods and Procedures for Fish and Fish Products. Singapore: SEAFDEC; 1987.
10. Lanier TC. Measurement of surimi composition and functional properties. In: Lanier TC, Lee CM, editors. Surimi Technology. New York: Marcel Dekker, Inc.; 1992. p. 123-163.
11. สิตา เบญจไพพงษ์, ณิชกานต์ พุทธิเสาวภาคย์, ภัทิรา สุดเลิศ, วรางคณา สมพงษ์. การผลิตลูกชิ้นปลาเสริมผงกระดูกจากปลาแซลมอน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ววท.). 2564; 29(4): 561-571. doi: 10.14456/tstj.2021.48
12. Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Official Methods of Analysis. 20th ed. Washington, DC: AOAC; 2016.
13. Andrews W. Manual of Food Quality Control. Vol. 4, Rev. 1: Microbiological Analysis. Rome: FAO Food and Nutrition Paper; 1992.
14. Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Official Methods of Analysis. 22nd ed. Washington, DC: AOAC; 2023.
15. Lee CM, Chung KH. Analysis of surimi gel properties by compression and penetration tests. J Texture Stud. 1989; 20(3): 363-377.
16. Yarnpakdee S, Benjakul S, Visessanguan W, Kijroongrojana K. Thermal properties and heat-induced aggregation of natural actomyosin extracted from goatfish (*Mulloidichthys martinicus*) muscle as influenced by iced storage. Food Hydrocoll. 2009; 23(7): 1779-1784. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.03.006

17. Suwansakornkul P. The Gel-Forming Characteristics of Lizardfish. Nippon Suisan Gakk. 1993; 59(6): 1029-1037.
18. Worratao A, Yongsawatdigul J. Cross-linking of actomyosin by crude tilapia (*Oreochromis niloticus*) transglutaminase. J Food Biochem. 2003; 27(1): 35-51. https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2003.tb00265.x
19. จักรินทร์ ตรีอินทอง, วนัฐวิน ภูขมร, ศิวาพร สีดาบุตร. ผลของสภาวะการล้างและการให้ความร้อนต่อสมบัติเจลของปลาสวาย. แก่นแกษตร. 2562; 47(พิเศษ1): 1265-1272. https://ag2.kku.ac.th/kaj/PDF.cfm?filename=109_Fis34.pdf&id=3581&keeptrack=1
20. Yongsawatdigul J, Park JW, Virulhakul P, Viratchakul S. Proteolytic degradation of tropical tilapia surimi. J Food Sci. 2000; 65(1): 129-33. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb15967.x
21. ธัญญาภรณ์ ศิริเลิศ. การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสในอาหาร. Journal of Food Technology, Siam University. 2550; 3(1): 6-13. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/JFTSU/article/view/38437
22. Kim JM, Lee CM, Hufnagel LA. Textural properties and structure of starch-reinforced surimi gels as affected by heat-setting. Food Struct. 1987; 6(1): 11.
23. KIM SH, Carpenter JA, Lanier TC, Wicker L. Setting response of Alaska pollock surimi compared with beef myofibrils. J Food Sci. 1993; 58(3): 531-534. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb04317.x
24. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ลูกชิ้นปลา (มผช. 328/2547). กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม; 2547.

Research Article

Antimicrobial activity of mulberry (*Morus alba*) leave extract against foodborne pathogens in fermented fish (Pla-som)

Nittaya Saengprajak[1], Patcharaporn Tippayawat[2], Kantima Sirisantimethakom[3] and Ratthaphol KraiKlang[4*]

[1]*Doctoral Student in Public Health Program, Faculty of Public Health, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40000 Thailand*

[2]*Department of Medical Technology, Faculty of Associated Medical Science Khon Kaen University, Khon Kaen, 40000 Thailand*

[3]*Department of Public Health, Faculty of Science and Health Technology, Kalasin University, Kalasin, 46230 Thailand*

[4]*Nutrition for Health Program, Faculty of Public Health, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40000 Thailand*

[*]Corresponding author; email: ratthaphol@kku.ac.th

Date Received	Date Revised	Date Accepted
February 10, 2569	February 26, 2026	February 28, 2026

Abstract

Acute diarrhea and food poisoning are caused by the consumption of food or water contaminated with pathogenic microorganisms. These conditions remain major public health problems and are responsible for numerous deaths worldwide each year. Pla-som is a one kind of fermented fish that often contaminated with pathogens from the production process occurred both in raw materials and environments might harmful to the consumers. Pla-som is a traditional fermented fish product that is often contaminated with pathogens during the production process, originating from raw materials and the surrounding environment, which may pose health risks to consumers. This research aimed to evaluate the efficacy of mulberry (*Morus alba*) leave extract from MonPai cultivar in inhibiting the growth of foodborne pathogenic bacteria such as *Bacillus cereus, Escherichia coli, Staphylococcus aureus,* and *Salmonella* spp. in pla-som. The results revealed that ethanolic extract, aqueous extract, and powdered leaves of the MonPai cultivar at a concentration of 100 µg/g exhibited antibacterial activity. The most pronounced inhibitory effect was observed against *S. aureus* in 100 g of pla-som, with statistically significant differences ($P < 0.05$). The colony counts were 213 ± 80.83, 300 ± 95.40, and 340 ± 70.00 CFU/g, respectively. The inhibition percentages were 52.67%, 33.33%, and 24.44%, respectively. In summary, incorporating mulberry leaf extracts into fermented fish products prior to consumption may help inhibit pathogenic bacteria in the gastrointestinal tract and reduce the risk of diarrhea and food poisoning associated with the consumption of raw fermented fish.

Keywords: Mulberry leave, Antibacterial, Fermented fish, Food safety, *Staphylococcus aureus*

Introduction

The contamination of food and water with pathogenic microorganisms at any point in the food chain, from production to consumption, is a significant contributor to diarrheal diseases. These illnesses account for 20–40% of all food and waterborne diseases, with up to 80% of cases attributed to the use of contaminated water and inadequate hygiene practices during processing and washing [1]. This issue is particularly critical in the production of fermented foods, where cleanliness and safety rely heavily on ingredient quality, sanitary preparation practices, and proper fermentation techniques [2]. Reports have identified cases of bacterial infections associated with the consumption of fermented foods. Pathogens commonly linked to these infections include *Bacillus cereus*, *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., *Escherichia coli* O157:H7, *Staphylococcus aureus*, *Vibrio cholerae*, *Listeria monocytogenes*, *Aeromonas* spp., *Klebsiella* spp., *Campylobacter* spp., and *Shigella* spp. [3]. Addressing these microbial risks is essential to ensure the safety and quality of fermented foods, as they are a significant part of the global diet and cultural heritage.

In northeastern Thailand, fermented meat products such as naem, pla-som, and pla-ra are traditional delicacies but are often at risk of contamination with pathogenic microorganisms. This contamination originates from raw meat and spreads throughout the production process, from raw materials to the final consumers. The cleanliness and safety of these fermented foods depend on the quality of raw materials, hygienic preparation practices, proper cooking, and adherence to appropriate fermentation times [4].

To ensure food safety, the Bureau of Quality and Safety of Food, Ministry of Public Health, has established guidelines for acceptable levels of pathogenic bacterial contamination in fermented fish products. These include *E. coli* at less than 3 MPN/g, *S. aureus* at less than 100 CFU/g, *B. cereus* at less than 1,000 CFU/g, *Clostridium perfringens* at less than 1,000 CFU/g, and the absence of *Salmonella* spp. in 25 g of food [5]. Ensuring compliance with these standards is critical to minimizing the risks of foodborne illnesses associated with fermented foods.

Chemical preservatives are commonly added during the food production process to prevent contamination by pathogenic microorganisms and to inhibit food spoilage. While these chemicals effectively reduce the incidence of foodborne diseases, their repeated or excessive use can result in residues in food and across the food chain. Furthermore, environmental microorganisms and pathogenic bacteria may develop resistance to these chemicals, leading to adverse effects on human health. As a result, the development and use of natural preservatives that are safe for both human health and the environment have gained significant attention.

Globally, plant extracts are frequently used in foods to inhibit the growth of pathogenic bacteria such as *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*, and *S. aureus* [6-8]. Recent studies highlight the antimicrobial properties of *Morus alba* Linn. leaf extracts, which have been shown to inhibit the growth of various microorganisms, including *S. aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Candida albicans*, *C. krusei*, *C. tropicalis*, and *Aspergillus flavus* [9]. Additionally, specific bioactive compounds extracted from various parts of *M. alba* demonstrate antimicrobial activity. For instance, polysaccharides from *M. alba* leaves can inhibit the growth of *Bacillus subtilis*, *E. coli*, and *S. aureus* [10]. Oxyresveratrol from the branches of *M. alba* inhibits *S. aureus* [11], and 1-deoxynojirimycin from *M. alba* leaves inhibits *S. aureus*, *Aspergillus niger*, and *Penicillium* spp. [12]. These findings underscore the potential of *M. alba* extracts as natural antimicrobial agents for use in food preservation.

Abdeldaiem et al. [13] investigated the impact of mulberry leaf extract on the quality of minced beef and found that incorporating mulberry leaves enhanced the meat's quality, demonstrating its potential as a natural preservative for meat products. Abdel-Khalek and Mattar [14] explored the biological activities of mulberry by-

products and their potential as natural food additives and nutraceuticals. Their study revealed that mulberry by-products are rich in phenolic compounds (5.97 mg/g DW) and flavonoids (5.61 mg/g DW), exhibiting strong antibacterial properties. Moreover, the ethanolic and water crude extracts of MonPai mulberry cultivar showed the best inhibitory effects, with minimum inhibitory concentrations (MIC) that could inhibit the growth of *S. aureus* and *B. cereus*. The minimum bactericidal concentrations (MBC) for *S. aureus* and *B. cereus* were in the range of 25.0-50.0 mg/ml and 3.1-12.5 mg/ml, respectively. When crude extracts from MonPai mulberry cultivar at a concentration of 50.0 mg/ml were used in the post-fermentation process of pla-ra for 28 days, they effectively reduced the overall bacteria count and *B. cereus*, while moderately inhibiting the growth of *S. aureus* [15]. The study showed a significant reduction in the overall bacterial count and *B. cereus* and moderate inhibition of *S. aureus*. These findings highlight the potential of mulberry leaf extracts as natural antimicrobial agents for use in food preservation and safety.

With the previous studies, we aimed to study the efficacy of leaf extracts from MonPai cultivar in inhibiting the growth of foodborne pathogenic bacteria such as *B. cereus, E. coli, S. aureus,* and *Salmonella* spp. in pla-som. The findings from this study will be applied to develop standard community product formulas for pla-som to prevent and reduce the risk of diseases caused by pathogenic bacteria in fermented foods. In addition, *M. alba* extracts might be included as an ingredient in the production of safer food in the future, which this approach could offer a healthier alternative to synthetic additives, aligning with growing consumer demand for natural food ingredients.

Objectives

To evaluate the efficacy of mulberry (*Morus alba*) leave extract from MonPai cultivar in inhibiting the growth of foodborne pathogenic bacteria, including *Bacillus cereus*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, and *Salmonella* spp., in pla-som.

Methodology

Mulberry Leaves Collection

MonPai mulberry cultivar was selected based on the study by Tianyam et al. [15] which found that MonPai mulberry cultivar exhibited the best antimicrobial properties. The leaves were collected from the Chalermphrakiat Sericulture Station in Khon Kaen Province, aged between 1 year to 1 year and 5 months, during November 2020 to February 2021, between 09.00 and 10.00 AM. Tender leaves, particularly 1-3 leaves from the top of each plant, were randomly collected, constituting 15% of the total 150 mulberry trees, equivalent to 23 trees by random selection. Prior to analysis, the leaves were washed twice thoroughly with tap water, dried in a hot air oven at 50°C for 3 hours, ground by using blender, and then vacuum-sealed and stored at -20°C until further experimental used [16].

Mulberry Leaf Extraction

The ground leaves were extracted with water and 95% ethanol following the protocol. For ethanolic extraction, the grounded leaves were soaked in 95% ethanol at a ratio of 1:6 (w/v), fully submerged, and left for 7 days at room temperature. During the extraction process, the extraction bottle was shaken for 15 minutes each day to influence the extraction yield. Afterward, the solution was filtered using No. 1 filter paper, and the solvent part

was collected and evaporated using a rotary vacuum evaporator at 40-50ºC. The extract was then freeze-dried until it turned into a powder then weighed and stored at 4ºC [17]. In case of water extraction, the ground leaves were soaked in hot water (60 ºC) for 2 hours at a ratio of 1:5 (w/v). The solution was then filtered to collect the solvent part, freeze-dried until became powder then weighed and stored at 4ºC [15].

Fermented fish (pla-som) preparation

After testing the antioxidant and bacterial inhibition properties of mulberry leaf extracts, the most effective bacterial inhibitory extract cultivar was tested on pla-som in independent three replicated experiments. The experimental procedure included fermenting pla-som according to the ingredient composition: 500 grams of grounded fish, 10% salt, 10% garlic, 10% sticky rice, and 2% monosodium glutamate (MSG), mixed them together and incubated at room temperature for 3 days. Then, pla-som were randomly selected and divided into three fractions, each weighing 100 g. The first fraction was mixed with 1% (w/w) of powdered mulberry leaf, the second fraction was mixed with 0.1 % (w/w) of ethanolic mulberry leaf extract, and the third fraction was mixed with 0.1 % (w/w) of water mulberry leaf extract (Figure 1). Pla-som with powdered and two kind of extracts were incubated for 1 hr then inhibitory effect of on the growth of pathogenic bacteria were tested.

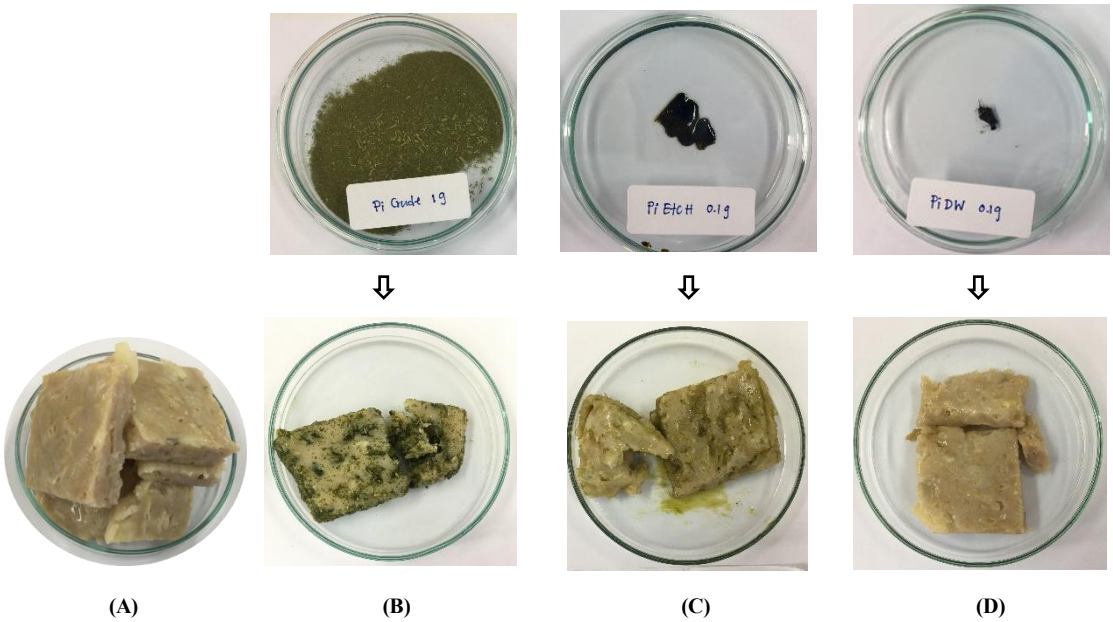


Figure 1 Additive of each fraction mulberry leave extracted in pla-som.
(A) control pla-som. (B) pla-som added with 1% (w/w) of powdered mulberry leaf. (C) pla-som added with 0.1 % (w/w) of ethanolic mulberry leaf extract. (D) pla-som added with 0.1 % (w/w) of water mulberry leaf extract.

Pathogenic Microbial Contaminated investigation

The contaminated of total and pathogenic bacteria in pla-som, which are *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* and *Salmonella* spp., were investigated by using Bacteriological Analysis Manual; BAM [18]. In brief, weigh 25 grams of each group of samples. Then the samples were transferred into a sterile plastic bag. Totally of 225 ml of Butterfield's phosphate buffered dilution water (BPB) was poured and mixed the samples well as 300 rpm stomacher for 2 minutes (this sample was diluted to 1:10).

Analysis of *Escherichia coli*

Step 1: presumptive phase is the detection of coliform bacteria by pipetting 1 ml of 1:10 diluted sample into 9 ml of the lauryl tryptose broth culture (LSB) medium (Himedia, India) containing the gas trap tube and made 10 folds dilution which started from 1:100 to 1:10,000 for each three replications. All of them were incubated at 35°C for 24 ± 2 hr then selected only gas production tube to confirm in step 2.

Step 2: confirmation phase for fecal coliform or *E. coli* confirmation by transferred 1 loop from gas production LSB tubes into *Escherichia coli* (EC) broth (Himedia, India) culture medium containing tube to tube gas trap. Then incubated at 44.5°C for 24 ± 2 hr. Only acids and gases production tubes were confirmed with step 3. In cases of no gases and acids production, they were incubated until 48 ± 2 hr and reported the results as Most Probable Number (MPN) of *E. coil* by compared with the MPN table.

Step 3: complete phase examination for *E. coli* by using a loop to transferred positive EC broth culture tube to streak on the eosin methylene blue (EMB) agar (Himedia, India) culture medium. The medium agar plates were incubated at 35°C for 18-24 hr. The positive colonies were examined the black color at the middle of the colony which both produced or not produced metallic sheen. The suspected colonies were transferred into the nutrient broth and incubated at 35°C for 18-24 hr. Totally 1 loop was transferred into methyl red and voges-proskauer (MR-VP) medium (Himedia, India), sulfur-indole-motility (SIM) medium (Himedia, India), and simmon citrate agar (Himedia, India) for exploring the MR-VP test, indole generation, and citrate use as a carbon source testing, respectively.

Analysis of *Staphylococcus aureus*

A total of 0.1 ml of the diluted sample (1:10) was transferred onto 2 separated baird-parker (BP) agar (Difco, USA) plates then spread evenly until the agar surface dried. The agar plates were incubated at 35-37°C for 45-48 hr. Only the colonies with gray to black round shape with convex as a size 2-3 mm had been counted. To confirmed by biochemical techniques, at less 5 positive colonies were transferred into brain heart infusion (BHI) broth (Himedia, India) and incubated at 35-37°C for 18-24 hr. The coagulase plasma (rabbit) (Himedia, India) with EDTA 0.5 ml was added and mixed virtuously then incubated at 35-37°C. A clotted formation in tube was observed regularly within 6 hr.

Analysis of *Bacillus cereus*

Approximately, 0.1 ml of the diluted sample (1:10) was transferred onto 2 separated mannitol-egg yolk-polymyxin B (MYP) agar (Difco, USA) plates then spread evenly until the agar surface dried. The agar plates were incubated at 30°C for 16-24 hr. A plate with 15-150 colonies growth was selected and counted by characterized only pink with turbid zones colony. Therefore, if the colonies were not classified, incubated more 24 hr might be helpful. Around 5 positive colonies were transferred onto nutrient agar (NA) slant (Himedia, India) and incubated at 30°C for 24 hr. then confirmed by biochemical techniques which were nitrate reducing test, acetyl methyl carbinol generation test, and lecithin degradation test.

Analysis of *Salmonella* spp.

Totally, 1 ml of diluted sample (1:10) was transferred into 10 ml of selenite cystine broth (Himedia, India) and incubated at 37°C for 18 ± 2 hr., then streaked onto xylose lysine deoxycholate (XLD) agar (Himedia, India) and *Salmonella Shigella* (SS) agar (Himedia, India). The agar plates were incubated at 35°C for 24 hr. For XLD agar, the positive colonies were characterized as a pink color with or without a black dot at the center of colony. Whereas, SS agar must be a clear colony forming and presented a black dot at the center of colony, reflected from

H_2S production. The positive colonies from both agar types were confirmed by cultured in triple sugar iron (TSI) agar (Himedia, India), lysine decarboxylase (LDC) medium (Himedia, India), urea medium (Himedia, India), and simmon citrate medium (Himedia, India).

Statistics analysis

The results were present mean±standard deviation (S.D.) of three replicated experiments. The comparison the differences of antibacterial activity between control and extraction method of mulberry in pla-som by using one-way ANOVA and Duncan'mutiple range test. A P-value as 0.05 was required for statistical significance. Data was analyzed using SPSS Software for Windows, Version 23.

Results and Discussion

Extract yield in mulberry leaf

After extraction using a rotary evaporator, the yields from the ground mulberry leaves were 4.72% for the ethanolic extract and 15.56% for the water extract. The higher yield obtained from water extraction is likely attributable to the high polarity of water, which facilitates the dissolution of a wide range of water-soluble constituents, including phenolic compounds, sugars, proteins, and organic acids [19]. However, previous studies conducted by our research group demonstrated that ethanol is a more efficient solvent for extracting bioactive compounds, yielding higher total phenolic and flavonoid contents than water extraction [15]. Phenolic and flavonoid compounds, classified as polar phytochemicals, are known to exhibit antibacterial activity by disrupting bacterial cell walls or inhibiting essential bacterial functions [20, 21], flavonoids, acting as antioxidants, might reduce oxidative stress in bacteria, potentially allowing certain bacteria, such as gut microbiota in animals, to proliferate [22].

The effect of mulberry leaf extracts on inhibiting of pathogenic bacteria growth in pla-som

The mulberry leaf extracts demonstrated the ability to inhibit the growth of pathogenic bacteria in pla-som. The overall bacterial contamination and *S. aureus* counts were reduced, whereas *E. coli* and *B. cereus* counts increased Notably, *Salmonella* spp. were detected in all samples. The total microbial contamination in the control sample (pla-som without extract) was $7.17\pm2.32\text{x}10^7$ colony-forming units per gram (CFU/g). In contrast, pla-som treated with ethanolic extract, water extract, and powdered mulberry leaves exhibited significant reductions in total microbial counts to $2.02\pm0.67\text{x}10^7$, $2.09\pm0.96\text{x}10^7$, and $4.07\pm1.78\text{x}10^7$ CFU/g, respectively. Although the aqueous extract showed a higher extraction yield, its antimicrobial efficacy was lower than that of the ethanolic extract. This suggests that a higher extraction yield does not necessarily correspond to greater biological activity, as it may reflect the extraction of a larger amount of total soluble constituents rather than a higher concentration of specific bioactive compounds responsible for antimicrobial effects. The inhibitory effects of ethanolic and water extracts on the total microbial counts were statistically significant ($P<0.05$) (Table 1).

Table 1 The comparison of effect of mulberry leaf extraction method on the total and pathogenic bacteria in pla-som.

Extraction method of Mulberry leaf	Total bacteria** (CFU/g)	*E. coli*ns (MPN/g)	*S. aureus*** (CFU/g)	*B. cereus*ns (CFU/g)	*Salmonella* spp. in 25 g ns
Day0	5.73±0.91x10^{5}	466±238	3200±1802	0±0.00	detected
Day3*					
Control	7.17±2.32x10^{7b}	553±487.58^{a}	450±26.46^{b}	1870±1630^{ab}	detected
Powdered	4.07±1.78x10^{7a}	913±1011.20^{a}	340±70.00^{ab}	5500±4920^{b}	detected
Ethanolic	2.02±0.67x10^{7a}	1133±1150.36^{a}	213±80.83^{a}	100±170^{a}	detected
Water	2.09±0.96x10^{7a}	1433±2482.61^{a}	300±95.40^{a}	0±0.00^{a}	detected

Remark: * The comparison was performed only in Day3, ** Different superscript lowercase letters in the same row indicate a statistically significant difference (P<0.05), ns = non-significance difference at P>0.05

The contamination of *E. coli* in pla-som treated with powdered mulberry leaves, ethanolic extracts, and water extracts increased to 913±1011.20, 1133±1150.36, and 1433±2482.61 MPN/g, respectively (Table 1). The effect of mulberry leaf extracts on inhibiting *E. coli* growth was not statistically significant (P>0.05).

E. coli is a gram-negative bacterium with a complex cell wall structure that includes lipopolysaccharides (LPS) in the outer membrane [23]. The LPS layer enhances its resistance to antimicrobial compounds. While mulberry leaf extracts have demonstrated effectiveness against gram-positive bacteria, their interaction with gram-negative bacteria, particularly *E. coli*, revealed limited inhibitory effects. The complex cell wall structure of gram-negative bacteria, including an outer membrane which supports that gram-negative bacteria possess a robust outer membrane that can serve as a barrier against antibacterial agents [24], including those present in mulberry leaf extracts.

Interestingly, the observed increase in *E. coli* contamination might be attributed to the flavonoid antioxidants present in mulberry leaf extracts. These antioxidants could potentially reduce oxidative stress in *E. coli,* thereby strengthening the bacterial cells and enabling them to better withstand adverse conditions. This is consistent with the findings of Wang et al. [22] who reported an increase in *E. coli* populations in the ruminal and abomasal digesta of calves following the addition of mulberry leaf flavonoids (MLF).

However, the precise mechanism underlying the relationship between antioxidants and the proliferation of *E. coli* remains unclear. Further research is necessary to elucidate the interaction between flavonoid antioxidants and the growth of *E. coli,* particularly in the context of probiotics and other beneficial microorganisms.

The contamination of *S. aureus* in the control sample was 450±26.46 CFU/g. After incubating pla-som with powdered mulberry leaf and two types of extracts for 1 hour, a decrease in *S. aureus* growth was observed. The counts were 213±80.83 CFU/g for the ethanolic extract, 300±95.40 CFU/g for the water extract, and 340±70.00 CFU/g for the powdered mulberry leaf, with inhibition activities of 52.67%, 33.33%, and 24.44%, respectively. These results showed statistical significance (P< 0.05) (Table 1). While both water and ethanolic extracts effectively reduced *S. aureus* counts, they were unable to lower the contamination to below the acceptable limit of 100 CFU/g, as defined by the Bureau of Quality and Safety of Food [5]. This limitation may be attributed to the short reaction time between the mulberry leaf extracts and the bacteria in pla-som. Future studies should consider extending the reaction time to enhance the antimicrobial efficacy of mulberry leaf extracts against *S. aureus.* This could help achieve a more substantial reduction in bacterial contamination, potentially meeting regulatory safety standards.

The contamination of *B. cereus* in the control sample was 1870±1630 CFU/g CFU/g. The antibacterial activity of the water and ethanolic extracts of mulberry leaves in pla-som demonstrated the most significant reduction. Both water and ethanolic extracts successfully reduced *B. cereus* contamination to below the acceptable levels of pathogenic bacteria in fermented fish (< 1,000 CFU/g) [5]. However, pla-som mixed with powdered mulberry leaves did not significantly reduce the *B. cereus* count (Table 1). The antibacterial activity of mulberry leaf extracts on inhibiting *B. cereus* growth after adding ethanolic and water extracts in pla-som was not statistically significant ($P>0.05$).

The detection of *Salmonella* spp. in both control and treated samples suggested that the current approach using mulberry leaf extracts may have limited efficacy against this pathogen under the conditions tested. This finding is consistent with previous reports indicating that plant-derived flavonoids often exhibit stronger antimicrobial activity against gram-positive bacteria than gram-negative bacteria [25]. The reported of Thabit et al. [26] revealed the antimicrobial activities of plant extracts, particularly flavonoids extracted using methanol. It was found that flavonoid aglycones exhibited greater antimicrobial activity compared to their glycosidic counterparts. Among these compounds, quercetin and its analogs were identified as particularly effective, acting through the inhibition of DNA gyrase, an enzyme crucial for bacterial DNA replication. However, the effectiveness of these extracts was observed to be greater against gram-positive than gram-negative bacteria. Therefore, further investigation is warranted to evaluate alternative extraction methods, higher concentrations, or combination treatments to improve efficacy against Salmonella spp. and other gram-negative foodborne pathogens.

The efficacy of mulberry leaf extracts in inhibiting the growth of pathogenic bacteria in pla-som was observed. The mulberry leaf extracts showed inhibitory effects against all tested bacteria, including *S. aureus* and *B. cereus* in pla-som. The most effective inhibition of total bacterial counts in pla-som was achieved using mulberry leaf extracts with ethanol and water as solvents, respectively. The best inhibition against *S. aureus* was observed with mulberry leaf extracts using ethanol and water solvents, as well as the crude fraction. Regarding the inhibition of *B. cereus* in pla-som, the mulberry leaf extracts with ethanol and water solvents successfully inhibited bacterial growth, though the reduction in bacterial counts was not statistically significant at the 0.05 level. Abdeldaiem et al. [13] revealed that the application of mulberry leaf extract in minced beef significantly contributes to food safety and preservation. This study demonstrated the efficacy of methanolic mulberry leaf extract in reducing bacterial counts, including *S. aureus, B. cereus, E. faecalis*, and *E. coli.* It highlights the potential of natural plant extracts as effective antimicrobial agents in meat products. Mulberry leaf extracts are effective in inhibiting the growth of the gram-positive pathogenic bacteria *S. aureus* and *B. cereus*, consistent with previous studies [15], which found that mulberry leaf extracts inhibit gram-positive bacteria. These extracts contain high levels of phenolic and flavonoid compounds from mulberry leaves. Among these, derivatives of quercetin, kaempferol, and rutin are prominent. Quercetin derivatives, in particular, are effective in inhibiting the growth of *S. aureus*. The antimicrobial properties of flavonoids are closely related to their structure, with phenolic and flavonoid compounds contributing to their antimicrobial activity [26]. However, the precise mechanism of how these compounds inhibit gram-positive bacterial growth remains unclear. Future studies should investigate the effects of these compounds on bacteria, particularly focusing on disrupting the cell membrane or interfering with essential metabolic pathways [27].

The particle size of powdered and extracted mulberry leaves significantly impacts bacterial inhibition. Smaller particles, due to their larger surface area, interact more effectively with bacterial cell walls, resulting in

enhanced bacterial inhibition. Additionally, smaller-sized mulberry leaf extracts not only have higher antioxidant levels but also provide more effective bacterial growth inhibition [28, 29]. This study also demonstrated that using water and ethanol for extraction—both of which evaporate easily—along with incorporating mulberry leaf powder into pla-som, is practical for food applications.

Summary

The study demonstrated that leaf extracts of MonPai mulberry cultivar effectively inhibit the growth of pathogenic bacteria in pla-som, a traditional fermented fish from northeastern Thailand. Extracts from the MonPai mulberry cultivar, including ethanolic, water, and powdered forms, significantly reduced *S. aureus* and *B. cereus* counts ($P<0.05$). Future research should explore extended fermentation times to enhance bacterial reduction and ensure compliance with food safety standards. Mulberry leaf extracts have the potential to improve food safety and reduce reliance on synthetic preservatives.

References

1. WHO. Food Safety [internet]. 2024 [cited 2024 December 29]. Available from: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/food-safety.
2. Hoffmann V, Moser C, Saak A. Food safety in low and middle-income countries: the evidence through an economic lens. World Dev. 2019; 123: 104611. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104611
3. Tan Z, Gong X, Zhang J, Shi S, Liu C, Wang Y, Zhu Z, Ni J, Meng L. Strategies for detection and control of microorganisms contamination in fermented foods: A review. CYTA J Food. 2024; 22(1): 2401031. doi:10.1080/19476337.2024.2401031.
4. Liu X, Ma J, Fan G. Microbiological safety and quality of fermented products. Foods. 2023; 12(11): 2204. https://doi.org/10.3390/foods12112204
5. Ministry of Public Health. Standard for pathogenic microorganisms in foods. [internet]. 2026 [cited 2026 March 5]. Available from: https://food.fda.moph.go.th/media.php?id=50942088690581504&name=P416.PDF
6. El Adab S, Hassouna M. Proteolysis, lipolysis and sensory characteristics of a tunisian dry fermented poultry meat sausage with oregano and thyme essential oils. J Food Saf. 2016; 36(1): 19-32. https://doi.org/10.1111/jfs.12209.
7. García-Díez J, Alheiro J, Pinto AL, Soares L, Falco V, Fraqueza MJ, et al. Behaviour of food-borne pathogens on dry cured sausage manufactured with herbs and spices essential oils and their sensorial acceptability. Food Control. 2016; 59: 262-270. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.05.027.
8. Teshome E, Forsido SF, Rupasinghe HPV, Olika Keyata E. Potentials of natural preservatives to enhance food safety and shelf life: a review. ScientificWorldJournal. 2022; 2022: 9901018. https://doi.org/10.1155/2022/9901018
9. de Oliveira AM, Mesquita MdS, da Silva GC, de Oliveira Lima E, de Medeiros PL, Paiva PMG, et al. Evaluation of toxicity and antimicrobial activity of an ethanolic extract from leaves of *morus alba* l. (moraceae). Evid Based Complement Alternat Med. 2015; 2015(1): 513978. https://doi.org/10.1155/2015/513978.

10. Wang F, Li J, Jiang Y. Polysaccharides from mulberry leaf in relation to their antioxidant activity and antibacterial ability. J Food Process Eng. 2010; 33(1): 39-50. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00258.x
11. Joung DK, Mun SH, Choi SH, Kang OH, Kim SB, Lee YS, Zhou T, et al. Antibacterial activity of oxyresveratrol against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and its mechanism. Exp Ther Med. 2016; 12(3): 1579-1584. https://doi.org/10.3892/etm.2016.3486
12. Niratker C, Preeti, Malti. Antimicrobial activity of leaf extract of *morus indica* (mulberry) from chhattisgarh. Asian J Plant Sci Res. 2015; 5(1): 28-31. https://www.imedpub.com/abstract/antimicrobial-activity-of-leaf-extract-of-morus-indica-mulberry-from-chhattisgarh-14374.html
13. Abdeldaiem MH, Ali HGM, Foda MI. Improving the quality of minced beef by using mulberry leaves extract. Food Measure. 2017; 11(4): 1681-1689. https://doi.org/10.1007/s11694-017-9548-8
14. Abdel-Khalek HH, Mattar ZA. Biological activities of egyptian grape and mulberry by-products and their potential use as natural sources of food additives and nutraceuticals foods. Food Measure. 2022; 16(2): 1559-1571. https://doi.org/10.1007/s11694-022-01289-2
15. Tianyam K, Saengprajak N, Srijumpa S, Tippayawat P, Pasuwan P, Kariklang R. The efficacy of mulberry leaf extract in inhibiting gram-positive pathogenic bacteria during the post-fermentation process of fermented fish (Pla-ra). KKU Journal for Public Health Research. 2025; 18(3): 97-109. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/kkujphr/article/view/260063
16. Burakorn J, Praphruet R. Antibacterial activities of seven indigenous vegetables. Journal of Thai Traditional and Alternative Medicine. 2012; 10(1): 11-22. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/JTTAM/article/view/138931/103205
17. Mapanao R, Churnate W, Nithikulworawong N. Antibacterial property and potential use mulberry leaves (*Morus alba* Linn.) As dietary supplement on growth performance and disease resistance against *Aeromonas hydrophila* in nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). J Sci Tech UBU. 2018; 21(2): 1-9. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/sci_ubu/article/view/182028/147725
18. FDA. Bacteriological Analytical Manual (BAM) [internet]. 1998 [cited 2018 June 22]. Available from: https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bacteriological-analytical-manual-bam.
19. Adeeyo AO, Oyetade JA, Alabi MA, Adeeyo RO, Samie A, Makungo R. Tuning water chemistry for the recovery of greener products: pragmatic and sustainable approaches. RSC Adv. 2023; 13(10): 6808-6826. https://doi.org/10.1039/d2ra06596g
20. Altaf L, Wani SA, Hussain PR, Suradkar P, Baqual MF, Bhat AA. Bioactive compounds and antioxidant activity in various parts of *Morus alba* L. Cv. ichinose: a comparative analysis. Discov Life. 2024; 54(1): 1-15. https://doi.org/10.1007/s11084-024-09650-9
21. Raman ST, Ganeshan AK, Chen C, Jin C, Li SH, Chen HJ, et al. In vitro and in vivo antioxidant activity of flavonoid extracted from mulberry fruit (*Morus Alba* L.). Pharmacogn Mag. 2016; 12(46): 128-133. https://doi.org/10.4103/0973-1296.177910

22. Wang B, Yang CT, Diao QY, Tu Y. The influence of mulberry leaf flavonoids and *candida tropicalis* on antioxidant function and gastrointestinal development of preweaning calves challenged with *Escherichia coli* O141:K99. J Dairy Sci. 2018; 101(7): 6098-6108. https://doi.org/10.3168/jds.2017-13957
23. Pizarro-Cerdá J, Cossart P. Bacterial adhesion and entry into host cells. Cell. 2006; 124(4): 715-727. https://doi.org/10.1016/j.cell.2006.02.012
24. Suriyaprom S, Kaewkod T, Promputtha I, Desvaux M, Tragoolpua Y. Evaluation of antioxidant and antibacterial activities of white mulberry (*Morus Alba* L.) fruit extracts. Plants. 2021; 10(12): 2736. https://doi.org/10.3390/plants10122736
25. Majowicz SE, Musto J, Scallan E, Angulo FJ, Kirk M, O'Brien SJ, et al. The global burden of nontyphoidal *Salmonella* gastroenteritis. Clin Infect Dis. 2010; 50(6): 882-889. https://doi.org/10.1086/650733
26. Thabti I, Elfalleh W, Tlili N, Ziadi M, Campos MG, Ferchichi A. Phenols, flavonoids, and antioxidant and antibacterial activity of leaves and stem bark of *Morus* species. Int J Food Prop. 2013; 17(4): 842-854. https://doi.org/10.1080/10942912.2012.660722
27. Das D, Ghosh R, Mandal P. Biogenic synthesis of silver nanoparticles using S1 genotype of *morus alba* leaf extract: characterization, antimicrobial and antioxidant potential assessment. SN Appl Sci. 2019; 1(5): 498. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0527-z
28. Yamamoto O. Influence of particle size on the antibacterial activity of zinc oxide. Int J Inorg Mater. 2001; 3(7): 643-646. https://doi.org/10.1016/S1466-6049(01)00197-0
29. Kumkoon T, Srisaisap M, Boonserm P. Biosynthesized silver nanoparticles using *Morus alba* (white mulberry) leaf extract as potential antibacterial and anticancer agents. Molecules. 2023; 28(3): 1213. https://doi.org/10.3390/molecules28031213

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูสติ้งเพื่อจำแนกโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาโดยใช้คุณสมบัติซีมเล็ตเวฟเลตส์

Development of Boosting Algorithm Machine Learning Models for Diabetic Retinopathy Classification Using Symlet Wavelets

ชัชวาลย์ ศรีมนตรี[1] และ ธนรัฐ โชติพันธ์[1*]
Chatchawarn Srimontree[1] and Tanarat Chotiphan[1*]
[1]สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
[1]Department of Computer Science, Faculty of Industrial Technology, Ubon Ratchathani Rajabhat University
*Corresponding author; email: tanarat.c@ubru.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
16 ธันวาคม 2569	6 มีนาคม 2569	9 มีนาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาและวัดประสิทธิภาพแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูสติ้ง 2) เพื่อจำแนกภาพถ่ายจอประสาทตาซึ่งมีภาวะโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา ร่วมกับการสกัดคุณสมบัติเวฟเลตส์ทรานส์ฟอร์มประเภทซีมเล็ตจำนวน 10 ซับแบนด์ โดยแต่ละซับแบนด์แสดงข้อมูลเชิงสถิติได้แก่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พลังงาน เอนโทรปี ความเบ้ และความโด่งทำให้ได้คุณลักษณะซีมเล็ตรวมทั้งสิ้น 60 คุณลักษณะซึ่งถูกนำไปประมวลผลร่วมกับแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูสติ้งจำนวน 3 แบบจำลองได้แก่ เอ็กตรีมกราเดียนบูสต์ ไลต์จีบีเอ็มและแคทบูสต์ โดยงานวิจัยนี้มีการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วย วิธีการ 10-Fold Cross Validation และตารางเมตริกซ์ความสับสน เพื่อคำนวณหาค่าความแม่นยำ ค่าความไว ค่าความจำเพาะ และประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเพื่อคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการจำแนก ทั้งนี้จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองพบว่าแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มให้ผลลัพธ์สูงสุดในเกือบทุกตัวชี้วัด โดยมีความแม่นยำร้อยละ 94.47 ความไวร้อยละ 95.24 ความจำเพาะร้อยละ 93.69 และค่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบร้อยละ 94.56 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้เวฟเลตส์ทรานส์ฟอร์มประเภทซีมเล็ตร่วมกับแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูสติ้งสามารถเป็นทางเลือกในการวินิจฉัยโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา

คำสำคัญ: โรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา, การเรียนรู้ของเครื่อง, บูสติ้ง, ซีมเล็ต

Abstract

This research aims to 1) develop and evaluate the performance of boosting machine learning models, and 2) classify retinal images with diabetic retinopathy using symlet wavelet transform feature extraction from 10 sub-bands. A total of 60 symlet features were obtained by extracting six statistical measures, namely mean, standard deviation, energy, entropy, skewness, and kurtosis, from each of the 10 sub-bands. The feature set was fed into three boosting machine learning algorithms, specifically XGBoost, LightGBM, and CatBoost, for classification model development and performance comparison. Model performance was assessed through 10-fold cross-validation and confusion matrix analysis to determine accuracy, sensitivity, specificity, and F1-score metrics for optimal model selection. Comparative performance evaluation demonstrated that the LightGBM model achieved the best overall performance across nearly all evaluation metrics, with an accuracy of 94.47%, sensitivity of 95.24%, specificity of 93.69%, and F1-score of 94.56%. These findings suggest that integrating symlet wavelet features with boosting-based machine learning algorithms provides a promising approach for diabetic retinopathy screening and diagnosis.

Keywords: Diabetic Retinopathy, Machine Learning, Boosting, Symlet

บทนำ

โรคเบาหวานถือเป็นโรคไม่ติดต่อชนิดเรื้อรังที่พบบ่อยและเป็นปัญหาทางด้านสาธารณสุข โดยมีแนวโน้มผู้ป่วยโรคเบาหวานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกๆปี นอกจากนี้โรคเบาหวานยังเป็นสาเหตุของอาการแทรกซ้อนอื่นๆที่ยากต่อการรักษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา (Diabetic Retinopathy หรือ DR) โรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของการสูญเสียการมองเห็นในผู้ใหญ่วัยทำงาน โดยองค์การอนามัยโลกประเมินว่าภาวะตาบอดจากโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตามีสัดส่วนร้อยละ 4.8 ของผู้ป่วยตาบอดทั่วโลกคิดเป็นจำนวนประมาณ 1.8 ล้านคน สอดคล้องกับการสำรวจข้อมูลในประเทศไทยซึ่งพบว่าโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาเป็นสาเหตุของภาวะตาบอดร้อยละ 5.1 ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยสากลร้อยละ 6.25 โดยประมาณ [1,2] จากเหตุปัจจัยดังกล่าวจึงมีการส่งเสริมระบบคัดกรองโรคเช่น การวางแนวทางการตรวจคัดกรองโรคและแนวปฏิบัติที่เป็นมาตรฐานเพื่อลดโอกาสการเกิดโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา ซึ่งอาจนำไปสู่การสูญเสียการมองเห็น แต่เนื่องจากกระบวนการคัดกรองโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาต้องใช้บุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญสูง ต้องมีการตรวจคัดกรองอย่างระมัดระวัง ทำให้ต้องใช้ทรัพยากรทางด้านเวลาส่งผลให้สามารถให้บริการแก่ผู้ป่วยได้ในจำนวนที่น้อยประกอบกับสถานพยาบาลบางแห่งอยู่ในพื้นที่ห่างไกลขาดแคลนบุคลากร ทำให้ผู้ป่วยขาดโอกาสในการตรวจคัดกรองด้วยเครื่องมือและวิธีการที่เหมาะสม จากเหตุปัจจัยดังกล่าวคณะผู้วิจัยจึงมีความประสงค์ในการวิจัยและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้วิธีการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อคัดกรองโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา โดยคณะผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าคุณลักษณะเวฟเลตส์ ซึ่งถูกสกัดออกมาในรูปแบบข้อมูลเชิงตัวเลขและสถิติสามารถอธิบายคุณลักษณะของพื้นผิวจอประสาทตาได้เป็นอย่างดีและสามารถนำมาประมวลผลด้วยแบบจำลองวิธีการเรียนรู้ของเครื่องซึ่งให้ผลการจำแนกที่มีความแม่นยำสูง โดยเวฟเลตส์ทรานฟอร์มชนิดซีมเล็ตให้ผลการจำแนกที่แม่นยำมากที่สุดและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แบบจำลองได้[3] และการปรับปรุงคุณภาพของภาพก่อนการสกัดคุณลักษณะช่วยให้สกัดคุณลักษณะได้ถูกต้องและครบถ้วนส่งผลต่อความแม่นยำของแบบจำลอง[4,5,6] ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าแบบจำลองประเภทบูสติ้งมีอัตราความแม่นยำในการจำแนกที่สูงมากกว่าแบบจำลองประเภทอื่นประกอบกับมีความเร็วในการประมวลผลข้อมูล มีความแปรปรวนน้อย ลดปัญหาความไม่สมดุลของตัวจำแนก ป้องกันปัญหา

ในกรณีแบบจำลองมีความสามารถในการจำแนกข้อมูลของชุดฝึกข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่มีความถูกต้องในการจำแนกข้อมูลของชุดทดสอบในอัตราที่ต่ำ (Overfitting) โดยคุณสมบัติที่โดดเด่นที่สุดคือกระบวนการสร้างแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงจากแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพต่ำ โดยมีกระบวนการปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลองทุกวงรอบการทำงาน โดยแต่ละแบบจำลองจะเรียนรู้จากข้อผิดพลาดของแบบจำลองลำดับก่อนหน้า สามารถตีความคุณลักษณะที่มีความสำคัญต่อการจำแนกได้ง่าย มีความซับซ้อนในกระบวนการประมวลผลที่น้อยกว่า ใช้ทรัพยากรในการประมวลผลข้อมูลน้อยกว่าการใช้แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกที่มีความนิยมในปัจจุบัน มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริงเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในสถานพยาบาลที่ห่างไกลหรือมีทรัพยากรจำกัดทั้งทางด้านบุคลากรและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ [11,12,13,14,15,16,17] จากการสังเคราะห์วรรณกรรมและงานวิจัยข้างต้นคณะผู้วิจัยมีความต้องการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูสติ้งจำนวน 3 แบบจำลองได้แก่ เอ็กตรีมกราเดียนบูสต์ ไลต์จีบีเอ็มและแคทบูสต์ เพื่อจำแนกภาพถ่ายที่มีและไม่มีภาวะของโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาโดยอาศัยคุณสมบัติซีมเล็ตซึ่งสกัดจากภาพถ่ายทางการแพทย์พร้อมกับเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองทั้ง 3 แบบด้วยตัวชี้วัดทางสถิติตามมาตรฐานการวิจัยซึ่งประกอบด้วยตารางเมตริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix) ค่าความแม่นยำ (Accuracy) ค่าความไว (Sensitivity) ค่าความจำเพาะ (Specificity) และประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ (F1-score) เพื่อคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการจำแนกโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองในการจำแนกโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาด้วยภาพถ่ายทางการแพทย์โดยใช้แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูสติ้งร่วมกับการสกัดคุณสมบัติเวฟเลตส์ทรานส์ฟอร์มประเภทซีมเล็ต
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองในการจำแนกโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาด้วยภาพถ่ายทางการแพทย์โดยอาศัยแบบจำลอง 3 รูปแบบได้แก่ เอ็กตรีมกราเดียนบูสต์ ไลต์จีบีเอ็ม และแคทบูสต์

วิธีดำเนินการวิจัย

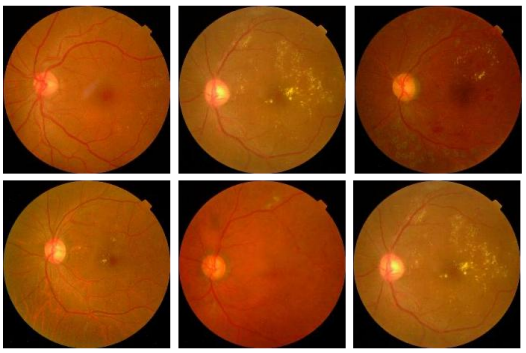
งานวิจัยนี้นำกระบวนการ CRISP-DM (Cross-Industry Standard Process for Data Mining) เป็นแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง เนื่องจากเป็นมาตรฐานการทำงานที่ชัดเจนเป็นระบบ นิยมใช้ในงานวิจัยและโครงงานที่เกี่ยวข้องกับการเรียนรู้ของเครื่องและเหมืองข้อมูล โดยกระบวนการนี้แบ่งกระบวนการทำงานออกเป็น 6 ขั้นตอน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การทำความเข้าใจปัญหา

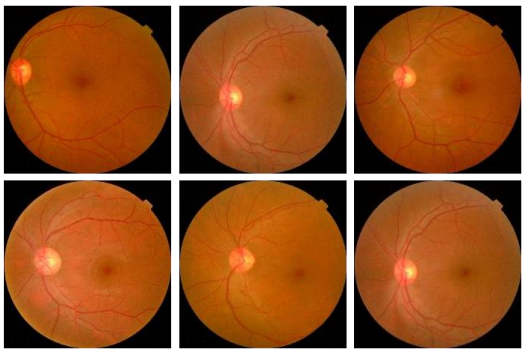
ผู้ป่วยโรคเบาหวานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้จำนวนผู้ป่วยโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตามีอัตราการเกิดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผู้ป่วยสูญเสียการมองเห็นหากไม่ได้รับการรักษาทันเวลา ประกอบกับการคัดกรองโรคต้องอาศัยจักษุแพทย์ผู้เชี่ยวชาญในการวินิจฉัย โดยใช้การวินิจฉัยภาพถ่ายจอประสาทตาซึ่งมีข้อจำกัดทั้งด้านบุคลากรและเวลาในการวินิจฉัย ส่งผลให้บริการผู้ป่วยได้ในจำนวนที่น้อยโดยเฉพาะในพื้นที่ห่างไกล งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องในการจำแนกภาพถ่ายจอประสาทตา เพื่อลดภาระงานของจักษุแพทย์เพิ่มความรวดเร็วในการคัดกรองเป็นทางเลือกซึ่งช่วยให้ตรวจโรคได้รวดเร็วขึ้น แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นคาดว่าจะเป็นประโยชน์ในการคัดกรองผู้ป่วยกลุ่มเสี่ยง เพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการและขยายบริการไปยังพื้นที่ห่างไกลที่ขาดแคลนผู้เชี่ยวชาญ

การทำความเข้าใจข้อมูล

ข้อมูลในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการสกัดซีมเล็ตจากภาพถ่ายจอประสาทตาซึ่งรวบรวมและเผยแพร่เพื่อจุดประสงค์ด้านการศึกษาและวิจัยผ่านเว็บไซต์ www.researchgate.net [7] โดย Parisa Karimi Darabi จำนวนทั้งสิ้น 2,076 ภาพ แบ่งเป็นภาพจอประสาทตาที่มีภาวะโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาจำนวน 1,050 ภาพ และภาพจอประสาทตาปกติจำนวน 1,026 ภาพ โดยแต่ละภาพเป็นไฟล์ชนิด JPEG สูง 224 พิกเซลและกว้าง 224 พิกเซล ขนาดความละเอียดที่ 72 พิกเซลต่อนิ้วและใช้โหมดสีอาร์จีบี



ภาพดวงตาที่มีภาวะเบาหวานขึ้นจอประสาทตา



ภาพดวงตาที่ไม่มีภาวะเบาหวานขึ้นจอประสาทตา

ภาพที่ 1 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายจอประสาทตาที่มีและไม่มีภาวะโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาซึ่งใช้ในงานวิจัย

การเตรียมข้อมูล

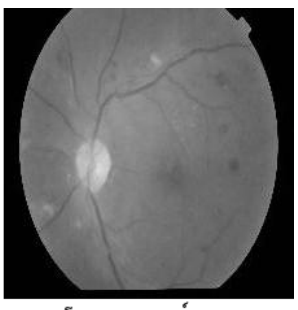
การเตรียมข้อมูลในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยกระบวนการหลัก 2 กระบวนการคือ กระบวนการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอประสาทตาและกระบวนการสกัดซีมเล็ต ซึ่งประมวลผลร่วมกับภาพถ่ายจอประสาทตาทีละภาพจนครบทุกรูปภาพ โดยกระบวนการเตรียมข้อมูลมีรายละเอียดในการดำเนินการดังนี้

1. กระบวนการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอประสาทตา คือกระบวนการเพิ่มรายละเอียดของรูปภาพให้มีความคมชัดช่วยให้ลักษณะเด่นบนพื้นผิวปรากฏชัดเจนมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้การสกัดคุณลักษณะของภาพมีความถูกต้องและแม่นยำ นำมาซึ่งการเรียนรู้คุณลักษณะของข้อมูลในกระบวนการสร้างแบบจำลองที่ครบถ้วนและได้แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกสูง กระบวนการดังกล่าวประกอบด้วย 3 กระบวนการย่อยดังนี้

1.1 การเปลี่ยนโหมดภาพเป็นโหมดเกรย์สเกล ส่งผลให้ภาพถ่ายมีความแตกต่างของความเข้มสี สามารถเพิ่มความชัดเจนในการตรวจจับพื้นผิวจอประสาทตาโดยเฉพาะบริเวณที่มีรอยโรคหรือเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ ช่วยให้การแยกซับแบนด์ด้วยเทคนิคเวฟเลตส์ทรานสฟอร์มมีความแม่นยำส่งผลให้การสกัดคุณลักษณะมีประสิทธิภาพมากขึ้น



โหมดภาพปกติ

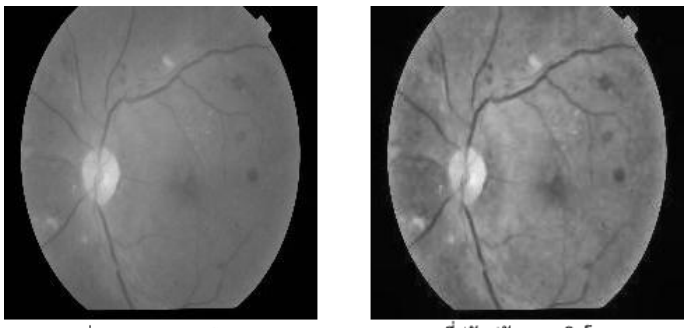


โหมดภาพเกรย์สเกล

ภาพที่ 2 แสดงการเปลี่ยนโหมดภาพให้อยู่ในลักษณะเกรย์สเกล

1.2 การลดสัญญาณรบกวนของภาพด้วยไบแลเทอรัลฟิลเตอร์ (Bilateral Filter) เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมในงานวิจัย เนื่องจากใช้ทั้งตัวกรองเชิงพื้นที่ (Spatial Filter) ซึ่งพิจารณาระยะห่างทางกายภาพระหว่างพิกเซลโดยพิกเซลที่อยู่ใกล้กันจะมีน้ำหนักมากกว่าพิกเซลที่อยู่ไกล และตัวกรองช่วงความเข้มสี (Range Filter) ซึ่งพิจารณาความแตกต่างของค่าความเข้มสีระหว่างพิกเซลโดยพิกเซลที่มีความเข้มใกล้เคียงกันจะได้รับน้ำหนักมากกว่าทำให้รักษาเส้นขอบของโครงสร้างได้ดี เนื่องจากตำแหน่งของพิกเซลซึ่งอยู่คนละด้านของขอบมีค่าความเข้มสีที่ต่างกันมากจึงไม่ถูกนำมารวมเป็นส่วนเดียวกันทำให้สามารถลดสัญญาณรบกวนได้ดีแต่ยังคงรายละเอียดที่สำคัญเช่นขอบของเส้นเลือด รอยสารคัดหลั่งและก้อนเลือดขนาดเล็กซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของโรค สามารถสกัดคุณลักษณะที่มีความหมายได้แม่นยำขึ้น ลดปัญหาการเรียนรู้ที่มากจนเกินไปซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวนและเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกโรค อย่างไรก็ตามควรปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้สูญเสียรายละเอียดที่สำคัญตามคำแนะนำจากงานวิจัยของ Tomasi and Manduchi [4] โดยงานวิจัยนี้กำหนดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ที่ต้องการพิจารณารอบพิกเซลเป้าหมายที่ 5 พิกเซล (d=5) ความแตกต่างของสีที่ 35 (sigmaColor=35) และระยะห่างระหว่างพิกเซลที่ 35 (sigmaSpace=35)

1.3 การปรับสมดุลฮิสโตรแกรมแบบจำกัดคอนทราสต์ (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization หรือ CLAHE) เป็นเทคนิคที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพของภาพโดยการทำให้รายละเอียดในส่วนสว่างและมืดชัดเจนขึ้นโดยไม่สูญเสียข้อมูล ช่วยกระจายค่าความเข้มของพิกเซลให้มีความสม่ำเสมอและลดปัญหาคอนทราสต์ที่สูงเกินไปส่งผลให้การสกัดคุณลักษณะมีความแม่นยำมากขึ้นและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกข้อมูลของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง สอดคล้องกับงานวิจัยโดย Rasta et al. [5] ซึ่งใช้ CLAHE เพื่อเพิ่มความคมชัดในภาพจอประสาทตา ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถเพิ่มความคมชัดให้แก่รอยโรคและสามารถเพิ่มความไวของแบบจำลองได้ถึงร้อยละ 5 โดยที่ความแม่นยำไม่ลดลง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยโดย Mutawa et al. [6] ซึ่งใช้ CLAHE ปรับความสมบูรณ์ของรูปภาพให้มีความคมชัดก่อนนำไปสกัดเวฟเลตส์แบบไม่ต่อเนื่องเพื่อใช้เป็นคุณสมบัติในการจำแนกโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาด้วยแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก ผลการทดลองพบว่าสามารถจำแนกจอประสาทตาที่ปกติได้ดีและมีผลการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์กราฟพื้นที่ใต้เส้นโค้งอาร์โอซีที่สูง โดยงานวิจัยนี้กำหนดค่าจำกัดการเพิ่มคอนทราสต์ที่ 2.0 (clipLimit = 2.0) ขนาดของกริดสำหรับแบ่งภาพที่ 8 (tileGridSize =8)



ภาพก่อนปรับสมดุลฮิสโตแกรม

ภาพที่ปรับปรับสมดุลฮิสโตแกรมแบบจำกัดคอนทราสต์

ภาพที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบภาพถ่ายจอประสาทตาก่อนและหลังการปรับปรับสมดุลฮิสโตแกรมแบบจำกัดคอนทราสต์

2. การสกัดคุณลักษณะซีมเล็ต (Symlet 4) ซึ่งเป็นเวฟเลตส์ซึ่งแต่ละซับแบนด์ให้ข้อมูลที่ซ้ำซ้อนน้อยและเป็นอิสระจากกันสามารถสร้างภาพต้นฉบับกลับมาได้อย่างสมบูรณ์แบบไม่สูญเสียข้อมูล มีความเร็วในการคำนวณสูงผ่านอัลกอริทึมฟาสต์เวฟเลตส์ทรานสฟอร์ม ซึ่งเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระบบวินิจฉัยที่ต้องการผลแบบเรียลไทม์และมีความเสถียรในกระบวนการประมวลผลเชิงตัวเลข ทำให้การคำนวณมีความแม่นยำสูงโดยไม่มีปัญหาความคลาดเคลื่อนสะสม

ในการศึกษานี้ใช้การแยกย่อยแบบ 3 ระดับโดยมีซับแบนด์รวม 10 ซับแบนด์ได้แก่ ซับแบนด์ประมาณค่า (LL3) จำนวน 1 ซับแบนด์และซับแบนด์เชิงรายละเอียดได้แก่รายละเอียดในแนวตั้ง (LH1, LH2, LH3) รายละเอียดในแนวนอน (HL1, HL2, HL3) และรายละเอียดในแนวทแยง (HH1, HH2, HH3) รวมจำนวน 9 ซับแบนด์ จากนั้นสกัดค่าสถิติเชิงปริมาณจากแต่ละซับแบนด์ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) พลังงาน (Energy) เอนโทรปี (Entropy) ความเบ้ (Skewness) และความโด่ง (Kurtosis) ทั้งนี้จากการสกัดค่าสถิติจำนวน 6 ค่าในทุกซับแบนด์ทั้ง 10 ซับแบนด์ส่งผลให้ได้คุณลักษณะซีมเล็ตเวฟเลตส์รวมทั้งสิ้น 60 คุณลักษณะ คุณลักษณะดังกล่าวเป็นสถิติที่สามารถสะท้อนโครงสร้าง ความหยาบ ความผันแปรของเนื้อสัมผัส ความซับซ้อนเชิงความถี่ และรูปแบบของความแปรผันในภาพซึ่งได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในประเด็นความเหมาะสมสำหรับใช้ในงานจำแนกภาพทางการแพทย์ โดยเฉพาะงานที่ต้องการตรวจหารูปแบบทางพยาธิสภาพที่ปรากฏในภาพจอประสาทตา ค่าทางสถิติเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการอธิบายและตีความลักษณะทางพยาธิสภาพของภาพได้ โดยรายละเอียดของแต่ละคุณลักษณะมีดังต่อไปนี้

ค่าเฉลี่ย (Mean) สะท้อนถึงระดับความสว่างโดยรวมในแต่ละซับแบนด์ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสีและความหนาแน่นของเนื้อเยื่อ โดยภาวะเบาหวานขึ้นจอประสาทตามักทำให้เกิดพื้นที่ที่มีความสว่างผิดปกติ ยกตัวอย่างเช่น การสะสมของไขมันและโปรตีนที่รั่วซึมออกมาจากหลอดเลือดขนาดเล็กที่มีความสว่างสูง หรือเลือดออกในจอประสาทตาที่มีความสว่างต่ำ

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) วัดความผันแปรหรือความแตกต่างของค่าพิกเซลในแต่ละซับแบนด์ โดยจอประสาทตาที่มีรอยโรคมักมีความผันแปรสูง เนื่องจากมีพื้นที่ซึ่งมีความผิดปกติปะปนกับพื้นที่ปกติในขณะที่จอประสาทตาปกติมีความสม่ำเสมอมากกว่า

พลังงาน (Energy) วัดความเข้มของสัญญาณในซับแบนด์ ค่าพลังงานสูงบ่งชี้ว่ามีโครงสร้างที่เด่นชัดในทิศทางนั้นๆ เช่น หลอดเลือดที่โดดเด่น หรือสารคัดหลั่งที่รั่วซึมออกมาจากหลอดเลือดในจอประสาทตาและสะสมในเนื้อเยื่อจอประสาทตาที่มีขอบชัดเจนซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของภาวะเบาหวานขึ้นจอประสาทตา

เอนโทรปี (Entropy) วัดระดับความสับสนหรือความไม่เป็นระเบียบของข้อมูลในซับแบนด์ จอประสาทตาที่เป็นโรคมักมีค่าเอนโทรปีสูงเนื่องจากมีการกระจายตัวของรอยโรคที่ไม่สม่ำเสมอและมีความหลากหลายของลักษณะรอยโรค

ความเบ้ (Skewness) วัดความไม่สมมาตรของการกระจายตัวของค่าพิกเซล ช่วยบ่งชี้ให้เห็นพื้นที่ของรอยโรคที่มีการกระจายตัวไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง

ความโด่ง (Kurtosis) วัดความแหลมของการกระจายตัวของค่าพิกเซล ใช้ตรวจหาความผิดปกติบนจอประสาทตาที่เป็นโรคซึ่งมักมีค่าความโด่งสูงเช่นจุดโป่งพองของหลอดเลือดขนาดเล็ก หรือรอยเลือดออกในจอประสาทตาขนาดเล็กที่กระจายอยู่บนพื้นผิวจอประสาทตา

การรวมคุณลักษณะเชิงสถิติทั้ง 6 ประเภทจาก 10 ซับแบนด์ ทำให้ได้คุณลักษณะที่มีความหลากหลายและครอบคลุม สามารถอธิบายลักษณะของจอประสาทตาทั้งในด้านโครงสร้าง พื้นผิว และการกระจายตัวของ รอยโรคได้อย่างครอบคลุม ทั้งนี้จากงานวิจัยโดย Onjun et al. [3] ซึ่งได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อจำแนกโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาโดยคุณสมบัติเวฟเลตส์ทรานสฟอร์มหลายประเภทพบว่า ซีมเลตส์มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยงานวิจัยนี้ใช้ภาษาไพธอนและไลบรารี่ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายจอประสาทตาและกระบวนการสกัดซีมเล็ตได้แก่ พายเวฟเลตส์ ซายคิตอิมเมจ และโอเพนซีวีไพธอน [8,9,10]

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างข้อมูลซีมเล็ตที่สกัดได้จากรูปภาพจอประสาทตา

Filename	label	LL_mean	LL_std	LL_energy	LL_entropy	LL_skewness	LL_kurtosis	LH3_mean	LH3_std	HH1_kurtosis
image1.jpg	DR	1.6380904	1.2465191	20762.033	10.1780556	-0.2019425	-0.9855628	0.000226813	0.03871111	123.38309
image2.jpg	DR	2.2330031	1.6203383	37297.812	5.8154615	-0.5372592	-1.4594787	0.000154046	0.03974638	113.77922
image3.jpg	DR	2.0782492	1.3079135	29545.81	23.5996891	-0.6137872	-0.7221148	0.000164078	0.03656798	130.96774
image4.jpg	DR	2.0015419	1.5169828	30906.293	7.49547412	-0.4219075	-1.5229849	-0.000808444	0.0791712	95.59997
image5.jpg	DR	2.173807	1.5953403	35625.684	9.8295825	-0.4431141	-1.3240011	0.000202344	0.04100434	109.89609
image6.jpg	DR	3.0620954	1.8810558	63282.523	35.0537693	-0.8035863	-0.8901322	0.000121285	0.07127795	151.81905
image7.jpg	NoDR	2.6050832	1.9281298	51470.305	18.7874393	-0.4749492	-1.4979994	-0.000223355	0.06478397	130.10301
image8.jpg	NoDR	2.3633091	1.4692249	37944.88	28.256057	-0.7051584	-0.8164132	0.000313066	0.04910117	135.5849
image9.jpg	NoDR	1.7782497	1.3880838	24935.848	31.4572532	-0.0208547	-0.6915608	0.000907717	0.12215602	44.789097
image10.jpg	NoDR	2.022906	1.527863	31489.918	22.0592919	-0.2072884	-0.9433601	-0.000228735	0.0869123	87.84205
image11.jpg	NoDR	1.2441466	0.9464966	11974.407	-9.1199261	-0.3036606	-1.3705189	0.000968922	0.0249347	85.797104

การสร้างแบบจำลอง

งานวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการสร้างแบบจำลองประเภทบูสติ้งซึ่งเป็นแบบจำลองในลักษณะต้นไม้ตัดสินใจหลายต้น ซึ่งสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลองตามวงรอบโดยปรับปรุงข้อผิดพลาดของแบบจำลองก่อนหน้าพร้อมกับทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพเพื่อหาแบบจำลองที่ดีที่สุดในการจำแนกโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาสอดคล้องกับงานวิจัยโดย Ganie et al. [11] ซึ่งใช้แบบจำลองที่คล้ายคลึงกับวิจัยในครั้งนี้ โดยผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองประเภทบูสติ้งมีความรวดเร็วในการประมวลผล มีความแปรปรวนน้อย สามารถลดความคลาดเคลื่อนในการจำแนก ทั้งนี้งานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยแบบจำลองแบบบูสติ้งจำนวน 3 แบบจำลองดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองเอ็กตรีมกราเดียนบูสต์[12] เป็นแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องซึ่งทำงานโดยการสร้างต้นไม้ตัดสินใจหลายต้นแบบต่อเนื่องไล่ระดับ โดยต้นไม้ตัดสินใจแต่ละต้นที่สร้างขึ้นใหม่จะเรียนรู้จากข้อผิดพลาดของต้นไม้ตัดสินใจก่อนหน้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลอง แบบจำลองนี้มีคุณลักษณะที่โดดเด่นเนื่องจากมีกระบวนการควบคุมความซับซ้อนของแบบจำลองซึ่งสามารถป้องกันปัญหาโอเวอร์ฟิตติ้งของแบบจำลอง โดยการเพิ่มค่าการลงโทษให้กับแบบจำลองที่มีความซับซ้อนสูง ทำให้แบบจำลองไม่เกิดการเรียนรู้รายละเอียดหรือสัญญาณรบกวนที่เกิดจากข้อมูลชุดฝึกมากเกินไป และสามารถทำนายข้อมูลใหม่ได้แม่นยำขึ้น สามารถจัดการกับข้อมูลสูญหายได้ดี จากงานวิจัยโดย Yang and Yang [13] ได้ทำการวิจัยโดยรวบรวมผลการตรวจร่างกายซึ่งเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขเพื่อประมวลผลด้วยแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องพบว่าแบบจำลองเอ็กตรีมกราเดียนบูสต์มีความแม่นยำสูงถึงร้อยละ 91.25 โดยการวิจัยเพื่อจำแนกภาพถ่ายโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาครั้งนี้กำหนดค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์โดยกำหนดจำนวนต้นไม้ตัดสินใจ 100 ต้น (n_estimators=100) ความลึกสูงสุด 4 ระดับ (max_depth=4) อัตราการเรียนรู้ที่ 0.1 (learning_rate=0.1) สัดส่วนการสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่ 0.8 (subsample=0.8) สัดส่วนการสุ่มเลือกคุณลักษณะต่อต้นที่ 0.8 (colsample_bytree=0.8) น้ำหนักขั้นต่ำของชิลด์โหนดที่ 1 ตัวอย่าง (min_child_weight=1) ค่าการลดความสูญเสียขั้นต่ำสำหรับการแบ่งข้อมูลที่ 0 (gamma=0) การปรับค่าแบบ L1 ที่ 0 (reg_alpha=0) การปรับค่าแบบ L2 ที่ค่า 1 (reg_lambda=1) ใช้วิธีการสร้างต้นไม้แบบฮิสโตแกรม (tree_method='hist') ฟังก์ชันวัดประสิทธิภาพแบบล็อกลอส (eval_metric='logloss') น้ำหนักของคลาสมีการที่ปรับสมดุลอัตโนมัติ (scale_pos_weight) และกำหนดค่าควบคุมการสุ่มที่ 42 (random_state=42)

2. แบบจำลองไลต์จีบีเอ็ม[14] เป็นแบบจำลองกราเดียนบูสต์ซึ่งพัฒนาขึ้นเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ ใช้หลักการสร้างต้นไม้ตัดสินใจหลายต้นแบบต่อเนื่องโดยแต่ละต้นจะเรียนรู้จากความผิดพลาดของต้นไม้ตัดสินใจต้นก่อนหน้า แบบจำลองไลต์จีบีเอ็มมีจุดเด่นคือใช้การคัดเลือกข้อมูลที่มีความสำคัญสูงและสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่มีความสำคัญต่ำเพียงบางตัวอย่างทำให้ลดเวลาการฝึกสอนแบบจำลองโดยไม่สูญเสียความแม่นยำมากจนเกินไป สามารถใช้เทคนิคการรวมคุณสมบัติมีลักษณะพิเศษเข้าด้วยกันเพื่อลดมิติข้อมูลและเพิ่มความเร็วในการประมวลผลและสร้างต้นไม้ตัดสินใจโดยเลือกขยายลีฟโหนดที่ช่วยลดความผิดพลาดได้มากที่สุดในแต่ละครั้งแทนกระบวนการขยายทุกลีฟโหนด ทำให้แบบจำลองเรียนรู้ได้เร็วขึ้นและใช้หน่วยความจำน้อยกว่า Rufo et al. [15] ได้ศึกษาวิจัยโดยใช้แบบจำลองไลต์จีบีเอ็มเพื่อทำนายการเกิดโรคเบาหวาน จากผลการทดลองพบว่าแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มมีการใช้หน่วยความจำที่ต่ำกว่าแต่มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีและมีความเร็วในการประมวลผลสูงกว่าถึง 7 เท่าตัว และมีความเข้ากันได้กับชุดข้อมูลขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเอ็กตรีมกราเดียนบูสต์และมีความแม่นยำที่ดีกว่าแบบจำลองชนิดบูสติ้งแบบอื่น สามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้ การวิจัยครั้งนี้กำหนดค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ของแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มโดยกำหนดจำนวนต้นไม้ตัดสินใจ 100 ต้น (n_estimators=100) ความลึกสูงสุด 4 ระดับ (max_depth=4) จำนวนลีฟโหนดสูงสุดที่ 15 โหนด (num_leaves=15) จำนวนตัวอย่างขั้นต่ำในลีฟโหนด 20 ตัวอย่าง (min_child_samples=20) อัตราการเรียนรู้ที่ 0.1 (learning_rate=0.1) สัดส่วนการสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่ 0.8 พร้อมความถี่การทำแบกกิ้งในทุกรอบ (subsample=0.8, bagging_freq=1) สัดส่วนการสุ่มเลือกคุณลักษณะของต้นไม้ตัดสินใจที่ 0.8 (feature_fraction=0.8) การปรับค่า L1 และ L2 เท่ากับ 0 (reg_alpha=0, reg_lambda=0) น้ำหนักคลาสแบบสมดุล (is_unbalance=true) และกำหนดค่าควบคุมการสุ่มที่ 42 (random_state=42)

3. แบบจำลองแคทบูสต์[16] เป็นแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องที่พัฒนาเพิ่มเติมจากกราเดียนบูสต์โดยใช้ต้นไม้ตัดสินใจเป็นพื้นฐาน มีจุดเด่นคือสามารถจัดการข้อมูลแบบจัดกลุ่มได้โดยตรงโดยไม่ต้องแปลงเป็นค่าตัวเลขทำให้ประหยัดเวลาและรักษาคุณลักษณะดั้งเดิมของข้อมูลได้ดีกว่า Xu et al. [17] ได้ศึกษาวิจัยโดยใช้แบบจำลองแคทบูสต์เพื่อจำแนกโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาโดยวิเคราะห์ตัวแปรความเสี่ยงที่นำไปสู่โรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา ผลการทดลองพบว่าแบบจำลองแคทบูสต์สามารถประมวลผลคุณสมบัติแบบแบ่งประเภทโดยอัตโนมัติ สามารถลดปัญหาโอเวอร์ฟิตติ้งการวิจัยเพื่อจำแนกภาพถ่ายโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาครั้งนี้กำหนดค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ของแบบจำลองแคทบูสต์โดยกำหนดจำนวนรอบการทำซ้ำที่ 100 รอบ (iterations=100) ความลึกสูงสุด 4 ระดับ (depth=4) อัตราการเรียนรู้ที่ 0.1 (learning_rate=0.1) สัดส่วนการสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่ 0.8 (subsample=0.8) สัดส่วนการสุ่มเลือกคุณลักษณะของต้นไม้ตัดสินใจที่ 0.8 (rsm=0.8) ค่าสัมประสิทธิ์การปรับค่าแบบ L2 สำหรับลีฟโหนดเท่ากับ 3 (l2_leaf_reg=3) กำหนดค่าควบคุมการสุ่มที่ 42 (random_state=42) และปิดการแสดงผลระหว่างการฝึกสอน (verbose=False)

งานวิจัยนี้ใช้ภาษาไพธอนและไลบรารีในการสร้างแบบจำลองได้แก่ แพนดาส นัมพาย ซายคิทเลิร์น และซายพาย [18 ,19 ,20 ,21] เป็นเครื่องมือในการพัฒนาแบบจำลอง ซึ่งไลบรารีดังกล่าวเป็นไลบรารีสำเร็จรูปที่รวบรวมกระบวนการสร้างแบบจำลองทำให้สามารถพัฒนาแบบจำลองได้สะดวกรวดเร็ว มีค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่ครบถ้วน กำหนดค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ได้สะดวก ลดการผิดพลาดระหว่างการพัฒนาแบบจำลอง โดยมีเวอร์ชั่นของแบบจำลองได้แก่ XGBoost เวอร์ชัน 1.7.0, LightGBM เวอร์ชัน 3.3.5 และ CatBoost เวอร์ชัน 1.2.0

การประเมินผล

การประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองใช้การแบ่งข้อมูลซีมเล็ตซึ่งสกัดจากภาพถ่ายจอประสาทตาเป็นชุดข้อมูลสำหรับฝึกแบบจำลอง (Training Set) จำนวน 1,660 ภาพและข้อมูลสำหรับทดสอบการจำแนกของแบบจำลอง (Testing Set) จำนวน 416 ภาพ คิดเป็นอัตราส่วนเป็นอัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อร้อยละ 20 ตามลำดับโดยอัตราส่วนลักษณะดังกล่าวเป็นอัตราส่วนที่เป็นมาตรฐานในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับ ในการประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง งานวิจัยนี้ใช้เทคนิค 10-Fold Cross Validation บนชุดข้อมูลสำหรับฝึกแบบจำลอง โดยกระบวนการสร้างแบบจำลองจะแบ่งชุดข้อมูลสำหรับฝึกแบบจำลองออกเป็น 10 ส่วนย่อยและใช้ข้อมูล 9 ส่วนหรือ 1,494 ภาพในการสร้างแบบจำลองและใช้ข้อมูล 1 ส่วนหรือ 166 รูปภาพในการทดสอบแบบจำลองโดยทำซ้ำเป็นจำนวน 10 รอบ ทั้งนี้การแบ่งข้อมูลดังกล่าวใช้วิธีการแบ่งข้อมูลแบบคงสัดส่วนคลาส (Stratified Split) โดยกำหนดค่าตั้งต้นการสุ่ม (Random Seed) เท่ากับ 42 เพื่อรักษาสัดส่วนของแต่ละคลาสให้เท่ากันทั้งในชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลทดสอบ โดยข้อมูลทั้งหมดสามารถสลับหน้าที่ในการเป็นชุดข้อมูลสำหรับฝึกและข้อมูลสำหรับทดสอบแบบจำลอง ทำให้การประเมินผลมีความเป็นมาตรฐานและสะท้อนการกระจายตัวของข้อมูลที่เกิดขึ้นจริง และแบบจำลองสามารถเรียนรู้คุณลักษณะของชุดข้อมูลเพื่อจำแนกข้อมูลได้ดียิ่งขึ้น ช่วยลดข้อผิดพลาดในการประมาณค่าและเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการจำแนกในกระบวนการสร้างแบบจำลอง[22] หลังจากสร้างแบบจำลองจากชุดข้อมูลสำหรับฝึกแบบจำลองเสร็จสิ้น แบบจำลองจะถูกนำไปใช้ทดสอบกับข้อมูลสำหรับทดสอบการจำแนกของแบบจำลอง เพื่อวัดผลการจำแนกด้วยตารางเมตริกซ์ความสับสนพร้อมกับประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองด้วยตัวชี้วัดมาตรฐานประกอบด้วย ค่าความแม่นยำ ค่าความไว ค่าความจำเพาะและค่าประสิทธิภาพโดยรวมของแบบจำลองซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ตารางเมตริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix) คือ ตารางที่ใช้แสดงผลการทำนายของแบบจำลองในการจำแนกประเภทโดยเปรียบเทียบระหว่างค่าจริงกับผลการจำแนกของแบบจำลอง การจำแนกในงานวิจัยนี้สามารถมีการจำแนกในรูปแบบการจำแนก 2 คลาสประกอบด้วยคลาส Positive คือภาพถ่ายจอประสาทตาที่มีภาวะโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาและคลาส Negative คือภาพถ่ายจอประสาทตาปกติ ทั้งนี้จาการจำแนกดังกล่าวทำให้มีผลลัพธ์จากการจำแนกโดยแบบจำลองทั้งสิ้น 4 รูปแบบดังนี้

1.1 True Negative (TN) คือ แบบจำลองสามารถจำแนกได้ถูกต้องว่าเป็นภาพถ่ายจอประสาทตาปกติ

1.2 False Positive (FP) คือ การจำแนกที่ผิดพลาดเนื่องจากแบบจำลองจำแนกว่ามีภาวะของโรคแต่เป็นภาพจอประสาทตาปกติที่ไม่มีสภาวะของโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา

1.3 False Negative (FN) คือ การจำแนกที่ผิดพลาดเนื่องจากแบบจำลองจำแนกว่าไม่มีภาวะของโรคแต่ภาพเป็นภาพจอประสาทตาที่มีภาวะโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา

1.4 True Positive (TP) คือ แบบจำลองสามารถจำแนกได้ถูกต้องว่าเป็นภาพถ่ายจอประสาทตาที่มีภาวะโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา

2. ค่าความแม่นยำ (Accuracy) คือ สัดส่วนของการจำแนกที่ถูกต้องทั้งหมดเปรียบเทียบกับจำนวนตัวอย่างทั้งหมดเป็นความสามารถของแบบจำลองในการจำแนกภาพที่มีและไม่มีภาวะโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทได้อย่างถูกต้อง

$$Accuracy = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN) \quad (1)$$

3. ค่าความไว (Sensitivity) คือ สัดส่วนของภาพถ่ายจอประสาทตาที่มีภาวะโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาซึ่งแบบจำลองสามารถจำแนกได้อย่างถูกต้อง ถือเป็นความสามารถของแบบจำลองในการจำแนกภาพถ่ายที่มีภาวะของโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาได้อย่างถูกต้อง

$$Sensitivity = TP / (TP + FN) \quad (2)$$

4. ค่าความจำเพาะ (Specificity) สัดส่วนภาพถ่ายจอประสาทตาที่ไม่มีภาวะโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาซึ่งแบบจำลองสามารถจำแนกได้อย่างถูกต้อง ถือเป็นความสามารถของแบบจำลองในการจำแนกภาพถ่ายที่ไม่มีภาวะของโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาได้อย่างถูกต้อง

$$\text{Specificity} = TN / (TN + FP) \quad (3)$$

5. ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ (F1-score) คือ ค่าที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยวัดความสมดุลระหว่างความแม่นยำในการจำแนกภาพได้ถูกต้อง (Precision) และความครบถ้วนในการตรวจจับภาพ (Recall) ในแต่ละคลาส

$$\text{Precision (Positive)} = TP / (TP + FP) \quad (4)$$

$$\text{Recall (Positive)} = TP / (TP + FN) \quad (5)$$

$$\text{Precision (Negative)} = TN / (TN + FN) \quad (6)$$

$$\text{Recall (Negative)} = TN / (TN + FP) \quad (7)$$

$$\text{F1-measure} = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (8)$$

การนำไปใช้งาน

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้เป็นทางเลือกเพิ่มเติมสำหรับระบบคัดกรองในพื้นที่ห่างไกลหรือขาดแคลนผู้ชำนาญการในการคัดกรองโรค ช่วยลดเวลาในการตรวจวินิจฉัย และเพิ่มโอกาสในการเข้าถึงบริการคัดกรองสำหรับผู้ป่วยที่เสี่ยงต่อการเป็นโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา สามารถบูรณาการเข้ากับระบบการแพทย์ทางไกล เพื่อส่งผลวิเคราะห์และจัดลำดับความเร่งด่วนก่อนการวินิจฉัยโดยจักษุแพทย์ โดยใช้งานในลักษณะเป็นเครื่องมือช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิก

ผลการวิจัย

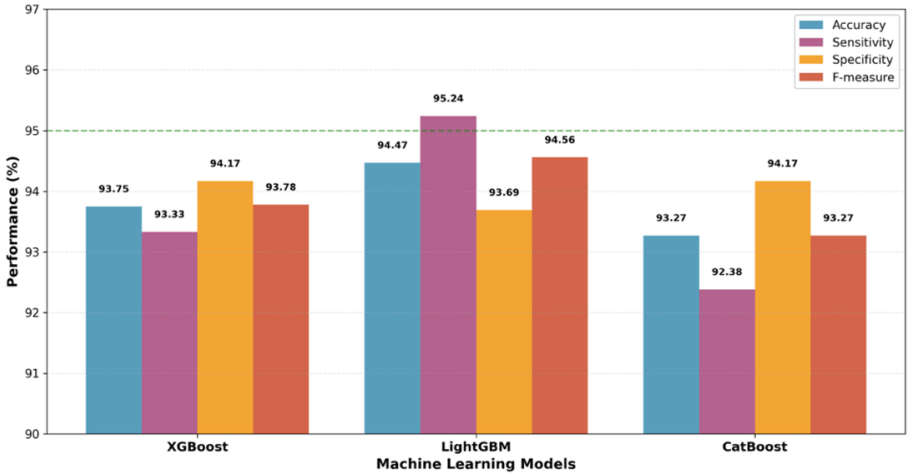
จากตารางที่ 2 แสดงตารางเมตริกซ์ความสับสนซึ่งแสดงผลการจำแนกของแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองเอ็กตรีมกราเดียนบูสต์สามารถจำแนกผู้ป่วยที่ไม่มีภาวะเบาหวานขึ้นจอประสาทตาได้อย่างถูกต้อง (TN) จำนวน 194 ราย และจำแนกผู้ป่วยที่มีภาวะเบาหวานขึ้นจอประสาทตาได้อย่างถูกต้อง (TP) จำนวน 196 ราย แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนในการจำแนกประเภทค่อนข้างต่ำ โดยมีการวินิจฉัยเป็นผลบวกลวง (FP) จำนวน 12 ราย ซึ่งหมายถึงผู้ป่วยที่ไม่มีภาวะเบาหวานขึ้นจอประสาทตาแต่ถูกจำแนกว่ามีภาวะของโรค และมีการวินิจฉัยลบลวง (FN) จำนวน 14 ราย ซึ่งหมายถึงผู้ป่วยที่มีภาวะเบาหวานขึ้นจอประสาทตาแต่ถูกจำแนกว่าไม่มีภาวะของโรค แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความสมดุลที่ดีในการจำแนกทั้งผู้ป่วยที่มีภาวะของโรคและไม่มีภาวะของโรค โดยมีอัตราความคลาดเคลื่อนทั้งสองประเภทที่ใกล้เคียงกัน แบบจำลองไลต์จีบีเอ็มสามารถจำแนกผู้ป่วยที่ไม่มีภาวะเบาหวานขึ้นจอประสาทตาได้อย่างถูกต้อง 193 ราย และจำแนกผู้ป่วยที่มีภาวะเบาหวานขึ้นจอประสาทตาได้อย่างถูกต้องสูงสุดจำนวน 200 ราย มีค่าการวินิจฉัยบวกลวง (FP) จำนวน 13 ราย และมีค่าการวินิจฉัยลบลวง (FN) ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นที่ 10 ราย ซึ่งแสดงความสามารถในการตรวจจับผู้ป่วยที่มีภาวะเบาหวานขึ้นจอประสาทตาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีอัตราการผิดพลาดในการตรวจจับผู้ป่วยที่มีภาวะของโรคต่ำที่สุดมีความสำคัญอย่างยิ่งในทางคลินิก โดยเฉพาะประเด็นการป้องกันการวินิจฉัยผิดพลากที่อาจนำไปสู่ภาวะแทรกซ้อนรุนแรง เช่นการสูญเสียการมองเห็นถาวร แบบจำลองแคทบูสต์สามารถจำแนกผู้ป่วยที่ไม่มีภาวะเบาหวานขึ้นจอประสาทตาได้อย่างถูกต้อง ที่ 194 ราย และจำแนกผู้ป่วยที่มีภาวะเบาหวานขึ้นจอประสาทตาได้อย่างถูกต้อง 194 ราย มีค่าการวินิจฉัยบวกลวง (FP) ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นที่ 12 ราย แต่มีค่าการวินิจฉัยลบลวง (FN) สูงสุดจำนวน 16 ราย

ตารางที่ 2 ตารางเมตริกซ์ความสับสนแสดงผลการจำแนกของแบบจำลอง

แบบจำลอง	TN	FP	FN	TP
เอ็กตรีมกราเดียนบูสต์	194	12	14	196
ไลต์จีบีเอ็ม	193	13	10	200
แคทบูสต์	194	12	16	194

จากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องทั้ง 3 แบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มมีประสิทธิภาพในการจำแนกที่ดีที่สุด โดยมีความไวสูงสุดที่ร้อยละ 95.24 ความแม่นยำสูงสุดที่ร้อยละ 94.47 และค่าประสิทธิภาพโดยรวมของแบบจำลองที่ร้อยละ 94.56 ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการตรวจจับผู้ป่วยที่เป็นโรคได้มากที่สุดโดยมีความผิดพลาดเกิดขึ้นเพียงร้อยละ 4.76 แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพรองลงมาคือแบบจำลองเอ็กตรีมกราเดียนบูสต์แสดงความสมดุลที่ดีระหว่างตัวชี้วัดต่างๆ โดยแบบจำลองเอ็กตรีมกราเดียนบูสต์มีความแม่นยำที่ร้อยละ 93.75 ความไวที่ร้อยละ 93.33 และความจำเพาะสูงสุดที่ร้อยละ 94.17 ซึ่งเท่ากับแบบจำลองแคทบูสต์ ทั้งนี้แบบจำลองแคทบูสต์มีความไวต่ำที่สุดที่ร้อยละ 92.38 และมีความแม่นยำต่ำที่สุดที่ร้อยละ 93.27 ซึ่งพลาดการตรวจจับภาพที่มีภาวะโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาสูงถึงร้อยละ 7.62 คิดเป็นความแตกต่างร้อยละ 2.86 เมื่อเทียบกับแบบจำลองไลต์จีบีเอ็ม ทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับการคัดกรองโรคแม้ว่าแบบจำลองแคทบูสต์มีความจำเพาะสูงสุดที่ร้อยละ 94.17 เนื่องจากความแตกต่างของความจำเพาะระหว่างแบบจำลองทั้งหมดมีเพียงร้อยละ 0.48

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทั้งหมดมีความสามารถในการจำแนกภาพที่มีภาวะโรคได้ใกล้เคียงกันในระดับสูง แต่มีจุดเด่นที่แตกต่างกันที่ค่าความไวหรือความสามารถในการตรวจจับผู้ป่วยซึ่งมีความสำคัญมากกว่าการจำแนกภาพถ่ายซึ่งไม่มีภาวะของโรคหรือค่าความจำเพาะ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพโดยรวมของแบบจำลองซึ่งสะท้อนถึงความสมดุลระหว่างความแม่นยำในการวินิจฉัยกลุ่มที่มีภาวะของโรคและความสามารถในการตรวจจับผู้ป่วย พบว่าแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 94.56 รองลงมาคือแบบจำลองเอ็กตรีมกราเดียนบูสต์ที่ร้อยละ 93.78 และแบบจำลองแคทบูสต์มีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 93.27 ซึ่งการจัดลำดับของค่าประสิทธิภาพโดยรวมของแบบจำลองนี้สอดคล้องกับลำดับของความแม่นยำ แสดงให้เห็นว่าทั้งสองตัวชี้วัดนี้สะท้อนประสิทธิภาพโดยรวมของแบบจำลองได้อย่างสอดคล้องกัน ดังนั้นแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มจึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้ในการคัดกรองโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาในงานวิจัยและชุดข้อมูลชุดนี้



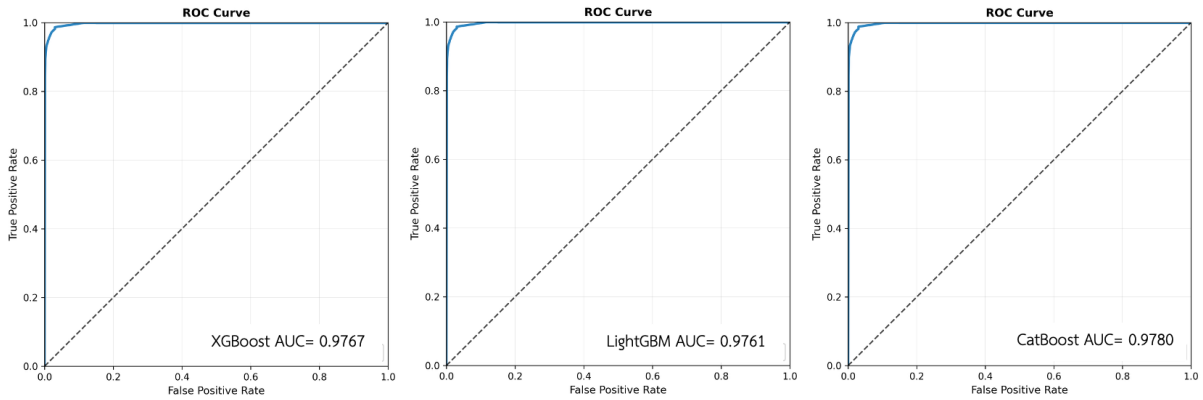
ภาพที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูสติ้ง

การวิเคราะห์ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการประเมินแบบจำลองตามตัวชี้วัดซึ่งแสดงในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มมีความเสถียรสูงที่สุด โดยมีการกระจายตัวของผลการทดลองประสิทธิภาพน้อยที่สุดในเกือบทุกตัวชี้วัดซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในทางคลินิก เนื่องจากความสามารถในการให้ผลลัพธ์ที่สม่ำเสมอเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการคัดกรองโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาในงานวิจัยนี้ ทั้งในแง่ของประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือ

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการประเมินแบบจำลองตามตัวชี้วัด

แบบจำลอง	ค่าความแม่นยำ	ความไว	ความจำเพาะ	ค่าประสิทธิภาพโดยรวม
เอ็กตรีมกราเดียนบูสต์	± 0.016618	± 0.023267	± 0.014136	± 0.017246
ไลต์จีบีเอ็ม	± 0.010793	± 0.016361	± 0.016878	± 0.010899
แคทบูสต์	± 0.019576	± 0.026746	± 0.017211	± 0.020285

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์กราฟพื้นที่ใต้เส้นโค้งอาร์โอซี (Area Under the Curve of the Receiver Operating Characteristic หรือ AUC-ROC) ตามภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องมีประสิทธิภาพในการจำแนกโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาอยู่ในระดับดีเยี่ยม โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.9761 ถึง 0.9780 ซึ่งมีความใกล้เคียงกันมาก แบบจำลองแคทบูสต์มีค่าสูงสุดที่ 0.9780 แสดงความสามารถในการจำแนกระหว่างกลุ่มที่มีภาวะของโรคและไม่มีภาวะของโรคได้ดีที่สุดโดยรวม รองลงมาคือแบบจำลองเอ็กตรีมกราเดียนบูสต์ (0.9767) และแบบจำลองไลต์จีบีเอ็ม (0.9761) อย่างไรก็ตามการเลือกใช้แบบจำลองในทางปฏิบัติควรพิจารณาร่วมกับวัตถุประสงค์ทางคลินิก โดยแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มที่มีค่าความไวสูงสุดจึงมีเหมาะสมกว่าในประเด็นการคัดกรองโรค แม้ว่าค่าการวิเคราะห์กราฟพื้นที่ใต้เส้นโค้งอาร์โอซีจะมีค่าน้อยกว่าก็ตาม เนื่องจากการคัดกรองโรคที่ผิดพลาดอาจนำไปสู่การสูญเสียการมองเห็นถาวร รวมไปถึงการคัดกรองผู้ป่วยที่มีภาวะของโรคจริงผิดพลาดมีผลกระทบรุนแรงกว่าการวินิจฉัยบวกลวง ซึ่งสามารถตรวจยืนยันเพิ่มเติมได้ในภายหลังและความแตกต่างดังกล่าวอยู่ในอัตราที่ต่ำมาก



ภาพที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์กราฟพื้นที่ใต้เส้นโค้งอาร์โอซี

ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่ใต้เส้นโค้งอาร์โอซีดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าทั้ง 3 แบบจำลองมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำมากอยู่ในช่วง ±0.0112 ถึง ±0.0116 แสดงให้เห็นว่าทั้ง 3 แบบจำลองมีความเสถียรสูงและให้ผลการจำแนกที่สม่ำเสมอในทุกรอบ โดยแบบจำลองแคทบูสต์มีความเสถียรสูงสุดด้วยค่าส่วนเบี่ยงเบน

มาตรฐานต่ำที่สุดที่ ±0.0112 รองลงมาคือแบบจำลองไลต์จีบีเอ็ม (±0.0115) และแบบจำลองเอ็กตรีมกราเดียนบูสต์ (±0.0116) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามความแตกต่างของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างทั้งสามแบบจำลองมีเพียง 0.0004 ซึ่งถือว่าน้อยมาก สามารถสรุปได้ว่าทั้งสามแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและความคงที่ของประสิทธิภาพในระดับที่ใกล้เคียงกันมากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคัดกรองผู้ป่วยโดยไม่ต้องกังวลในประเด็นความแปรปรวนของผลลัพธ์

ตารางที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวิเคราะห์กราฟพื้นที่ใต้เส้นโค้งอาร์โอซี

แบบจำลอง	การวิเคราะห์กราฟพื้นที่ใต้เส้นโค้งอาร์โอซี	ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เอ็กตรีมกราเดียนบูสต์	0.9767	± 0.0116
ไลต์จีบีเอ็ม	0.9761	± 0.0115
แคทบูสต์	0.9780	± 0.0112

จากค่าความสำคัญของคุณลักษณะดังตารางที่ 3 แสดงค่าความสำคัญของคุณลักษณะ 20 อันดับแรก ซึ่งมีค่าความสำคัญหรือจำนวนครั้งที่ใช้คุณลักษณะเป็นตัวจำแนกทั้งหมด 711 ครั้ง หรือคิดเป็นร้อยละ 63.9% ของค่าความสำคัญรวมทั้งหมด ยกตัวอย่างคุณลักษณะที่มีค่าความสำคัญสูงสุด 3 ลำดับแรกคือ HH1_entropy ถูกใช้ในการจำแนก 65 ครั้งคิดเป็นร้อยละ 5.84 HL1_skewness ถูกใช้ในการจำแนก 61 ครั้งคิดเป็นร้อยละ 5.48 และ LH3_entropy ถูกใช้ในการจำแนก 50 ครั้งคิดเป็นร้อยละ 4.49 เป็นต้น การจำแนกตามซับแบนด์แสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะจากซับแบนด์แนวตั้ง (HL) ถูกคัดเลือกมาเพื่อใช้จำแนกมากที่สุดที่ 9 คุณลักษณะคิดเป็นร้อยละ 39.4 รองลงมาคือแนวนอน (LH) 5 คุณลักษณะคิดเป็นร้อยละ 26.3 และแนวทแยง (HH) 4 คุณลักษณะคิดเป็นร้อยละ 22.2 ในประเด็นการจำแนกตามประเภทคุณลักษณะพบว่าค่าความเบ้และค่าเอนโทรปีมีสัดส่วนสูงสุดที่ 12 คุณลักษณะคิดเป็นร้อยละ 60 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าแบบจำลองอาศัยลักษณะเชิงโครงสร้างพื้นผิวและรูปร่างการกระจายของสัญญาณเวฟเลตส์เป็นคุณลักษณะหลักในการจำแนก

ตารางที่ 5 แสดงค่าความสำคัญของคุณลักษณะซึ่งถูกเลือกใช้ในการจำแนก 20 ลำดับแรกของแบบจำลองไลต์จีบีเอ็ม

ลำดับ	คุณลักษณะ	ซับแบนด์	ความสำคัญ	สัดส่วน(ร้อยละ)
1	HH1_entropy	HH1	65	5.84
2	HL1_skewness	HL1	61	5.48
3	LH3_entropy	LH3	50	4.49
4	LL3_skewness	LL3	48	4.31
5	LH3_skewness	LH3	47	4.22
6	LL3_entropy	LL3	38	3.41
7	HH3_mean	HH3	36	3.23
8	LH1_skewness	LH1	35	3.14
9	LH2_entropy	LH2	34	3.05
10	HL3_skewness	HL3	34	3.05
11	HL1_mean	HL1	31	2.79
12	HH2_mean	HH2	29	2.61
13	HH1_skewness	HH1	28	2.52
14	HL3_mean	HL3	28	2.52
15	HL1_kurtosis	HL1	28	2.52

ลำดับ	คุณลักษณะ	ซับแบนด์	ความสำคัญ	สัดส่วน(ร้อยละ)
16	HL3_entropy	HL3	26	2.34
17	HL2_skewness	HL2	25	2.25
18	HL2_std	HL2	24	2.16
19	HL3_kurtosis	HL3	23	2.07
20	LH1_std	LH1	21	1.89

จากตารางที่ 5 แสดงคุณลักษณะที่มีความสำคัญ 20 อันดับแรกของแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มพบว่าคุณลักษณะเอนโทรปีและความเบ้มีความสำคัญต่อการจำแนก โดยคุณลักษณะ HH1_entropy มีความสำคัญสูงสุดที่ร้อยละ 5.84 โดยค่าเอนโทรปีที่สูงสะท้อนความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวจอประสาทตาที่เกิดจากรอยโรคเช่น จุดเลือดออกขนาดเล็ก จุดเลือดออกขนาดใหญ่และรอยสารคัดหลั่ง ซึ่งทำให้ลักษณะพื้นผิวมีความซับซ้อนและกระจายตัวที่ไม่เป็นระเบียบ โดยซับแบนด์ HH1 และ HL1 สามารถจับการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงกัน ค่าเอนโทรปีที่สูงบ่งบอกถึงขอบรอยโรคและความผิดปกติของหลอดเลือดในแนวนอนและทแยงได้อย่างมีประสิทธิภาพในขณะที่จอประสาทตาปกติมีค่าเอนโทรปีที่ต่ำเนื่องจากพื้นผิวสม่ำเสมอ คุณลักษณะความเบ้ในแต่ละซับแบนด์ เช่น HL1_skewness LL3_skewness และ LH3_skewness สะท้อนความไม่สมมาตรของรอยโรค โดยความเบ้ที่เป็นบวกบ่งชี้การมีพิกเซลสว่างผิดปกติจากรอยสารคัดหลั่ง ขณะที่ความเบ้ที่เป็นลบสะท้อนพิกเซลที่มืดจากจุดเลือดออกขนาดเล็กและจุดเลือดออกขนาดใหญ่ ความเบ้ที่สูงหรือต่ำมากเกินไปแสดงให้เห็นว่ารอยโรคกระจายแบบไม่สมมาตรในหลายทิศทางซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา

อภิปรายผล

จากการวิเคราะห์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มมีประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับการจำแนกโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา โดยมีข้อได้เปรียบในเกือบทุกตัวชี้วัดหลัก ได้แก่ความแม่นยำสูงสุดที่ร้อยละ 94.47 ค่าความไวสูงสุดที่ร้อยละ 95.24 และมีค่าประสิทธิภาพโดยรวมของแบบจำลองที่ร้อยละ 94.56 แม้ว่าค่าความจำเพาะน้อยกว่าแบบจำลองแคทบูสต์และเอ็กตรีมกราเดียนบูสต์ที่ร้อยละ 93.69 แต่ความแตกต่างมีเพียงร้อยละ 0.48 โดยมีแบบจำลองเอ็กตรีมกราเดียนบูสต์เป็นตัวเลือกรองลงมา เนื่องจากแสดงความสมดุลที่ดีในทุกตัวชี้วัดแต่ประสิทธิภาพโดยรวมต่ำกว่าแบบจำลองไลต์จีบีเอ็ม โดยเฉพาะในประเด็นค่าความไวซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญที่สุดในการคัดกรองโรค แบบจำลองแคทบูสต์แม้จะมีค่าความจำเพาะสูงที่สุดแต่มีค่าความไวต่ำที่สุดทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับการคัดกรองโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา ทั้งนี้โดยทั่วไปการเลือกใช้แบบจำลองควรให้ความสำคัญกับค่าความไว เนื่องจากความผิดพลาดในการตรวจพบภาพถ่ายที่มีภาวะของโรคมีผลกระทบร้ายแรงต่อผู้ป่วยและระบบสาธารณสุขมากกว่าการวินิจฉัยบวกลวง ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการตรวจยืนยันเพิ่มเติมภายหลัง ดังนั้นจากเหตุผลดังกล่าวแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มจึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้ในทางคลินิกในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ทั้งนี้จากการเปรียบเทียบงานวิจัยที่มีวิธีการดำเนินการวิจัยใกล้เคียงกันพบว่าในภาพรวมของการใช้งานแบบจำลองแบบบูสติ้งมีประสิทธิภาพในการจำแนกด้วยระดับความแม่นยำที่สูงในทุกแบบจำลองสอดคล้องกับงานวิจัยโดย Ganie et al.[11] ในประเด็นการใช้งานคุณสมบัติซีมเล็ตพบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยโดย Onjun et al. [3] ซึ่งพบว่าซีมเล็ตเวฟเลตส์ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด ในการจำแนกโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาเมื่อเทียบกับเวฟเลตส์ชนิดอื่น โดยให้ความแม่นยำร้อยละ 92.94 เมื่อใช้ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันอย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการนำคุณลักษณะซีมเล็ตเวฟเลตส์มาใช้กับแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้สูงถึงร้อยละ 94.47 ซึ่งงานวิจัยนี้ให้ประสิทธิภาพมากกว่าที่ร้อยละ 1.62 โดยประมาณ พร้อมกับลด

ความซับซ้อนของแบบจำลองและเวลาในการประมวลผล และสอดคล้องกับงานวิจัยโดย Mutawa et al. [6] ซึ่งใช้คุณลักษณะเชิงสถิติที่สกัดจากซับแบนด์เวฟเลตส์เพื่อจำแนกโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตา พบว่าแบบจำลองสามารถตรวจจับรายละเอียดทั้งในระดับหยาบและระดับละเอียดของภาพจอประสาทตาได้ครบถ้วน แสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะเวฟเลตส์เป็นคุณลักษณะเชิงสถิติที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาได้อย่างมีนัยสำคัญ ในประเด็นความเร็วด้านการประมวลผลพบว่าแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มมีความเร็วมากกว่าแบบจำลองแบบบูสติ้งอื่นสอดคล้องกับงานวิจัยโดย Rufo et al. [15] ในประเด็นการใช้แบบจำลองไลต์จีบีเอ็มเพื่อจำแนกโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาพบว่าผลการวิจัยสอดคล้องกับ Bidwai et al. [23] Bapatla and Harikiran. [24] และ Aziz et al. [25] ซึ่งประยุกต์ใช้แบบจำลองไลต์จีบีเอ็มร่วมกับข้อมูลเชิงตัวเลขเพื่อวินิจฉัยโรคทางตาด้วยภาพถ่ายทางการแพทย์ พบว่าผลการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองมีความใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยในปัจจุบันพบว่ามักใช้คุณลักษณะของภาพถ่ายร่วมกับแบบจำลองและกระบวนการที่ซับซ้อน การใช้ทรัพยากรและเวลาที่มากกว่าในกระบวนการพัฒนาแบบจำลอง โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างแบบจำลองแบบบูสติ้งซึ่งมีความรวดเร็วในการฝึกสอนและมีประสิทธิภาพการจำแนกที่สูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ ร่วมกับการสกัดคุณลักษณะซีมเล็ตซึ่งสามารถอธิบายพื้นผิวของจอประสาทตาได้ดี นำมาซึ่งกระบวนการคัดกรองที่มีความเป็นไปได้และเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในสถานพยาบาลโดยเฉพาะในพื้นที่ห่างไกลที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร

ทั้งนี้งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในประเด็นการใช้ชุดข้อมูลซึ่งมีขนาดจำกัดและมาจากแหล่งข้อมูลเดียว อาจส่งผลต่อความสามารถด้านการจำแนกที่ครอบคลุมในกรณีที่ต้องประมวลผลร่วมกับแหล่งข้อมูลอื่น การจำแนกโดยแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องมีเพียง 2 รูปแบบและยังไม่จำแนกตามระดับความรุนแรงของโรค และการวิจัยครั้งนี้แม้จะมีประสิทธิภาพในการจำแนกสูงแต่ยังไม่ได้เปรียบเทียบกับการจำแนกโดยอาศัยการเรียนรู้เชิงลึกหรือวิธีการที่ซับซ้อนซึ่งเป็นที่นิยมในปัจจุบัน

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยพบว่าซีมเล็ตสามารถทำงานร่วมกับแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องชนิดบูสต์ติ้งอัลกอริทึ่มได้ดีและมีคุณสมบัติในการจำแนกโรคเบาหวานขึ้นจอประสาทตาด้วยภาพถ่ายทางการแพทย์ได้ดีเนื่องจากเป็นคุณลักษณะเวฟเลตส์ทรานสฟอร์มแบบไม่ต่อเนื่องที่มีความซ้ำซ้อนของข้อมูลน้อย การประมวลผลมีข้อมูลสูญหายน้อย และคำนวณได้รวดเร็วผ่านอัลกอริทึมฟาสต์เวฟเลตส์ทรานสฟอร์ม จึงเหมาะสำหรับระบบวินิจฉัยที่ต้องการทราบผลในทันที เมื่อใช้งานซีมเล็ตร่วมกับแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มพบว่ามีผลการจำแนกมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบจำลองอื่นๆแทบทุกตัวชี้วัดและมีความเร็วในการประมวลผลสูงมาก เนื่องจากกระบวนการประมวลผลของแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มเลือกใช้เฉพาะข้อมูลที่สำคัญในการสร้างแบบจำลอง รวมคุณลักษณะที่ไม่ซับซ้อนกันเพื่อลดมิติข้อมูล สร้างต้นไม้ตัดสินใจโดยเลือกข้อมูลที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุดจากคุณสมบัติจำเพาะที่โดดเด่นซึ่งส่งเสริมกระบวนการทำงานระหว่างซีมเลตส์และแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มทำให้ได้ผลการจำแนกที่มีความแม่นยำและมีความรวดเร็วในการประมวลผล จากผลการวิจัยครั้งนี้คณะผู้วิจัยมีแนวความคิดในการวิจัยต่อยอดในประเด็นการพัฒนาแบบจำลองไลต์จีบีเอ็มสู่แอปพลิเคชันทางคลินิก โดยใช้ประโยชน์จากจุดเด่นด้านความรวดเร็วและความแม่นยำของซีมเลตส์และแบบจำลองไลต์จีบีเอ็ม โดยมีการออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้ที่เน้นความเรียบง่ายเพื่อให้แพทย์นำเข้าภาพถ่ายและรับผลวินิจฉัยภายในระยะเวลาที่รวดเร็ว สามารถบูรณาการผลการจำแนกของแบบจำลองร่วมกับการวิเคราะห์ความสำคัญของคุณลักษณะ เพื่อเชื่อมโยงการตัดสินใจของแบบจำลองกับลักษณะพยาธิวิทยาทางคลินิก สามารถประยุกต์ใช้เป็นทางเลือกเพื่อเพิ่มการตรวจพบโรคในระยะเริ่มต้นพร้อมกับลดภาระงานของแพทย์และลดความเสี่ยงในการสูญเสียการมองเห็นของผู้ป่วย

เอกสารอ้างอิง

1. Chanlalit W. Ocular complications from diabetes mellitus. J Med Health Sci. 2016; 23(2): 36-45. https://shorturl.asia/bz4ST
2. กรกัญจน์ จิตโศภิษฐ์. ความชุกของภาวะเบาหวานขึ้นจอประสาทตาและระดับน้ำตาลสะสมในเลือดที่สัมพันธ์กับการเกิดภาวะเบาหวานขึ้นจอประสาทตาในผู้ป่วยโรคเบาหวาน โรงพยาบาลสันป่าตอง จังหวัดเชียงใหม่. วารสารวิชาการป้องกันควบคุมโรค สคร.2 พิษณุโลก. 2566; 10(2): 15-25. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/dpcphs/article/view/262223
3. Onjun R, Lowmunkhong S, Kaennakham S, Phattaramarut K. Diabetic retinopathy detection using a convolutional neural network enhanced by wavelet transformation pooling. In: Proceedings of the 2024 16th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Technology (ICBBT '24); 2024 May 24-26; Chongqing. Association for Computing Machinery; 2024. p. 265-269. https://dl.acm.org/doi/10.1145/3674658.3674699
4. Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images. In: Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision; 1998 Jan 7; Bombay. IEEE; 1998. p. 839-846. https://ieeexplore.ieee.org/document/710815
5. Rasta SH, Partovi ME, Seyedarabi H, Javadzadeh A. A comparative study on preprocessing techniques in diabetic retinopathy retinal images: illumination correction and contrast enhancement. J Med Signals Sens. 2015; 5(1): 40-48. Available from: https://shorturl.asia/0x8hs
6. Mutawa AM, Al-Sabti K, Raizada S, Sruthi S. A deep learning model for detecting diabetic retinopathy stages with discrete wavelet transform. Appl Sci. 2024; 14(11): 4428. https://doi.org/10.3390/app14114428
7. Darabi P. Diagnosis of diabetic retinopathy [dataset]. ResearchGate; 2024. https://www.researchgate.net/publication/382264856_Diagnosis_of_Diabetic_Retinopathy
8. PyWavelets. PyWavelets: wavelet transforms in python [Internet]. Read the Docs; [cited 2025 Nov 5]. Available from: https://pywavelets.readthedocs.io/en/latest/
9. Scikit-Image. Scikit-image: image processing in python [Internet]. PyPI; [cited 2025 Nov 6]. Available from: https://pypi.org/project/scikit-image
10. OpenCV. opencv-python [Internet]. PyPI; [cited 2025 Nov 19]. Available from: https://pypi.org/project/opencv-python/
11. Ganie SM, Pramanik PKD, Bashir Malik M, Mallik S, Qin H. An ensemble learning approach for diabetes prediction using boosting techniques. Front Genet. 2023; 14: 1252159. https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1252159
12. Chen T, Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system. In: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining; 2016 Aug 13-17; San Francisco. New York: ACM; 2016. p. 785-794. https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/2939672.2939785

13. Yang P, Yang B. Development and validation of predictive models for diabetic retinopathy using machine learning. PLoS One. 2025; 20(2): e0318226. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318226
14. Ke G, Meng Q, Finley T, Wang T, Chen W, Ma W, et al. LightGBM: a highly efficient gradient boosting decision tree. In: Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems; 2017 Dec 4; Long Beach. Red Hook, NY: Curran Associates; 2017. p. 3149-3157. https://dl.acm.org/doi/10.5555/3294996.3295074
15. Rufo DD, Debelee TG, Ibenthal A, Negera WG. Diagnosis of diabetes mellitus using gradient boosting machine (LightGBM). Diagnostics. 2021; 11(9): 1714. https://doi.org/10.3390/diagnostics11091714
16. มนัสพร ตรีรุ่งโรจน์. ตัวแบบการเรียนรู้ของเครื่องอิทธิพลผสมสำหรับการวิเคราะห์การรอดชีพเวลาไม่ต่อเนื่อง [วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2565. https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6671
17. Xu W, Wang W, Ren H, Li X, Wen Y. Prediction and analysis of risk factors for diabetic retinopathy based on machine learning and interpretable models. Heliyon. 2024; 10(9): e29497. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29497
18. Pandas development team. Pandas: python data analysis library [Internet]. [cited 2025 Nov 9]. Available from: https://pandas.pydata.org
19. NumPy. NumPy: Fundamental package for array computing in Python [Internet]. PyPI; [cited 2025 Dec 7]. Available from: https://pypi.org/project/numpy
20. Scikit-learn. A set of python modules for machine learning and data mining [Internet]. PyPI; [cited 2025 Dec 7]. Available from: https://pypi.org/project/scikit-learn
21. SciPy. SciPy: Fundamental algorithms for scientific computing in Python [Internet]. PyPI; [cited 2025 Nov 14]. Available from: https://pypi.org/project/scipy
22. Kohavi R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In: Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence; 1995 Aug 20; Montreal. San Francisco: Morgan Kaufmann; 1995. p.1137-1143. https://dl.acm.org/doi/10.5555/1643031.1643047
23. Bidwai P, Gite S, Pradhan B, Almari A. Explainable diabetic retinopathy detection using a distributed CNN and LightGBM framework. Comput Mater Contin. 2025; 84(2): 2645-2676. https://www.techscience.com/cmc/v84n2/62859
24. Bapatla S, Harikiran J. LuNet-LightGBM: an effective hybrid approach for lesion segmentation and DR grading. Comput Syst Sci Eng. 2023; 46(1): 597-617. https://doi.org/10.32604/csse.2023.034998
25. Aziz A, Tezel NS, Kaçmaz S, Attallah Y. Early diabetic retinopathy detection from OCT images using multifractal analysis and multi-layer perceptron classification. Diagnostics. 2025; 15(13): https://doi.org/10.3390/diagnostics15131616

บทความวิจัย (Research Article)

การศึกษาพฤติกรรมและจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน

Drying Characteristics and Kinetic Modeling of Paddy Rice in an Infrared Dryer Powered by Liquefied Petroleum Gas

ณัฐวิภา พันธุ์สะอาด[1], เชิดพงษ์ เชี่ยวชาญวัฒนา[1] และ จักรมาส เลาหวณิช[1*]
Natthawipa Phansaart[1], Cherdpong Chiawchanwattana[1] and Juckamas Laohavanich[1*]
[1]สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University
*Corresponding author; email: juckamas.l@msu.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
24 กุมภาพันธ์ 2569	20 มีนาคม 2569	20 มีนาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างกระบวนการอบแห้ง การทดสอบข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 20% และ 30% ฐานเปียก อุณหภูมิอินฟราเรด 550, 650 และ 750 องศาเซลเซียส โดยกำหนดช่วงเวลาอบแห้ง 2, 4, 6, 8 และ 10 นาที คำนวณค่าอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio : MR) เป็นฟังก์ชันของเวลา และนำข้อมูลไปปรับกับแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบาง Newton Model, Page Model และ Logarithmic Model โดยประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยรากที่สอง (RMSE) และค่าไคสแควร์ (X^2) ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอินฟราเรดส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยอุณหภูมิอินฟราเรด 750 องศาเซลเซียส สามารถลดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อุณหภูมิเมล็ดข้าวสูงเสี่ยงต่อความเสียหายของโครงสร้างเมล็ด อุณหภูมิอินฟราเรด 550 องศาเซลเซียส มีอัตราการลดความชื้นต่ำ ส่งผลต่อเวลาการอบแห้งยาวนานขึ้น ขณะที่อุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส ให้ความสมดุลที่เหมาะสมระหว่างประสิทธิภาพการลดความชื้นและการควบคุมอุณหภูมิเมล็ดข้าว ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง Page Model สมการ $MR = \exp(-kt^n)$ ให้ความแม่นยำสูงสุดในทุกสภาวะ และอุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้น 30% ฐานเปียก ให้ค่า $R^2 = 0.99882$ และ RMSE = 0.00608 ค่าพารามิเตอร์ k = 0.32446 และ n = 0.44687 ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้อย่างแม่นยำ เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในการออกแบบและควบคุมกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก

คำสำคัญ: ข้าวเปลือก, การอบแห้งอินฟราเรด, การอบแห้งแบบชั้นบาง, สมการถดถอยไม่เชิงเส้น, สมการเอมพิริคัล

Abstract

This study aim to investigate the drying characteristics and kinetic modeling of paddy rice using an infrared dryer powered by liquefied petroleum gas and to develop a mathematical model to predict moisture changes during the drying process. Paddy rice samples with initial moisture contents of 20% and 30% (wet basis) were dried at infrared temperatures of 550, 650, and 750°C for 2, 4, 6, 8, and 10 minutes. The moisture ratio (MR) was calculated as a function of drying time and fitted to thin-layer drying models Newton Model, Page Model and Logarithmic models. Model performance was evaluated using the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), and chi-square (X^2). The results showed that increasing infrared temperature significantly enhanced the drying rate. Infrared temperature of 750°C resulted in rapid moisture reduction but led to elevated grain temperature, increasing the risk of structural damage. Infrared temperature of 550°C produced a lower moisture reduction rate and required a longer drying time. The infrared temperature of 650°C provided a suitable balance between drying efficiency and grain temperature control. Among the tested models, the Page model, expressed as $MR = \exp(-kt^n)$, provided the highest accuracy under all conditions. At Infrared temperature 650°C with an initial moisture content of 30% (wet basis), the model $R^2 = 0.99488$ and $RMSE = 0.00608$ with kinetic parameters k = 0.32446 and n = 0.44687. The model accurately predicted the drying behavior and demonstrated potential for application in the design and control of paddy rice drying processes.

Keywords: Paddy Rice, Infrared Drying, Thin-layer drying, Nonlinear regression, Empirical mode

บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจและความมั่นคงทางอาหารของประเทศไทย ข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่มักมีความชื้นสูง [1] กระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวโดยเฉพาะการลดความชื้นของข้าวเปลือก มีบทบาทสำคัญต่อการรักษาคุณภาพเมล็ด การลดการเสื่อมสภาพ การป้องกันการเกิดเชื้อรา จำเป็นต้องผ่านกระบวนการอบแห้งเพื่อลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาและการสีแปรรูป [5] โดยทั่วไปสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกให้เหลือประมาณ 13–16% ฐานเปียก [14] ถือเป็นระดับที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาและการสีแปรรูป [5] เทคโนโลยีการอบแห้งข้าวเปลือกมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งระบบลมร้อนแบบคอลัมน์และแบบไหลต่อเนื่อง ซึ่งอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนจากลมร้อนไปยังข้าวเปลือกและเกิดการระเหยของน้ำออกจากข้าวเปลือก เทคโนโลยีดังกล่าวสามารถรองรับปริมาณข้าวเปลือกได้จำนวนมาก มีความเสถียรเหมาะสำหรับการใช้งานระดับโรงสีขนาดใหญ่

อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการอบแห้งดังกล่าวอาจใช้เวลานานและสิ้นเปลืองพลังงาน เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ได้รับความสนใจ การให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นวิธีการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสี เนื่องจากสามารถถ่ายเทความร้อนเข้าสู่วัสดุโดยตรง [10] โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดจากกระบวนการแพร่ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของน้ำจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ เมื่อความชื้นเคลื่อนที่มาถึงผิวเมล็ดข้าวเปลือกจะระเหยออกสู่บรรยากาศภายนอก ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและระยะเวลาในการอบแห้งลดลง [1, 2] ส่งผลให้มีการศึกษาการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความ [14] รายงานการใช้รังสีอินฟราเรดสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งและเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [14] ในการศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [16] ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อ

อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือก และชี้ให้เห็นว่าการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมมีผลต่อความแม่นยำในการทำนายข้อมูลเชิงทดลองอย่างมีนัยสำคัญ [3] และรายงานแบบจำลอง เช่น Page และ Logarithmic สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดได้อย่างแม่นยำ โดยให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำและค่า R^2 สูง [17]

แม้ว่าจะมีงานวิจัยที่ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดหลายรูปแบบ แต่ส่วนใหญ่ใช้แหล่งพลังงานจากไฟฟ้าหรือใช้ร่วมกับลมร้อน ขณะที่การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas : LPG) เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน และการสร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้สภาวะความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิอินฟราเรดที่แตกต่างกันยังมีข้อมูลที่จำกัด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกภายใต้สภาวะต่าง ๆ ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน และพัฒนาการสร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นในกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก และเหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน

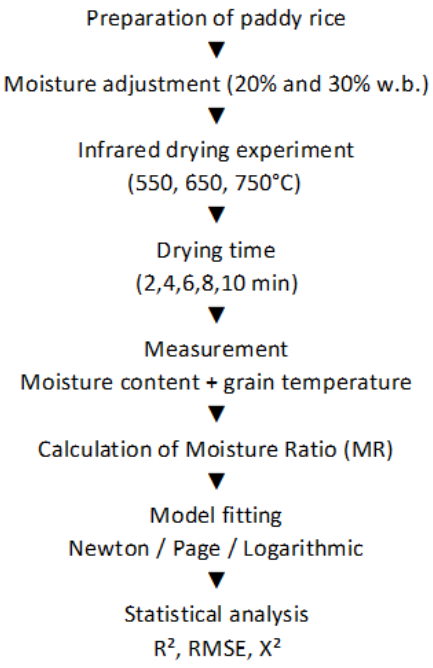
ตารางที่ 1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยอินฟราเรด

Author	Material	Drying Method	Temperature	Model
[20]	Paddy rice	Far-infrared drying	60–100°C	Page
[19]	Rough rice	Infrared drying	IR radiation	Fick diffusion
[17]	Glutinous rice	Infrared drying	70–90°C	Page
[22]	Paddy rice	Graphene infrared dryer	60–120°C	Page
[13]	Paddy rice	Infrared drying	63-77°C	Newton, Page, Logarithmic

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวหลังการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน
2. สร้างสมการทางคณิตศาสตร์อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งข้าวเปลือกในสภาวะความชื้นเริ่มต้นต่าง ๆ

วิธีดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 1 Schematic diagram of experimental procedure

1. การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน การทดสอบในแต่ละเงื่อนไขดำเนินการ 3 ซ้ำเงื่อนไขในการทดสอบดังนี้

ตัวแปรต้น

1.1 ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกเฉลี่ย 20% และ 30% ฐานเปียก ข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวโดยทั่วไปความชื้นอยู่ในช่วง 20-30% ฐานเปียก

1.2 อุณหภูมิอินฟราเรดที่ระดับ 550, 650 และ 750 องศาเซลเซียส ซึ่งครอบคลุมช่วงพลังงานความร้อนต่ำ ปานกลาง และสูง เพื่อศึกษาผลกระทบต่ออัตราการลดความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าว

1.3 ช่วงเวลาการอบแห้งที่ 2, 4, 6, 8 และ 10 นาที การเปลี่ยนแปลงของความชื้นในช่วงเวลาสั้น ซึ่งเหมาะสมกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนของระบบอินฟราเรดที่มีอัตราการให้ความร้อนสูง

ตัวแปรตาม

1.4 ความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

1.5 อุณหภูมิของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

2. การทดสอบเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน ต้องมีการเตรียมข้าวเปลือกก่อนนำเข้าอบแห้ง โดยในการทดสอบใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 [8] มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 นำข้าวเปลือก 10 กิโลกรัม แบ่ง 2 ส่วนเท่า ๆ กัน จากนั้นนำมาสเปรย์น้ำตามสัดส่วนที่กำหนด แล้วทำการคลุกเคล้าให้เข้ากัน นำเข้าตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 - 7 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

2.2 นำข้าวที่ผ่านการสเปรย์น้ำ 7 วันออกมาผึ่งในที่ร่มเป็นเวลา 1 ชั่วโมง [14] เพื่อให้ไอน้ำระเหยออก ก่อนนำไปอบแห้ง

2.3 การวัดความชื้นข้าวเปลือกก่อนอบแห้ง [18] จะทำการสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกมาชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล

2.4 จากนั้นนำข้าวเปลือกไปอบแห้ง (Hot Air Oven) ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส [15] เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.5 จากนั้นนำข้าวเปลือกที่ออกจากตู้อบแห้งมาพักให้อุณหภูมิข้าวเปลือกลดลง แล้วนำเข้าอบแห้งตามเงื่อนไข

2.6 หลังจากอบแห้งตามเงื่อนไขจะทำการชั่งน้ำหนักข้าวเปลือก และวัดอุณหภูมิเมล็ดข้าวหลังการอบแห้งเพื่อวิเคราะห์และสรุปผล

3. ทฤษฎีการอบแห้ง

ข้อมูลค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ได้จากการทดสอบนำมาคำนวณอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio : MR) เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการอบแห้ง เนื่องจากช่วยทำให้ข้อมูลความชื้นสามารถเปรียบเทียบกันได้โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นเริ่มต้น เพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการอบแห้ง และลดผลกระทบจากความแตกต่างของค่าความชื้นเริ่มต้น โดยอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

เมื่อ

M_t คือ ความชื้นของข้าวเปลือก ณ เวลา t (% ฐานเปียก)

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก (% ฐานเปียก)

M_e คือ ความชื้นสมดุล (% ฐานเปียก)

การศึกษาการอบแห้งทางการเกษตร ค่า M_e มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า M_0 และ M_t จึงประมาณค่าให้ $M_e \approx 0$ เพื่อทำให้สมการคำนวณง่ายขึ้น ดังนี้

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Effective Moisture Diffusivity Coefficient, D_{eff}) [11] เป็นคุณสมบัติจำเพาะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ เขียนสมการได้ ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = Deff^{\nabla^2 M} \quad (3)$$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis of Variance: ANOVA) วิธีทางสถิติที่ใช้ในการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่สองกลุ่มขึ้นไปมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ การวิเคราะห์นี้ช่วยประเมินว่าอุณหภูมิอินฟราเรดที่แตกต่างกันมีผลต่ออัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกหรือไม่ ภายใต้ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนดไว้

4. การสร้างแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล (Empirical drying models)

ความเหมาะสมและความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษานี้ประเมิน โดยใช้ดัชนีทางสถิติที่นิยมใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination : R^2) ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองเฉลี่ย (Root Mean Square Error : RMSE) และค่าไคสแควร์ (Chi-square : X^2) [16]

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ใช้เพื่อแสดงระดับความสอดคล้องระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าทดลอง โดยค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(MR_{exp} - MR_{pre})^2}{\sum(MR_{exp} - \bar{MR}_{exp})^2} \quad (4)$$

ค่า RMSE ใช้ในการประเมินค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองและค่าทดลอง โดยค่า RMSE หากมีค่าต่ำเข้าใกล้ 0 หมายถึง ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง สามารถคำนวณจากสมการ

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum(MR_{exp} - MR_{pre})^2} \quad (5)$$

ค่า X^2 ใช้ในการประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองกับข้อมูลการทดลองจริง หากค่า X^2 มีค่าต่ำ แสดงว่าแบบจำลองสามารถทำนายค่าความชื้นได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลองมาก โดยพิจารณาจำนวนพารามิเตอร์ในสมการซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\chi^2 = \frac{1}{N-z}\sum(MR_{exp} - MR_{pre})^2 \quad (6)$$

เครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน

เครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน ที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้มีส่วนประกอบไปด้วย (ภาพที่ 1)

4.1 หัวเผาอินฟราเรด (Infrared Burner) ให้ความร้อนสำหรับการอบแห้ง

4.2 มอเตอร์สั่น (Vibrating Motor) มีการสั่นเพื่อให้วัสดุที่นำมาอบแห้งได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอทั่วถึง

4.3 ตู้ควบคุม (Control Unit) แสดงอุณหภูมิของหัวเผาอินฟราเรด/เปิด-ปิดเครื่อง

4.4 ถังบรรจุแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหัวเผาอินฟราเรด

4.5 ถาดอบแห้ง (Drying Tray) สำหรับใส่วัสดุเพื่อใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 2 Infrared Dryer Powered by Liquefied Petroleum Gas



ภาพที่ 3 Infrared Dryer Powered by Liquefied Petroleum Gas

ผลการวิจัย

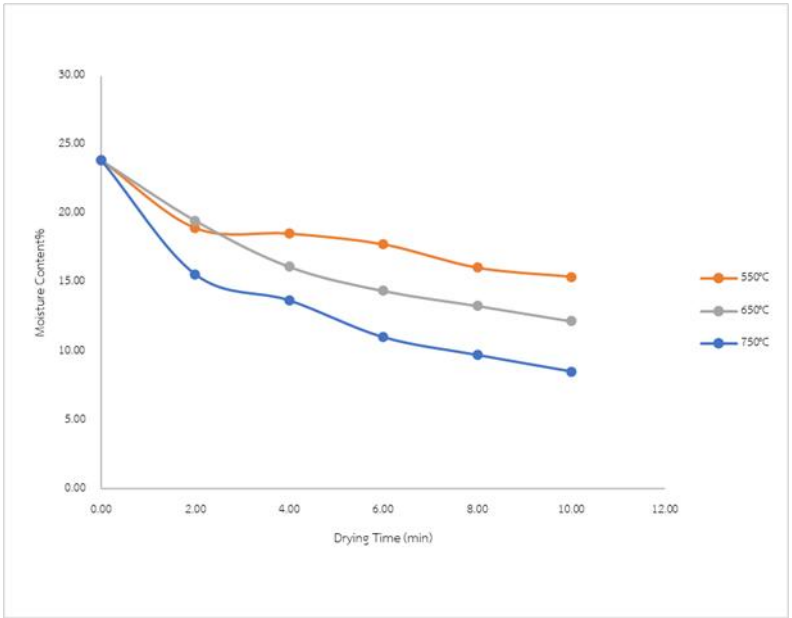
ผลการศึกษาการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน

การศึกษาผลการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas : LPG) เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการลดความชื้นและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวภายใต้สภาวะอุณหภูมิอินฟราเรดและระยะเวลาอบแห้งที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิอินฟราเรด 550, 650 และ 750 องศาเซลเซียส ที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 20% และ 30% ฐานเปียก และช่วงเวลาอบแห้ง 2, 4, 6, 8 และ 10 นาที ผลการทดลองถูกนำเสนอในรูปแบบของค่าความชื้นหลังการอบแห้งและอุณหภูมิเมล็ดข้าว เพื่อใช้วิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ

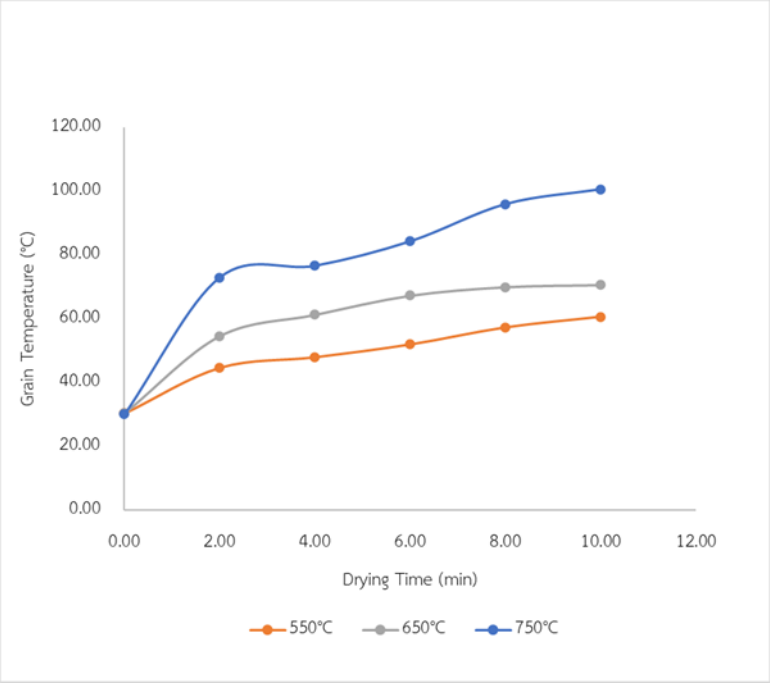
วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 (มกราคม - มิถุนายน 2569)

ตารางที่ 2 ความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

ความชื้นข้าวเปลือก	เวลา (s)	อุณหภูมิอินฟราเรด 550°C		อุณหภูมิอินฟราเรด 650°C		อุณหภูมิอินฟราเรด 750°C	
		ความชื้นหลังการอบแห้ง	อุณหภูมิเมล็ดข้าวหลังการอบแห้ง	ความชื้นหลังการอบแห้ง	อุณหภูมิเมล็ดข้าวหลังการอบแห้ง	ความชื้นหลังการอบแห้ง	อุณหภูมิเมล็ดข้าวหลังการอบแห้ง
20 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก	0	18.03 ± 0.00	30.40 ± 0.56	18.03 ± 0.00	30.43 ± 0.60	18.03 ± 0.00	30.87 ± 0.85
	2	13.87 ± 1.35	46.67 ± 3.06	13.92 ± 0.70	56.67 ± 3.06	12.31 ± 1.50	68.00 ± 7.21
	4	12.81 ± 1.51	51.33 ± 1.15	12.43 ± 0.27	62.00 ± 2.00	10.47 ± 3.54	80.00 ±10.00
	6	12.94 ± 0.16	54.67 ± 2.31	10.97 ± 0.44	68.67 ± 1.15	9.15 ± 0.73	80.67 ± 6.11
	8	12.21 ± 0.05	57.33 ± 1.15	9.82 ± 0.51	78.67 ± 6.11	8.08 ± 1.75	102.67 ± 7.02
	10	11.00 ± 0.86	62.00 ± 2.00	9.82 ± 0.51	84.00 ± 3.46	6.85 ± 0.83	106.00 ± 8.72
ความชื้นข้าวเปลือก 30 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก	0	23.87 ± 0.00	30.40 ± 0.56	23.87 ± 0.00	30.43 ± 0.60	23.87 ± 0.00	30.87 ± 0.85
	2	18.96 ± 0.98	44.67 ± 2.31	19.49 ± 1.85	54.67 ± 4.62	15.59 ± 3.07	73.00 ± 5.57
	4	18.55 ± 0.71	48.00 ± 2.00	16.15 ± 2.75	61.33 ± 4.16	13.71 ± 2.66	76.67 ± 5.77
	6	17.77 ± 1.01	52.00 ± 2.00	14.41 ± 0.90	67.33 ± 4.16	11.04 ± 3.15	84.33 ± 5.13
	8	16.07 ± 0.62	57.33 ± 2.31	13.31 ± 0.81	70.00 ± 4.00	9.75 ± 2.19	96.00 ± 2.00
	10	15.40 ± 0.52	60.67 ± 1.15	12.20 ± 0.84	70.67 ± 6.11	8.55 ± 2.31	100.67 ± 5.77



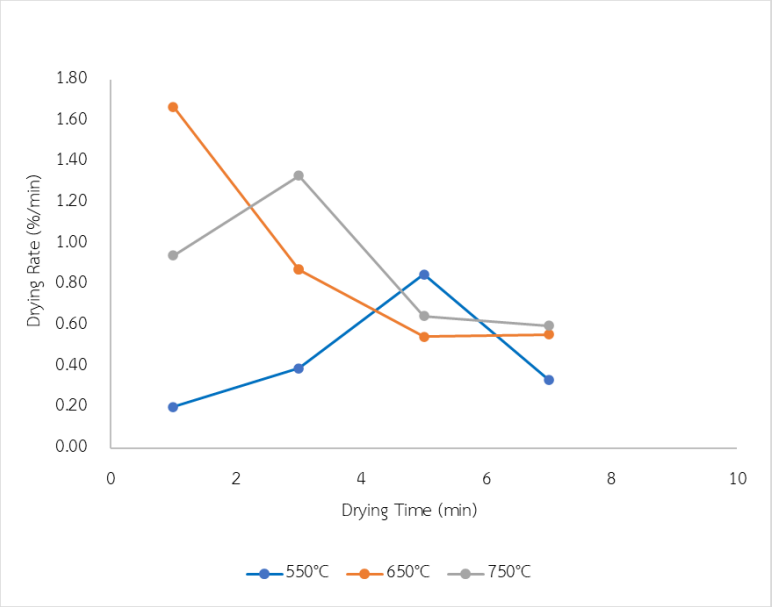
ภาพที่ 4 Moisture content of paddy with an initial moisture content of 30% (wet basis) after infrared drying at different temperatures.



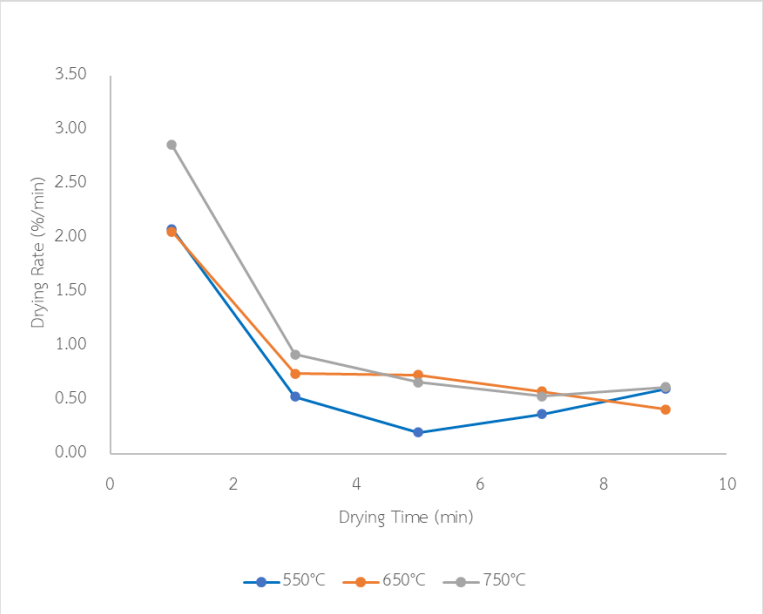
ภาพที่ 5 Grain temperature of paddy during infrared drying at temperatures with an initial moisture content of 30%

จากภาพที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 30% ฐานเปียก หลังการอบแห้ง พบว่า อุณหภูมิอินฟราเรดมีผลโดยตรงต่ออัตราการลดความชื้น [8, 9] โดยที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส สามารถลดความชื้นได้รวดเร็วที่สุด รองลงมาคือ 650 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม แม้อุณหภูมิสูงจะช่วยเร่งการระเหยของน้ำภายในเมล็ดข้าว แต่การถ่ายเทความร้อนที่รวดเร็วเกินไปอาจทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวเมล็ดและภายในเมล็ด ส่งผลให้เกิดความเค้นภายในเมล็ดข้าวและเพิ่มโอกาสการแตกร้าวของเมล็ดหลังการอบแห้งได้

จากภาพที่ 5 แสดงอุณหภูมิเมล็ดข้าวหลังการอบแห้ง พบว่า อุณหภูมิอินฟราเรด 750 องศาเซลเซียส ส่งผลให้อุณหภูมิเมล็ดข้าวเพิ่มสูงอย่างรวดเร็ว [7] โดยมีค่าสูงถึง 100 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาอบแห้ง 8 - 10 นาที ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพเมล็ดข้าว เช่น การแตกร้าวของเมล็ด และคุณภาพการสี ในขณะที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเมล็ดข้าวต่ำ ส่งผลให้การลดความชื้นเกิดขึ้นช้ากว่า ดังนั้น อุณหภูมิอินฟราเรดที่ระดับ 650 องศาเซลเซียสจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสม เนื่องจากสามารถลดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพพร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิเมล็ดข้าว [6, 7] ให้อยู่ในระดับที่ไม่สูงเกินไป ส่งผลให้เกิดความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพการอบแห้งและการรักษาคุณภาพข้าวเปลือก ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการอบแห้งข้าวด้วยรังสีอินฟราเรดและพบว่าการใช้ระดับพลังงานอินฟราเรดปานกลางช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและลดระยะเวลาอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยยังคงรักษาคุณภาพเมล็ดข้าว [17] นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาอุณหภูมิการอบแห้งที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงที่สามารถควบคุมอุณหภูมิเมล็ดไม่ให้สูงเกินไป เพื่อป้องกันความเสียหายของโครงสร้างเมล็ดและรักษาคุณภาพหลังการสี [4]



ภาพที่ 6 Drying Rate and Drying Time at initial moisture content of 30%



ภาพที่ 7 Drying Rate and Drying Time at initial moisture content of 20%

จากภาพที่ 6 และภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและเวลาในการอบแห้ง โดยพบว่า อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามเวลาและอุณหภูมิอินฟราเรดที่ใช้ในการอบแห้ง ช่วงเริ่มต้นกระบวนการมีอัตราการอบแห้งสูงความชื้นระเหยออกได้อย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาอุณหภูมิอินฟราเรด 750 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งช่วงเริ่มต้นกระบวนการสูง เมื่อเทียบกับอุณหภูมิอินฟราเรด 550 และ 650 องศาเซลเซียส

แนวโน้มของอัตราการอบแห้งสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น [21] มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยค่าที่ได้อยู่ในช่วง 1.75×10^{-7} - 4.11×10^{-7} m^2/s

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA อุณหภูมิอินฟราเรดที่แตกต่างมีผลต่ออัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกอย่างมีนัยสำคุญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมัน 95% โดยค่าเฉลี่ยของอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 30% ฐาน

เปียกที่อุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส มีค่าสูงที่สุด 14.4067 %/min รองลงมาคือ 550องศาเซลเซียส 11.77 %/min และ 750องศาเซลเซียส 11.0433 %/min และค่าเฉลี่ยของอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 20% ฐานเปียกที่อุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส มีค่าสูงที่สุด 10.97 %/min รองลงมาคือ 750 องศาเซลเซียส 9.1533 %/min และ 550 องศาเซลเซียส 9.0433 %/min

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้ง

จากการศึกษาพฤติกรรมการลดความชื้นและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของข้าวเปลือกภายใต้สภาวะการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน พบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอินฟราเรด ช่วงเวลาอบแห้ง และความชื้นเริ่มต้นของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อให้สามารถอธิบายและทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้อย่างเป็นระบบ จึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล (Empirical Drying Models) โดยใช้โปรแกรม Excel Solver ตารางที่ 2 มาใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio : MR) กับเวลาอบแห้ง โดยแบบจำลองดังกล่าวได้รับการยอมรับและใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร

ตารางที่ 3 แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้ง

Model Name	Equation	Reference
Newton Model	MR = exp(-kt)	[4,11,17]
Page Model	$MR = \exp(-kt^n)$	[4,11,17]
Logarithmic Model	MR = a exp(-kt)+c	[4,11,17]

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น, t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาที) และ k, n, a และ c คือ ค่าคงที่ใด ๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

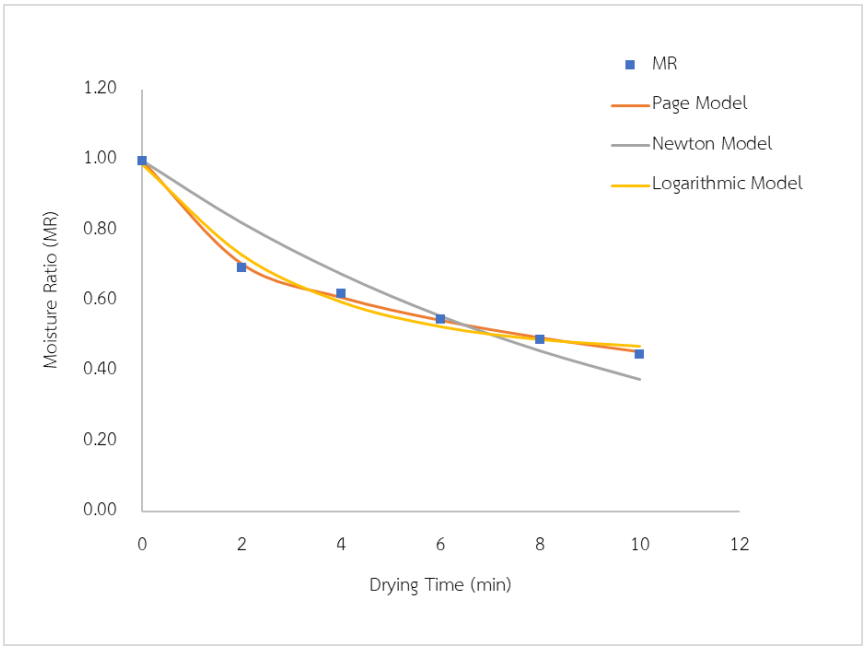
จากตารางที่ 4 แสดงค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าความคลาดเคลื่อนของสมการอบแห้งที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการลดความชื้นของข้าวเปลือกภายใต้สภาวะอุณหภูมิอินฟราเรดและระยะเวลาอบแห้งที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาแบบจำลองการอบแห้ง ได้แก่ แบบจำลอง Newton Model แบบจำลองสมการพื้นฐานที่มีพารามิเตอร์ k ทำให้ง่ายต่อการคำนวณและวิเคราะห์แต่มักให้ค่าความแม่นยำต่ำ, Page Model แบบจำลองที่มีค่าพารามิเตอร์ k และ n ให้ความแม่นยำสูง แต่ค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงตามสภาวะการอบแห้ง และ Logarithmic Model แบบจำลองที่มีค่าพารามิเตอร์ k, n, a และ c ซึ่งปรับรูปแบบกราฟได้ดีแต่การประมาณค่าพารามิเตอร์มีความซับซ้อน ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองถูกประมาณค่าด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) และประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยรากที่สอง (RMSE) และค่าไคสแควร์ (X^2)

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 (มกราคม - มิถุนายน 2569)

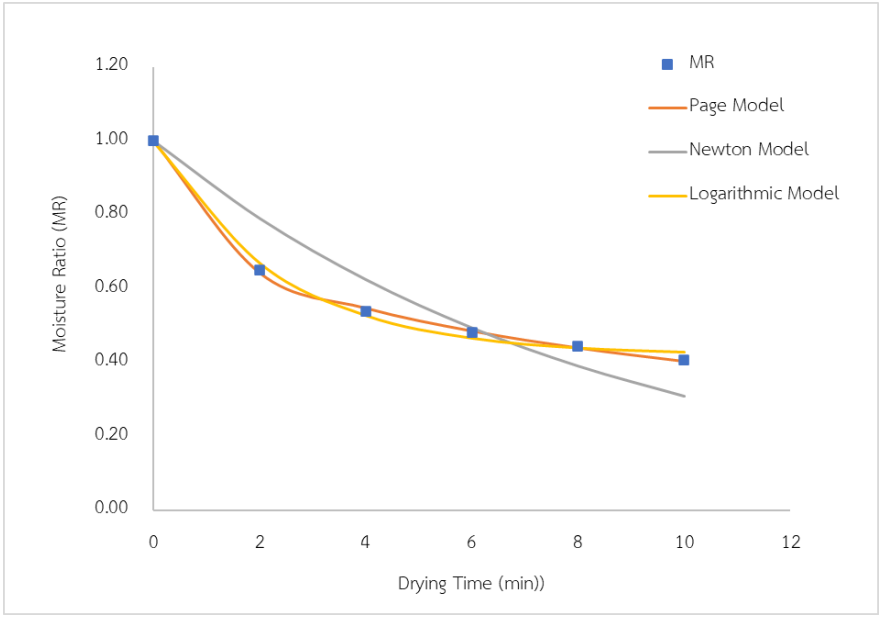
ตารางที่ 4 ค่าคงที่และค่าความคลาดเคลื่อนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้ง

Moisture	Model Name	Infrared Temperature (°C)	k	n	a	c	R^2	RMSE	X^2
ความชื้นข้าวเปลือก 20 เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียก	Newton Model	550	0.07363	-	-	-	0.67940	0.09786	0.01197
		650	0.09739	-	-	-	0.87178	0.06532	0.00640
		750	0.14451	-	-	-	0.91361	0.07421	0.00688
	Page Model	550	0.29573	0.26987	-	-	0.98752	0.01931	0.00062
		650	0.24509	0.50779	-	-	0.99847	0.00714	0.00640
		750	0.31148	0.56897	-	-	0.99622	0.01551	0.00040
	Logarithmic Model	550	0.64476	-	0.39910	0.59848	0.97000	0.02992	0.00224
		650	0.32462	-	0.54047	0.44967	0.98536	0.02207	0.00146
		750	0.34944	-	0.67932	0.31755	0.99400	0.01947	0.00096
ความชื้นข้าวเปลือก 30 เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียก	Newton Model	550	0.08809	-	-	-	0.93925	0.11081	0.01535
		650	0.11784	-	-	-	0.96146	0.08936	0.00998
		750	0.17192	-	-	-	0.94746	0.10438	0.01362
	Page Model	550	0.36305	0.24606	-	-	0.99850	0.01741	0.00051
		650	0.32446	0.44687	-	-	0.99882	0.00608	0.00006
		750	0.47013	0.41722	-	-	0.99917	0.01314	0.00029
	Logarithmic Model	550	0.72688	-	0.44527	0.55179	0.99468	0.03278	0.00269
		650	0.41975	-	0.57765	0.41812	0.99887	0.01518	0.00059
		750	0.50556	-	0.67664	0.31562	0.99409	0.03483	0.00306

ตารางที่ 4 แสดงค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าความคลาดเคลื่อนของสมการอบแห้งที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการลดความชื้นของข้าวเปลือกภายใต้สภาวะอุณหภูมิอินฟราเรดและระยะเวลาอบแห้งที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งได้เนื่องจากแบบจำลองสมการมีค่าพารามิเตอร์ ซึ่งทำให้สามารถอธิบายลักษณะความโค้งของกระบวนการอบแห้งได้ดี



ภาพที่ 8 Drying of paddy with an initial moisture content of 20% (wet basis) at an infrared temperature of 650 °C



ภาพที่ 9 Drying of paddy with an initial moisture content of 30% (wet basis) at an infrared temperature of 650 °C

จากภาพที่ 8 และภาพที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio : MR) กับเวลาการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ภายใต้ความชื้นเริ่มต้น 20% และ 30% ฐานเปียก พบว่า ความชื้นเริ่มต้นมีผลโดยตรงต่อรูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นและความเหมาะสมของข้อมูลสำหรับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 30% ฐานเปียก แสดงแนวโน้มการลดลงของค่าอัตราส่วนความชื้นอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ช่วงต้นจนถึงช่วงท้ายของกระบวนการอบแห้ง โดยสามารถแสดงพฤติกรรมของการอบแห้งได้ครบทั้งช่วงการระเหยของน้ำอิสระและช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling drying

rate period) [12] ซึ่งเป็นช่วงที่กลไกการแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดสู่ผิวเมล็ด ส่งผลให้ข้อมูลมีลักษณะโค้งแบบไม่เชิงเส้นที่ชัดเจน เหมาะต่อการนำไปประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในทางตรงกันข้าม ความชื้นเริ่มต้น 20% ฐานเปียก มีปริมาณน้ำอิสระภายในเมล็ดต่ำกว่า ส่งผลให้การลดความชื้นเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเร็ว และช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้นมีระยะสั้นกว่า ทำให้ข้อมูลบางช่วงมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลทดลอง และอาจทำให้ค่าคงที่ของสมการมีความแปรปรวนสูงเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

อภิปรายผล

ผลการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน

แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอินฟราเรดมีผลโดยตรงต่ออัตราการลดความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวหลังการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอินฟราเรดจาก 550 เป็น 650 และ 750 องศาเซลเซียส พบว่า อัตราการลดความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากพลังงานของอินฟราเรดสามารถถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เมล็ดข้าวได้โดยตรง ส่งผลให้การระเหยของน้ำอิสระภายในเมล็ดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องว่าการเพิ่มระดับพลังงานของอินฟราเรดช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและเร่งอัตราการอบแห้งของข้าวเหนียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ [17]

จากผลการทดสอบ พบว่า อุณหภูมิอินฟราเรด 750 องศาเซลเซียส สามารถลดความชื้นได้รวดเร็วที่สุด แต่ส่งผลให้อุณหภูมิเมล็ดข้าวเพิ่มสูงอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าเกิน 100 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาอบแห้ง 8 - 10 นาที ซึ่งอาจก่อให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวและแกนกลางเมล็ด ส่งผลให้เกิดความเค้นภายในเมล็ดและเพิ่มความเสี่ยงต่อการแตกร้าวของเมล็ดข้าวภายหลังการสี ทั้งนี้สอดคล้องกับแนวทางของ [17] ที่ระบุว่าการเพิ่มอุณหภูมิเมล็ดอย่างรวดเร็วเกินไปอาจส่งผลต่อคุณภาพการสีและโครงสร้างภายในเมล็ดข้าว อุณหภูมิอินฟราเรด 550 องศาเซลเซียส แม้สามารถควบคุมอุณหภูมิเมล็ดข้าวให้อยู่ในระดับต่ำได้ แต่มีอัตราการลดความชื้นต่ำกว่า ส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาอบแห้งนานขึ้น ลดประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ [4] ที่พบว่าการใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำเกินไปทำให้การแพร่ความชื้นจากภายในวัสดุเกิดขึ้นช้า ดังนั้น อุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถสร้างสมดุลระหว่างอัตราการลดความชื้นและการควบคุมอุณหภูมิเมล็ดข้าวให้อยู่ในระดับที่ไม่สูงเกินไป โดยสามารถลดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงเวลาอบแห้งสั้น และยังช่วยลดความเสี่ยงต่อความเสียหายเชิงโครงสร้างของเมล็ดข้าว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมลมร้อน [1] ที่รายงานว่าการใช้พลังงานอินฟราเรดระดับปานกลางสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งพร้อมรักษาคุณภาพเมล็ดได้ดี

เมื่อพิจารณาผลของความชื้นเริ่มต้น พบว่าข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 30% ฐานเปียก แสดงแนวโน้มการลดความชื้นอย่างต่อเนื่องและชัดเจนกว่าข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 20% ฐานเปียก เนื่องจากมีปริมาณน้ำอิสระภายในเมล็ดสูงกว่า ส่งผลให้สามารถดูดกลืนพลังงานอินฟราเรดและเกิดการระเหยของน้ำได้รวดเร็วในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้ง อีกทั้งยังสะท้อนสภาพวัตถุดิบจริงหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งโดยทั่วไปมีความชื้นประมาณ 25 - 30% ฐานเปียก [19] ทำให้เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรม [23] และยังสามารถต่อยอดในการวิเคราะห์หรือเก็บค่าพลังงานที่ใช้จากรายงานการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสำหรับอบแห้งข้าวกล้องงอก

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้ง

พบว่าการลดความชื้นมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling drying rate period) กลไกหลักคือการแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดสู่ผิวเมล็ด [12] แบบจำลอง Page Model ให้ผลการทำนายที่ดีกว่า Newton Model เนื่องจากมีพารามิเตอร์ยกกำลังเวลา (n) ซึ่งช่วยอธิบายลักษณะการแพร่ความชื้นแบบไม่เชิงเส้นภายในวัสดุ

ได้ดี โดยเฉพาะในวัสดุที่มีโครงสร้างพรุน เช่น ข้าวเปลือก ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในระหว่างการอบแห้ง ส่งผลให้กลไกการถ่ายเทมวลมีความซับซ้อนมากขึ้น

จากการเปรียบเทียบแบบจำลอง Newton Model, Page Model และ Logarithmic Model พบว่าแบบจำลอง Page Model ให้ความแม่นยำสูงที่สุดในทุกสภาวะการทดสอบ และให้ค่าใกล้เคียงกับรายงานแบบจำลองคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด ค่า k อยู่ระหว่าง 0.1594 - 0.2007 และค่า n อยู่ระหว่าง 0.6298 - 0.6484 [13] โดยเฉพาะที่ความชื้นเริ่มต้น 30% ฐานเปียก และอุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่า R^2 สูงถึง 0.99488 และค่า RMSE และ X^2 ต่ำ แสดงให้เห็นถึงความสามารถของแบบจำลองในการทำนายพฤติกรรมการลดความชื้นได้ใกล้เคียงกับข้อมูลทดลองมากที่สุด เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากตารางที่ 3 ลงในสมการสามารถเขียนสมการทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ดังนี้

Newton Model $MR = \exp(-0.11784t)$ (7)

Page Model $MR = \exp(-0.32446t^{0.44687})$ (8)

Logarithmic Model $MR = 0.57765\exp(-0.41975t)+0.41812$ (9)

สมการ (8) สามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการลดความชื้นของข้าวเปลือกภายใต้สภาวะที่เลือกได้อย่างแม่นยำ และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและควบคุมกระบวนการอบแห้งได้ ดังนั้น เมื่อพิจารณาร่วมกันทั้งด้านประสิทธิภาพการลดความชื้น และอุณหภูมิเมล็ด ความสอดคล้องกับสภาพข้าวเปลือกจริง และความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สภาวะข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 30% ฐานเปียก ที่อุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Page Model เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด [13] สำหรับการอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน

สรุปผล

ผลการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน พบว่า อุณหภูมิอินฟราเรดมีผลต่ออัตราการลดความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าว โดยอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ให้การลดความชื้นรวดเร็วที่สุด แต่ส่งผลให้อุณหภูมิเมล็ดสูงเกินไปและอาจกระทบต่อคุณภาพเมล็ด ในขณะที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสให้การอบแห้งช้ากว่า ดังนั้น อุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียสจึงเหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถลดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพพร้อมควบคุมอุณหภูมิเมล็ดให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการรักษาคุณภาพข้าว

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าแบบจำลอง Page Model ให้ความแม่นยำในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งสูงที่สุด [13] เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Newton Model และ Logarithmic Model โดยเฉพาะที่ความชื้นเริ่มต้น 30% ฐานเปียก ที่อุณหภูมิอินฟราเรด 650 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.99882 ค่า RMSE เท่ากับ 0.00608 และค่า X^2 เท่ากับ 0.00006 สมการที่ได้คือ $MR = \exp(-0.32446t^{0.44687})$ แสดงถึงความสามารถในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งได้อย่างแม่นยำ สภาวะดังกล่าวจึงเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเงื่อนไขอ้างอิงในการออกแบบ ควบคุม และพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอินฟราเรดในระดับอุตสาหกรรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดระยะเวลาอบแห้ง และรักษาคุณภาพเมล็ดข้าวหลังการสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

และจากผลการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน สามารถพัฒนาระบบการอบแห้งข้าวเปลือกให้มีการใช้พลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานทางเลืออย่างอื่น เพื่อลดการใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนของหัวเผาอินฟราเรด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

1. เดชา ปะเขทานัง, เชิดพงษ์ เชี่ยวชาญวัฒนะ, จักรมาส เลาหวณิช, พีระยศ แข็งขัน, สุพรรณ ยั่งยืน. อิทธิพลของรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและการเทมเปอร์ริงต่อร้อยละการงอกและการเจริญเติบโตต้นอ่อนของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 2563; 26(1): 52-61. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/TSAEJ/article/view/217433
2. ธีรศาสตร์ คณาศรี, ปวริศ อุตทอง, สุภาภรณ์ ยอดสำโรง. แนวทางการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระบะลมร้อน. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 2560; 48(3 ฉบับพิเศษ): 55-58. https://www.phtnet.org/download/phtic-seminar/1706.pdf
3. ประชา บุญยวานิชกุล. การประเมินกระบวนการเตรียมตัวอย่างอ้างอิงสำหรับเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือก. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี). 2556; 5(9): 47-55. https://ejournals.swu.ac.th/index.php/SWUJournal/article/view/3447/3477
4. ยุทธนา ฏิระวณิชย์กุล, สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล, อิลีหย๊ะ สนิโช. การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร: พารามิเตอร์พื้นฐานทางกายภาพและแบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้ง. วารสารสงขลานครินทร์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2550; 29(ฉบับพิเศษ 2): 347-363. https://www.thaiscience.info/Journals/Article/SONG/10462746.pdf
5. จักรมาส เลาหวณิช. โครงการการอบแห้งข้าวเปลือกโดยรังสีอินฟราเรด ลมร้อน และ การเทมเปอร์ริ่ง. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม; 2559. https://elibrary.tsri.or.th/fullP/MRG5280115/MRG5280115_full.pdf
6. บุญฑริกา ศิลา. (2565) การพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี). http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/bitstream/123456789/9779/19/Fulltext.pdf
7. เจษฎา แพรกนันเธอ, มณฑล ชูโชนาค, มุสตาฟา ยะภา, เอนก สุทธิฤทธ์. ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ ปทุมธานี 1 ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งโค้ง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 2022; 41(2): 80-89. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/scimsujournal/article/download/252937/174010
8. บังอร แสนศรี, อรวรรณ ศรีโสมพันธ์, ศุภรัตน์ จิตต์จำนง, พัชรี สิริตระกูลศักดิ์. ประสิทธิภาพการผลิตเชิงเทคนิคของการผลิตข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในจังหวัดร้อยเอ็ด. แก่นเกษตร. 2557; 42(ฉบับพิเศษ 1): 136-141. https://ag2.kku.ac.th/kaj/PDF.cfm?filename=O22.pdf&id=1192&keeptrack=1
9. สิงหนาท พวงจันทน์แดง, ปัญญา แสนชัย, กฤษณ์ จันท์โชติกุล. การพัฒนาเครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นเพื่อพัฒนาการทำแห้งพืชผักสมุนไพรไทย (ใบกะเพรา). อาหาร. 2546; 33(2): 146-155. https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/covid19/search_detail/result/29430

10. วีรชัย แผ่นอุไร, ศราวุธ รัตนวงษ์, เจริญ เบ้าทอง, จิรวัฒน์ วรุณโรจน์. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งเข่าคลอนด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน. ใน: รายงานการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 9 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 7, 28 พฤษภาคม 2565, มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. ขอนแก่น: 2565. หน้า 574-584. https://idcneu.com/neunic22/file_article/st/neunic2022-st-17.pdf
11. ศิวกร ศรีธัญญากร, กีรติ สุลักษณ์, ทวิช จิตรสมบูรณ์. แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสำหรับการอบแห้งชั้นบางของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2563;14(2):183-197. https://agkb.lib.ku.ac.th/agrisservice/search_detail/result/416216
12. กิตติ สถาพรประสาธน์, โพธิ์ทอง ปราณีตพลกรัง. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ทสเปาต์เตดเบด. วิศวสารลาดกระบัง. 2560; 34(4): 22-29. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/article/download/240176/163720
13. สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล, ยุทธนา ฏิระวณิชย์กุล. จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกงอกสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แบบสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรด. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 2560; 48(3 ฉบับพิเศษ): 68-71. https://www.phtnet.org/download/phtic-seminar/1709.pdf
14. ทรงพล วิจารณ์จักร, สุพรรณ ยั่งยืน, จักรมาส เลาหวณิช. การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมลมร้อนปล่อยทิ้งในกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 2560; 48(3 ฉบับพิเศษ): 51-54. https://www.phtnet.org/download/phtic-seminar/1705.pdf
15. ปาริชาติ เทียนจุมพล, รณฤทธิ์ ฤทธิรณ, สงวนศักดิ์ ธนาพรพูนพงษ์, สุชาดา เวียรศิลป์. การหาปริมาณความชื้นอย่างแม่นยำสูงในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี. วารสารเกษตร. 2549; 22(3): 213-222. https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/kukr/search_detail/result/104844
16. ศราวุธ รัตนวงษ์, วีรชัย แผ่นอุไร, พงษ์พันธุ์ พรมพิพักต์, เกยูร ดวงอุปมา. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแบบถังทรงกระบอกหมุน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี. 2565; 10(1): 125-142. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/scudru/article/view/246539/168471
17. Dongbang, W., Nuantong, W. (2018). Drying kinetics of glutinous rice using an infrared irradiation technique. Engineering and Applied Science Research, 45(2), 127-131. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/easr/article/view/89519
18. International Rice Research Institute. (2013). *Paddy drying training manual*. http://www.knowledgebank.irri.org/images/docs/training-manual-paddy-drying.pdf
19. Khir, R., Pan, Z., Salim, A., Hartsough, B. R., Mohamed, S. (2011). Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. *LWT – Food Science and Technology*, 44(4), 1126-1132. https://agronomy-rice.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnsk11966/files/media/documents/Moisture%20diffusivity%20of%20rough%20rice%20under%20infrared%20radiation%20drying.pdf

20. Meeso N, Nathakaranakule A, Madhiyanon T, Soponronnarit S. (2007). Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process. J Food Eng, 78(4), 1248-1258. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877406000392
21. Du, Y., Yan, J., Wei, H., Xie, H., Wu, Y., Zhou, J. (2023). Drying kinetics of paddy drying with graphene far-infrared drying equipment at different IR temperatures, radiations-distances, grain-flow, and dehumidifying-velocities. Case Stud Therm Eng. 43:102780. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X23000862
22. Huang, D., Yang, P., Tang, X., Luo, L., Sundén, B. (2021). Application of infrared radiation in the drying of food products. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 765-777. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224421001461
23. ทิวานัถ แก้วสอนดี, วราเดช แสงบุญ, สรินทรเทพ สายเนตร, พูลทวี ศรพรหม, จักรมาส เลาหวณิช. (2560). การอบแห้งสมอด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารีโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรด. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 48(3 ฉบับพิเศษ), 59-62. https://www.phtnet.org/download/phtic-seminar/1707.pdf

บทความวิจัย (Research Article)

แอปพลิเคชันการจับคู่ในกราฟถ่วงน้ำหนักสำหรับปัญหาการจัดสรรงาน

An Application for Weighted Graph Matching in Job Assignment Problems

โรจนี ขุมมงคล[1], จินตหรา จารัตน์[1], ดำรงค์ ถาวร[2], นฤมล แย้มอาสา[1] และ วัชรินทร รักษาศักดิ์ชัย[1*]

Rojanee Khummongkol[1], Chintara Charat[1], Damrong Thavorn[2], Naruemon Yaemarsa[1] and Watcharintorn Ruksasakchai[1*]

[1]สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ ภาควิชาวิทยาการคำนวณและเทคโนโลยีดิจิทัล คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

[1]Division of Mathematics and Statistics, Department of Computational Science and Digital Technology, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140

[2]สาขาวิชาการตลาด ภาควิชาบริหารธุรกิจและการบัญชี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

[2]Division of Business Administration in Marketing, Department of Business Administration and Accountancy, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140

*Corresponding author; email: faaswtr@ku.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
28 ตุลาคม 2569	18 มีนาคม 2569	20 มีนาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับการหาการจับคู่ที่เหมาะสมที่สุดในกราฟถ่วงน้ำหนักเพื่อแก้ปัญหาการจัดสรรงาน พร้อมทั้งพัฒนาชุดคำสั่งการจับคู่ให้ครอบคลุม 5 ลักษณะสำคัญเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการเลือกคำตอบที่เหมาะสมในบริบทที่หลากหลาย ตลอดจนมุ่งวิเคราะห์และตรวจสอบคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของกราฟในด้านการเป็นกราฟสองส่วนและการมีอยู่ของการจับคู่สมบูรณ์ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันคือภาษาไพทอน ซึ่งมีการทดสอบผ่านกลุ่มตัวอย่างที่เป็นกรณีศึกษาจำลองปัญหาการจัดสรรงานจำนวน 5 กรณีศึกษา สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วยแอปพลิเคชันสำหรับการหาการจับคู่ที่เหมาะสมในกราฟถ่วงน้ำหนักและแบบบันทึกผลการทดสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธี โดยใช้สถิติในการวิเคราะห์คือการหาค่าร้อยละของความถูกต้องและเปรียบเทียบผลลัพธ์กับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

ผลการวิจัยพบว่าแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นสามารถหาการจับคู่ที่เหมาะสมที่สุดในกราฟถ่วงน้ำหนักได้ครบถ้วนทั้ง 5 ลักษณะ ประกอบด้วย (1) การจับคู่ใหญ่สุดที่มีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุด (2) การจับคู่ใหญ่สุดที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด (3) การจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุด (4) การจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด และ (5) การจับคู่ใหญ่สุดโดยไม่คำนึงถึงค่าน้ำหนักรวม ซึ่งการระบุเป้าหมายในการพัฒนาแอปพลิเคชันและขอบเขตการหาการจับคู่ในกราฟถ่วงน้ำหนักที่ชัดเจนนี้ ช่วยให้สามารถแก้ปัญหาการจัดสรรงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความยืดหยุ่นสูงกว่าแอปพลิเคชันทั่วไป อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบคุณสมบัติความเป็นกราฟสองส่วนและการมีอยู่ของการจับคู่สมบูรณ์ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งช่วยลดความซับซ้อนใน การวิเคราะห์ข้อมูลกราฟและเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการสนับสนุนการตัดสินใจทั้งในด้านวิชาการและการวางแผนเชิงธุรกิจ

คำสำคัญ: การจับคู่, กราฟถ่วงน้ำหนัก, ปัญหาการจัดสรรงาน, แอปพลิเคชัน

Abstract

This research primarily aims to design and develop an application for finding optimal matchings in weighted graphs to address assignment problems, along with developing matching algorithms that cover five key characteristics to enhance flexibility in selecting appropriate solutions across diverse contexts. Furthermore, it aims to analyze and verify the structural properties of graphs, specifically regarding bipartite graph detection and the existence of perfect matchings. The application was developed using the Python programming language and tested through five simulated case studies involving various assignment problems. The research instruments consist of the developed application for optimal matching in weighted graphs and an algorithm validation record. The statistical analysis involves calculating the percentage of accuracy and comparing the results with known optimal solutions.

The results indicate that the developed application successfully identifies optimal matchings in weighted graphs across all five characteristics: (1) maximum matching with the highest total weight, (2) maximum matching with the lowest total weight, (3) matching with the highest total weight, (4) matching with the lowest total weight, and (5) maximum matching regardless of total weight. By clearly defining the application's goals and the scope of weighted graph matching, the system facilitates efficient assignment problem-solving with greater flexibility compared to typical applications. Moreover, the system accurately verifies bipartite graph properties and the existence of perfect matchings, thereby reducing complexity in graph analysis and serving as an effective decision-support tool for both academic and business planning purposes.

Keywords: Matching, Weighted graph, Job assignment problem, Application

บทนำ

การจัดสรรทรัพยากรและการมอบหมายงานถือเป็นปัญหาพื้นฐานที่พบได้อย่างแพร่หลายในเชิงธุรกิจ ลักษณะของปัญหาดังกล่าวมักเกี่ยวข้องกับการตัดสินใจที่ซับซ้อนภายใต้ข้อจำกัดด้านเวลา ต้นทุน และปริมาณทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด หนึ่งในแนวทางที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาประเภทนี้ คือการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับเทคนิคเชิงคอมพิวเตอร์เพื่อค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

แนวคิดสำคัญประการหนึ่งในการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ คือ การจับคู่ในกราฟ (Matching in Graphs) ซึ่งหมายถึงกระบวนการเลือกชุดของเส้นเชื่อมที่ไม่ทับซ้อนกัน โดยที่แต่ละจุดยอดจะถูกจับคู่กับจุดยอดอื่นได้เพียงหนึ่งครั้ง แนวคิดนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาหลากหลาย เช่น การจับคู่ในตลาดแรงงาน การกำหนดตารางการทำงาน และปัญหาการขนส่ง อย่างไรก็ตาม ในสถานการณ์จริง ความสัมพันธ์ระหว่างทรัพยากรและงานมักไม่เท่ากัน การใช้กราฟถ่วงน้ำหนัก (Weighted Graph) จึงช่วยสะท้อนคุณลักษณะเชิงปริมาณ เช่น ค่าใช้จ่าย เวลา หรือความสำคัญของการจับคู่ได้อย่างชัดเจน การหาการจับคู่ที่เหมาะสมที่สุดในกราฟถ่วงน้ำหนักจึงหมายถึงการค้นหาชุดของเส้นเชื่อมที่ไม่ทับซ้อนกันซึ่งให้ผลรวมของค่าน้ำหนักสูงสุดหรือต่ำสุด ขึ้นอยู่กับเป้าหมายของปัญหา เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน พิจารณาตัวอย่างดังต่อไปนี้ บริษัท Anon ต้องการจัดพนักงาน 4 คน ไปประจำ 4 สาขา โดยที่พนักงานแต่ละคนสามารถสร้างกำไรได้แตกต่างกันในแต่ละสาขา จะเห็นว่าการเลือกจับคู่ที่ต่างกันสามารถนำไปสู่ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันได้ ดังนั้นการหาการจับคู่ที่เหมาะสมที่สุดจึงเป็นสิ่งจำเป็นในเชิงธุรกิจและอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเพื่อเพิ่มผลกำไร ลดต้นทุน หรือจัดสรรทรัพยากรให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ในการหาการจับคู่ที่เหมาะสมในกราฟสามารถดำเนินการได้โดยใช้ขั้นตอนวิธีที่หลากหลายตามลักษณะของปัญหา เช่น ขั้นตอนวิธีฮังกาเรียน (Hungarian Algorithm) ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญในการแก้ปัญหาการจัดสรรงาน โดย Shahriar Tanvir Alam และคณะ [1] รวมถึง Jayasree T G และ Malavika V [2] ได้นำขั้นตอนวิธีนี้มาใช้เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในการบริหารจัดการทรัพยากร ซึ่งโดยทั่วไปขั้นตอนวิธีฮังกาเรียนจะใช้สำหรับการจับคู่ในลักษณะหนึ่งต่อหนึ่ง (One-to-One) แต่ในปี 2023 Fatemeh Rajabi-Alni และ Alireza Bagheri [3] ได้พัฒนาต่อยอดให้สามารถรองรับการจับคู่ในลักษณะหลายต่อหลาย (Many-to-Many) เพื่อตอบโจทย์ความต้องการและขีดความสามารถที่ซับซ้อนขึ้น

นอกจากนี้ยังมี ขั้นตอนวิธีฮอปครอฟท์–คาร์พ (Hopcroft–Karp Algorithm) ซึ่ง M. Usha Devi และคณะ [4] ได้นำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์เพื่อหาการจับคู่ระหว่างผู้บริจาคและผู้รับตับในรูปแบบกราฟสองส่วนเพื่อให้เกิดจำนวนคู่ที่เหมาะสมที่สุด และในกรณีของกราฟทั่วไปที่มีความซับซ้อน Gabriel Cristian และคณะ [5] ได้นำเสนอการใช้ขั้นตอนวิธีบลอสซัม (Blossom Algorithm) สำหรับจัดการทรัพยากรในสภาวะวิกฤตของระบบจัดการเหตุฉุกเฉินทางการแพทย์

อย่างไรก็ตาม แต่ละวิธีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน เช่น ขั้นตอนวิธีฮังกาเรียนที่เหมาะสำหรับกราฟสองส่วนเท่านั้น และโดยทั่วไปขั้นตอนวิธีเหล่านี้มักมุ่งเน้นการหาการจับคู่ที่ใหญ่ที่สุดหรือมีค่าน้ำหนักรวมสูงสุดเพียงด้านใดด้านหนึ่ง ซึ่งอาจไม่สามารถตอบโจทย์ปัญหาในสถานการณ์จริงที่มีความหลากหลายได้ครบถ้วน ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาแอปพลิเคชันที่บูรณาการลักษณะการจับคู่ที่แตกต่างกันถึง 5 ลักษณะ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพในการสนับสนุนการตัดสินใจให้ครอบคลุมทุกบริบทของปัญหา

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับการหาการจับคู่ที่เหมาะสมที่สุดในกราฟถ่วงน้ำหนักสำหรับแก้ปัญหาการจัดสรรงาน
2. เพื่อพัฒนาชุดคำสั่งการจับคู่ให้ครอบคลุม 5 ลักษณะสำคัญ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการเลือกคำตอบที่เหมาะสมในบริบทที่หลากหลาย
3. เพื่อวิเคราะห์และตรวจสอบคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของกราฟผ่านแอปพลิเคชัน โดยมุ่งเน้นระบบตรวจสอบความเป็นกราฟสองส่วนและการมีอยู่ของการจับคู่สมบูรณ์ เพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ข้อมูลกราฟขนาดใหญ่

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาและสร้างแอปพลิเคชันสำหรับกราฟไม่กำหนดทิศทางที่ไม่มีเส้นหลายชั้นและลูป [6, 7] กำหนดให้ G เป็นกราฟ และ $V(G), E(G)$ แทนเซตของจุดและเซตของเส้นเชื่อมของกราฟ G ตามลำดับ [8] จะกล่าวว่ากราฟ G เป็น *กราฟถ่วงน้ำหนัก (weighted graph)* เมื่อแต่ละเส้น $e \in E(G)$ มีจำนวนจริงกำกับ โดยจำนวนจริงเหล่านี้เรียกว่า *น้ำหนักของเส้น* ซึ่งเขียนแทนด้วย $w(e)$ กราฟ G จะถูกกล่าวว่าเป็น*กราฟสองส่วน (Bipartite graph)* ถ้าสามารถแบ่งกั้นเซต $V(G)$ ออกเป็น V_1 และ V_2 โดยที่ $V_1 \cup V_2 = V(G)$ และ $V_1 \cap V_2 = \emptyset$ และเส้นแต่ละเส้นใน G เป็นเส้นที่เชื่อมจุดที่อยู่ใน V_1 และ V_2 และเรียก (V_1, V_2) ว่า *เซตแบ่งกั้น (partite set)* ของ G

ถ้า $S \subseteq V(G)$ *ย่านเซต* (*Neighbor set*) ของ S ใน G เขียนแทนด้วย $N(S)$ คือเซตของจุดใน $V(G) - S$ ที่ประชิดกับจุดใน S ให้ $M \subseteq E(G)$ จะเรียก M ว่า *เซตจับคู่ M (M-matching set)* ใน G ถ้าสองเส้นเชื่อมใด ๆ ของ M ไม่มีจุดปลายร่วมกัน และสำหรับเส้นเชื่อม $e \in M$ ถ้า u, v เป็นจุดปลายของ e แล้วจะกล่าวว่า u *จับคู่* (*Saturates*) กับ v โดย M เซตจับคู่ M ใน G จะเรียกว่า*เซตจับคู่สมบูรณ์ M (M-perfect matching set)* ถ้าทุกจุดยอดของ G เป็นจุดยอดของเส้นเชื่อมของ M และเซตจับคู่ M ใน G จะถูกเรียกว่า *เซตจับคู่ใหญ่สุด (maximum matching set)* ถ้า $M' \subset M$ สำหรับทุก ๆ เซตจับคู่ M' ใน G

ให้ M เป็นเซตจับคู่ จะเรียกวิถี P ว่า *วิถีสลับของ M (M-alternating path)* ถ้าเส้นเชื่อมใน P ประกอบด้วยเส้นเชื่อมที่อยู่ใน M และไม่อยู่ใน M สลับกัน และจะเรียกวิถี P ว่า *วิถีแต่งเติมของ M (M-augmenting path)* ถ้า P เป็นวิถีสลับที่จุดปลายทั้งสองไม่ถูกจับคู่ใน M

ทฤษฎีบท 1 [6, 9, 10] (Berge's Theorem) เซตจับคู่ M ในกราฟ G เป็นเซตจับคู่ใหญ่สุด ก็ต่อเมื่อ G ไม่มีวิถีแต่งเติมของ M

ทฤษฎีบท 2 [6, 9, 10] (Hall's Theorem) ให้ G เป็นกราฟสองส่วนที่มี (X, Y) เป็นเซตแบ่งกั้น แล้ว G มีการจับคู่ซึ่งทุกจุดใน X ถูกจับคู่ ก็ต่อเมื่อ $|N(S)| \geq |S|$ สำหรับทุก $S \subseteq X$

ทฤษฎีบทข้างต้นนี้เป็นทฤษฎีพื้นฐานของขั้นตอนวิธีในการหาการจับคู่ใหญ่สุดในกราฟสองส่วนซึ่งมีหลักการดังต่อไปนี้ [10]

ขั้นตอนวิธีการหาการจับคู่ใหญ่สุดในกราฟสองส่วน (Matching Algorithm)

กำหนดให้ G เป็นกราฟสองส่วนที่มี (X, Y) เป็นเซตแบ่งกั้น

ขั้นตอนที่ 1 : สร้างเซตการจับคู่ M ใด ๆ

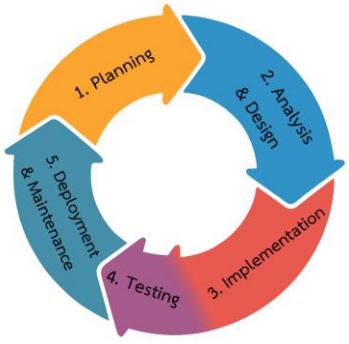
ขั้นตอนที่ 2 : ถ้าทุกจุดใน X ถูกจับคู่โดย M แล้วหยุด มิฉะนั้นแล้วให้ $u \in X$ เป็นจุดที่ไม่ถูกจับคู่โดย M และให้ $S = \{u\}$ และ $T = \emptyset$

ขั้นตอนที่ 3 : ถ้า $N(S) = T$ แล้วจะได้ว่า $|N(S)| < |S|$ เพราะว่า $|T| = |S| - 1$ ดังนั้นจึงหยุด เนื่องจากโดยทฤษฎีบทของฮาวว์จะได้ว่าไม่มีการจับคู่ซึ่งจุกทุดจุดใน X ถูกจับคู่ มิฉะนั้นแล้วให้ $y \in N(S) - T$

ขั้นตอนที่ 4 : ถ้า y เป็นจุดที่ถูกจับคู่โดย M แล้วให้ $yz \in M$ และแทนที่ S ด้วย $S \cup \{z\}$ และ T ด้วย $T \cup \{y\}$ แล้วกลับไปที่ขั้นตอนที่ 3 มิฉะนั้นให้ P เป็นวิถี $u - v$ ซึ่งเป็นวิถีแต่งเติมของ M แล้วจึงแทน M ด้วย $\widehat{M} = M \triangle E(P)$ (เมื่อ $M \triangle E(P) = (M - E(P)) \cup (E(P) - M))$ แล้วจึงกลับไปที่ขั้นตอนที่ 2

การวิเคราะห์และออกแบบระบบแอปพลิเคชันการจับคู่ในกราฟถ่วงน้ำหนักสำหรับปัญหาการจัดสรรงาน

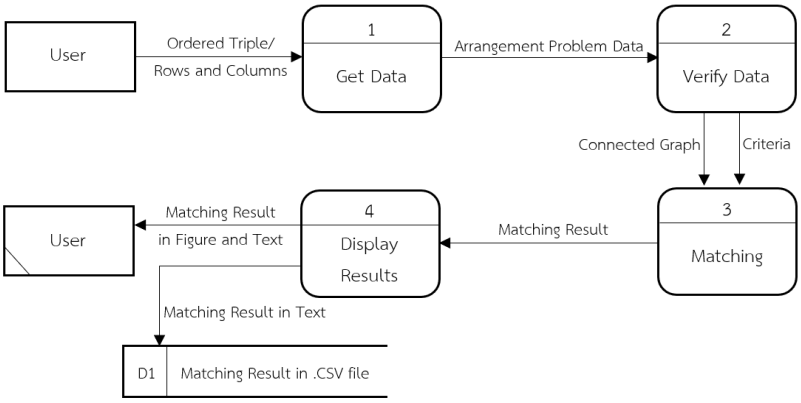
หลังจากที่กำหนดปัญหาแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์และออกแบบระบบคอมพิวเตอร์ที่ต้องการใช้เป็นเครื่องมือสำหรับแก้ปัญหาการจัดสรรงาน ซึ่งการพัฒนาระบบคอมพิวเตอร์จะถูกดำเนินการโดยใช้หลักการของวงจรชีวิตการพัฒนาซอฟต์แวร์ (Software Development Life Cycle: SDLC) ตามแบบจำลองบิกแบง (Big Bang Model) ซึ่งเหมาะต่อการพัฒนาระบบที่มีขนาดเล็ก และเป็นโครงการทดลอง โดยขั้นตอนของการพัฒนาระบบเพื่อแก้ปัญหาการจัดสรรงานนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอน (ภาพที่ 1) ดังรายละเอียดต่อไปนี้



ภาพที่ 1 วงจรชีวิตการพัฒนาซอฟต์แวร์ของแอปพลิเคชันการจับคู่ในกราฟถ่วงน้ำหนัก

ขั้นตอนที่ 1 การวางแผนงาน (Planning) : ขั้นตอนนี้ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขตการทำงาน และข้อจำกัดของระบบ รวมถึงทิศทางของการพัฒนาในขั้นตอนต่าง ๆ

ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์และออกแบบระบบ (System Analysis and Design): การวิเคราะห์และออกแบบการทำงานของระบบนี้ได้ถูกออกแบบดังขั้นตอนที่แสดงไว้ในภาพที่ 2 โดยแบ่งกระบวนการทำงานออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ การรับข้อมูล (Get Data) การตรวจสอบข้อมูล (Verify Data) การจับคู่ (Matching) และการแสดงผล (Display Results) ตามลำดับ เนื่องด้วยระบบที่พัฒนาเป็นระบบขนาดเล็กจึงไม่มีการนำระบบการจัดการฐานข้อมูล (Database Management System: DBMS) เข้ามาใช้จัดเก็บข้อมูล สำหรับข้อมูลที่รับเข้ามาเพื่อทดสอบและประมวลผลนั้นได้มาจากผู้ใช้งานโดยตรง เนื่องจากมีจำนวนข้อมูลที่ไม่มากโดยเป็นการจำลองป้อนข้อมูลในลักษณะต่าง ๆ และผลลัพธ์ที่ได้จะถูกแสดงผลการจับคู่ออกทางหน้าจอ และจัดเก็บในรูปแบบของไฟล์เก็บข้อมูลรูปแบบตาราง (Comma Separated Value: CSV)



ภาพที่ 2 แผนภาพกระแสข้อมูลระดับที่ 1 ของการพัฒนาแอปพลิเคชันการจับคู่ในกราฟถ่วงน้ำหนัก

ขั้นตอนที่ 3 การพัฒนาระบบ (Implementation): สำหรับขั้นตอนของการพัฒนาระบบได้ถูกจัดทำตามแผนภาพกระแสข้อมูล (Data Flow Diagram: DFD) ที่ได้ออกแบบไว้ในขั้นตอนของการวิเคราะห์และออกแบบ (ภาพที่ 2) ภายใต้การเขียนโปรแกรมภาษาโปรแกรมไพทอน (Python Programming Language) เวอร์ชัน 3.12.4 โดยรายละเอียดในแต่ละกระบวนการของการประมวลผล (Process) ได้ถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กระบวนการในแต่ละโมดูล

ชื่อกระบวนการ	ข้อมูลเข้า	ข้อมูลออก	คำอธิบาย
1. Get Data	เซทของสามค่าที่มีลำดับ (Ordered Triple) หรือจำนวนแถวและหลัก	ข้อมูลสำหรับปัญหาการจัดเรียง (Arrangement Problem Data)	รับค่าเริ่มต้นเพื่อกำหนดโครงสร้างพื้นฐานของปัญหา
2. Verify Data	ข้อมูลสำหรับปัญหาการจัดเรียง	ข้อมูลกราฟเชื่อมโยง (Connected Graph Data)	ตรวจสอบว่าจุดยอดทุกจุดมีการเชื่อมต่อกันตามเงื่อนไขหรือไม่
3. Matching	ข้อมูลกราฟเชื่อมโยง และหลักเกณฑ์ (Criteria) ของวิธีการที่ต้องการจับคู่	ผลการจับคู่ (Matching Result)	ประมวลผลตามเงื่อนไขการจับคู่ทั้งสี่แบบ
4. Display Results	ผลการจับคู่	รูปภาพและข้อความแสดงผลการจับคู่ และไฟล์ข้อมูลตารางที่จัดเก็บผลการจับคู่	แสดงผลการจับคู่

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบระบบ (Testing): ในขั้นตอนการทดสอบระบบนี้ได้มีการทดสอบการทำงานในด้านต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในแต่ละโมดูลโดยการใช้กรณีทดสอบ (Test Case) ซึ่งจะช่วยตรวจสอบความถูกต้องว่าระบบสามารถทำงานและให้คำตอบเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ถึงเวลากระทำการ (Execution Time) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของโมเดลว่า ใช้เวลาการทำงานเป็นอย่างไรเมื่อมีการสร้างจุดยอดจำนวนมาก ซึ่งขั้นตอนของการทดสอบโดยใช้กรณีทดสอบนี้จะถูกทำไปพร้อมกับขั้นตอนการพัฒนาระบบ เพื่อปรับปรุงระบบให้สามารถทำงานได้เป็นไปตามที่คาดหวังและได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำ

ขั้นตอนที่ 5: การติดตั้งและบำรุงรักษา (Deployment and Maintenance): เนื่องจากระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้จัดเป็นต้นแบบ (Prototype) จึงไม่มีการแบ่งขั้นตอนการติดตั้งและการบำรุงรักษาอย่างชัดเจน

การพัฒนาระบบนี้เป็นการพัฒนาแบบระบบอิสระโดยใช้ภาษาโปรแกรมไพทอนที่มีไลบรารีสนับสนุนการจัดการเกี่ยวกับกราฟ และข้อมูล อาทิ Networkx Pandas ซึ่งรวมถึง Tkinter ที่สนับสนุนการสร้างส่วนต่อประสานผู้ใช้งาน (User Interface: UI) โดยสถาปัตยกรรมระบบ (System Architecture) ของระบบที่สร้างขึ้นนี้เป็นสถาปัตยกรรมแบบแบ่งชั้น (Layered Architecture) ที่ง่ายต่อการจัดการ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นนำเสนอ ชั้นตรรกะ และชั้นข้อมูล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ชั้นนำเสนอ (Presentation Layer): ส่วนต่อประสานผู้ใช้ มีหน้าที่รับข้อมูลและแสดงผลแก่ผู้ใช้งาน
2. ชั้นตรรกะ (Logic Layer) หรือชั้นธุรกิจ (Business Layer): ส่วนการประมวลผลในกระบวนการทั้ง 4 ของแผนภาพกระแสข้อมูล
3. ชั้นข้อมูล (Data Layer): การจัดเก็บข้อมูลเป็นการจัดเก็บโดยใช้ทรัพยากรของเครื่องเนื่องจากเป็นระบบอิสระ โดยอยู่ในลักษณะของไฟล์ข้อมูลแบบตาราง (.CSV)

เนื่องจากขั้นตอนวิธีการหาการจับคู่ใหญ่สุดในกราฟสองส่วนข้างต้นนี้มีชื่อว่า*ขั้นตอนวิธีฮังกาเรียน* (Hungarian Algorithm) [10] จึงสามารสร้างรหัสเทียมของขั้นตอนวิธีฮังกาเรียนได้ดังต่อไปนี้

```
Function Hungarian_algorithm (Graph G, Set X, Set Y, Matching M)
    Mat_M = M
    LOOP
        IF ALL x in X are M-saturated THEN:
            STOP: M saturates X
            RETURN Mat_M
        END IF
        LET u is an M-saturated vertex in X
        S = {u}, T = ∅
        LOOP
            IF N(S) = T THEN:
                STOP: |N(S)| < |S|
                RETURN Mat_M
            END IF
            LET y is a vertex in N(S) \ T
            IF y is M-saturated THEN:
                LET yz is in M
                S = S ∪ {z}
                T = T ∪ {y}
                CONTINUE LOOP
            ELSE:
                Mat_M = Mat_M Δ E(P)
                M = Mat_M
                BREAK LOOP
            END IF
        END LOOP
    END LOOP
END FUNCTION
```

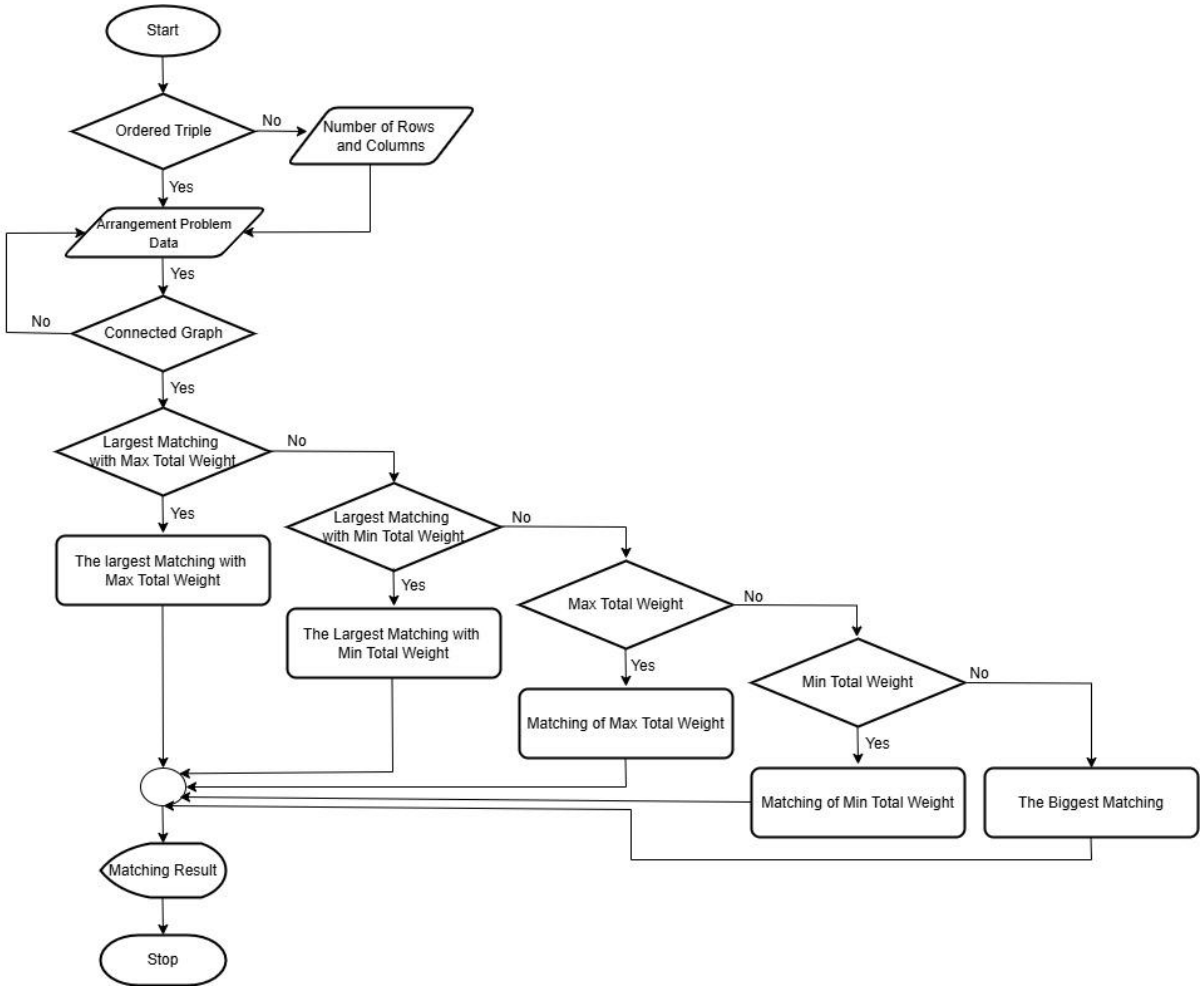
สำหรับหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงการพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อการจับคู่กราฟ [11] โดยอ้างอิงการออกแบบระบบที่กล่าวไว้ในข้างต้น

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. การพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อการจับคู่กราฟ

การพัฒนาระบบเพื่อหาการจับคู่ในกราฟถ่วงน้ำหนักนี้ ผู้วิจัยได้มีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานประกอบการพัฒนาระบบเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดดังตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้ Akshitha, S. และคณะ [12] ได้นำเอาขั้นตอนวิธีของฮังกาเรียนเข้ามาใช้เพื่อแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงาน (Traveling Salesman Problem) ในขณะที่ Wang, Y.และคณะ [13] ก็ได้นำเอาหลักการของฮังกาเรียนมาช่วยในการจัดสรรงานให้หุ่นยนต์ เช่นเดียวกับ Othman, F. และคณะ [14] ได้ทำการจับคู่โครงสร้างโปรตีนโดยใช้กราฟสองส่วน และ Rong, H. และ

คณะ [15] ได้นำกราฟสองส่วนเข้ามาช่วยในการจับคู่ภาพซึ่งการใช้ขั้นตอนวิธีการจับคู่จุดคุณลักษณะที่ดีที่สุดของกราฟแบบสองส่วนนั้นทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำมากขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการดั้งเดิม โดยเมื่อได้ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตประกอบกับการออกแบบระบบที่ได้วางไว้ การออกแบบผังงาน [16, 17] ก็ถือว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญและจำเป็น เนื่องจากจะช่วยให้ผู้ที่พัฒนาระบบสามารถมองเห็น และเข้าใจหลักการทำงานในทุกส่วนของโปรแกรมได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังทำให้เห็นถึงการรับค่าข้อมูลที่จำเป็น และการส่งข้อมูลออกเพื่อแสดงผล โดยภาพที่ 3 แสดงถึงลำดับขั้นตอนการทำงานผ่านแผนภาพผังงาน ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนได้ว่า หลังจากที่เข้าสู่ระบบผู้ใช้ต้องทำการเลือกประเภทการนำเข้าข้อมูล (ได้แก่ การนำเข้าแบบสามสิ่งอันดับ (Ordered Triple) หรือการนำเข้าในรูปแบบตาราง) กรณีที่ผู้ใช้เลือกการนำเข้าข้อมูลในลักษณะของสามสิ่งอันดับ ค่าที่ใส่เข้ามาในระบบจะต้องประกอบไปด้วยค่า 3 ค่า ดังนี้ ชื่อจุดที่ 1 ชื่อจุดที่ 2 และค่าน้ำหนักของเส้นเชื่อมระหว่างจุดที่ 1 และจุดที่ 2 โดยจุด 1 และ 2 จะถูกกำหนดให้เป็นจุดของกราฟ ในขณะที่ค่าน้ำหนักจะเป็นสิ่งที่แสดงถึงความสำคัญของเส้นเชื่อมระหว่างจุดทั้งสอง แต่หากในขั้นตอนแรก ผู้ใช้เลือกการนำเข้าข้อมูลในรูปแบบของตาราง ระบบจะแจ้งให้ผู้ใช้ระบุจำนวนแถวและหลักของตารางข้อมูลที่ต้องการ จากนั้นให้ทำการตั้งชื่อแถวและหลัก พร้อมใส่ค่าถ่วงน้ำหนักที่ต้องการลงในระบบตามลำดับ



ภาพที่ 3 ผังงานระบบการจับคู่กราฟถ่วงน้ำหนัก

เมื่อผู้ใช้นำเข้าข้อมูลกราฟสู่ระบบแล้ว ขั้นตอนถัดไปคือเลือกฟังก์ชันการทำงาน อันประกอบไปด้วย การจับคู่ใหญ่สุดที่มีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุด การจับคู่ใหญ่สุดที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด การจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุด การจับคู่ที่มีค่า

น้ำหนักรวมน้อยที่สุด และการจับคู่ใหญ่สุด จากนั้นระบบจะมีการคำนวณเพื่อหาคำตอบจากฟังก์ชันการทำงานที่เลือกในลำดับต่อไป โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลจะถูกแสดงออกทางหน้าจอ

ดังที่กล่าวไปแล้วในข้างต้น แอปพลิเคชันเพื่อการจับคู่ในกราฟถ่วงน้ำหนักในงานนี้ได้ถูกพัฒนา โดยอิงหลักการของขั้นตอนวิธีของฮังกาเรียน ภาพที่ 4 จึงเป็นการแสดงตัวอย่างโค้ดที่ถูกเขียนขึ้นเพื่อแก้ปัญหาการจับคู่ใหญ่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีของฮังกาเรียน [18] ในงานวิจัยนี้ ในขณะที่ภาพที่ 5 แสดงตัวอย่างโค้ดที่พัฒนาขึ้นเพื่อการแก้ปัญหาการจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด ซึ่งหลักการทำงานของฟังก์ชัน sort_vertext นี้มีจุดประสงค์ในการจัดการข้อมูลการจับคู่ (ได้แก่ตัวแปร matching) โดยอิงตามเส้นเชื่อมในกราฟ (ตัวแปร edges) โดยตัวแปร choice ที่รับมาจะถูกใช้กำหนดตรรกะในการประมวลผล ได้แก่ “การจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด” หรือกรณีอื่นที่ไม่ใช่การจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด ในกรณีที่ตัวแปร choice เป็นการจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด ค่าน้ำหนักของเส้นเชื่อมจะถูกตัดทิ้งออกไป แล้วจึงนำค่าของจุดยอด 1 และ 2 เพิ่มลงในตัวแปร sort_matching แต่หากค่าของ choice ไม่ใช่การจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด ระบบจะตรวจสอบว่าการจับคู่แต่ละคู่ว่ามีเส้นเชื่อมที่ถูกต้องหรือไม่ ถ้าใช่จะจัดเรียงทิศทาง/รูปแบบให้สอดคล้องกัน แต่หากไม่จะยังคงค่าเดิมไว้

```
def Hungarian_algor(G, X, Y, M):
    unsaturated_X = [u for u in X if u not in M or M.get(u) not in Y]
    if not unsaturated_X:
        return False, M
    for start_node in unsaturated_X:
        S = {start_node}; T = set()
        parent = {start_node: None}
        queue = deque([start_node])
        found_path = False
        while queue:
            u = queue.popleft()
            for v in G.get(u, []):
                if v not in T:
                    if v not in M or M.get(v) not in X:
                        path = []; curr = u
                        while curr is not None:
                            if parent[curr] is not None:
                                path.append((parent[curr], curr))
                            if curr in M and M[curr] is not None:
                                if curr == u:
                                    path.append((curr, v))
                                else:
                                    pass
                            curr = parent.get(parent.get(curr))
                        path_list = [v]
                        curr_node = v
                        while curr_node is not None:
                            prev = parent.get(curr_node)
                            if prev is not None:
                                path_list.append(prev)
                            curr_node = prev

                        path_list.reverse()
                        M_new = M.copy()
                        for i in range(len(path_list) - 1):
                            node1, node2 = path_list[i], path_list[i + 1]
                            if node1 in M_new and M_new[node1] == node2:
                                del M_new[node1]
                                if node2 in M_new and M_new[node2] == node1:
                                    del M_new[node2]
                            else:
                                M_new[node1] = node2
                                M_new[node2] = node1
                        return True, M_new

                    else:
                        T.add(v)
                        z = M[v]
                        if z not in S:
                            S.add(z)
                            parent[v] = u
                            parent[z] = v
                            queue.append(z)
    return False, M
```

ภาพที่ 4 โค้ดขั้นตอนวิธีฮังกาเรียน

```python
def sort_vertex(matching, edges):
    choice = choice_matching.get()
    vertex_data = [(edge[0], edge[1]) for edge in edges]
    sort_matching = []
    if choice == "การจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด":
        for vertex in matching:
            if len(vertex) == 3:
                node1, node2 = vertex[:2]
                sort_matching.append((node1, node2))
            else:
                sort_matching.append(vertex)
        return sort_matching
    else:
        for vertex in matching:
            node1, node2 = vertex
            if (node1, node2) in vertex_data:
                sort_matching.append((node1,node2))
            elif (node2,node1) in vertex_data:
                sort_matching.append((node2,node1))
            else:
                sort_matching.append((vertex))
        return sort_matching
```

ภาพที่ 5 ตัวอย่างโค้ดเพื่อแก้ปัญหาการจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด

จากภาพที่ 4 ตัวแปร G ในฟังก์ชัน Hungarian_algor เป็นการสื่อถึงกราฟโดยที่ต้องการนำมาแก้ปัญหาจับคู่ โดยกำหนดเป็นโครงสร้างข้อมูลชนิดดิกชันารี ในขณะที่ X และ Y แทนเซตของจุดในฝั่งซ้ายและขวาตามลำดับ ส่วน M แทนการจับคู่ปัจจุบัน ซึ่งการค้นหาวิถีแต่งเติมของ M ในกราฟสองส่วนถูกทำโดยการค้นหาในแนวกว้าง (Breadth-first Search: BFS) ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีหนึ่งในการท่องกราฟ [19, 20] โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานของขั้นตอนวิธีฮังกาเรียนนี้จะแบ่งออกได้เป็น 2 กรณีคือ 1) ผลลัพธ์เป็นจริงเมื่อพบวิถีแต่งเติมพร้อมการจับคู่ใหม่ และ 2) ผลลัพธ์เป็นเท็จหากไม่พบวิถีแต่งเติม

ในขั้นตอนของการพัฒนาระบบนี้ นอกเหนือจากการเขียนโปรแกรมเพื่อสร้างระบบแล้ว การทดสอบความถูกต้องก็เป็นสิ่งที่ต้องกระทำควบคู่กัน ตารางที่ 2-5 แสดงกรณีทดสอบสำหรับกระบวนการทำงานทั้ง 4 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและวัดประสิทธิภาพในการทำงานในด้านต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 2 กรณีทดสอบกระบวนการ Get Data

รหัสกรณีทดสอบ	รายละเอียดการทดสอบ	ข้อมูลนำเข้า	ผลลัพธ์ที่คาดหวัง	สถานะ
001	การรับข้อมูลแบบเซทของสามค่าที่มีลำดับ	ชุดข้อมูล 3 ตัว เช่น (A, B, 2)	ระบบสามารถนำเข้าข้อมูลเพื่อดำเนินการต่อในกระบวนการที่ 2	ผ่าน
002	การรับข้อมูลจำนวนแถวและหลัก	ข้อมูลในลักษณะตาราง	ระบบสามารถนำเข้าข้อมูลเพื่อดำเนินการต่อในกระบวนการที่ 2	ผ่าน
003	การตรวจสอบหากรับข้อมูลไม่ตรงตามรูปแบบ	ข้อมูลลักษณะอื่นที่ไม่ใช่เซทของสามค่าที่มีลำดับ หรือจำนวนแถวและหลัก	ระบบแจ้งเตือนเมื่อรับข้อมูลไม่ตรงรูปแบบ	ผ่าน

ตารางที่ 3 กรณีทดสอบกระบวนการ Verify Data

รหัสกรณีทดสอบ	รายละเอียดการทดสอบ	ข้อมูลนำเข้า	ผลลัพธ์ที่คาดหวัง	สถานะ
004	การสร้างกราฟเชื่อมโยง	ข้อมูลปัญหาการจัดเรียงจากขั้นตอนที่ 1	กราฟที่มีจุดยอดและเส้นเชื่อมครบถ้วนตามข้อมูลนำเข้า	ผ่าน
005	กรณีไม่สามารถสร้างกราฟเชื่อมโยง	ข้อมูลปัญหาการจัดเรียงจากขั้นตอนที่ 1 ที่มีจุดเชื่อมต่อไม่ครบ	ระบบแจ้งเตือนว่าไม่สามารถสร้างกราฟเชื่อมโยงได้	ผ่าน

ตารางที่ 4 กรณีทดสอบกระบวนการ Matching

รหัสกรณีทดสอบ	รายละเอียดการทดสอบ	ข้อมูลนำเข้า	ผลลัพธ์ที่คาดหวัง	สถานะ
006	การจับคู่ตามเกณฑ์	กราฟเชื่อมโยง และเกณฑ์การจับคู่	ผลลัพธ์การจับคู่ที่ถูกต้องตามเงื่อนไขร้อยละ 100	ผ่าน
007	การจับคู่ที่ไม่เป็นไปตามเกณฑ์	กราฟเชื่อมโยงที่ขัดกับเกณฑ์การจับคู่	ระบบแจ้งว่าไม่สามารถจับคู่ได้	ผ่าน

ตารางที่ 5 กรณีทดสอบกระบวนการ Display Results

รหัสกรณีทดสอบ	รายละเอียดการทดสอบ	ข้อมูลนำเข้า	ผลลัพธ์ที่คาดหวัง	สถานะ
006	การแสดงผลการจับคู่ในรูปแบบกราฟและข้อความทางหน้าจอ	ผลการจับคู่	ผลการจับคู่ในรูปแบบกราฟและข้อความ	ผ่าน
007	การบันทึกผลการจับคู่ในรูปแบบไฟล์ .CSV	ผลการจับคู่	ผลการจับคู่ในรูปแบบไฟล์	ผ่าน
008	ความสอดคล้องของการแสดงผลทางหน้าจอและไฟล์ .CSV	ผลการจับคู่	การแสดงผลทางหน้าจอและไฟล์ .CSV ต้องตรงกัน	ผ่าน

จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าแอปพลิเคชันการจับคู่ในกราฟถ่วงน้ำหนักสามารถจับคู่กราฟภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ได้ถูกต้องร้อยละ 100 แต่หากพิจารณาถึงเวลากระทำการจะพบว่าการสร้างกราฟโดยการใช้วิธีการคำนวณเพื่อหาตำแหน่งของจุดยอดโดยการใช้ขั้นตอนวิธี Fruchterman-Reingold (จากการใช้คำสั่ง Networkx.spring_layout) ในการพัฒนาแอปพลิเคชัน) มีความซับซ้อนด้านเวลา (Time Complexity) เท่ากับ $O(|V|^2 + |E|)$ ต่อการวนซ้ำหนึ่งรอบ ดังนั้นหากต้องการสร้างกราฟที่มีจุดยอดจำนวนไม่มากจะสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว แต่ถ้าต้องการสร้างกราฟมีจุดยอดจำนวนมากจะส่งผลต่อเวลาในการประมวลผลอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

2. ผลลัพธ์การจับคู่โดยใช้แอปพลิเคชันเพื่อการจับคู่ในกราฟถ่วงน้ำหนัก

จากผังงานการพัฒนาระบบและขั้นตอนวิธีของการจับคู่ในหัวข้อที่ผ่านมา การพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อจับคู่กราฟนี้ได้จัดวางวัตถุประสงค์ของการจับคู่ไว้ 5 รูปแบบ ได้แก่ (1) การจับคู่ใหญ่สุดที่มีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุด (2) การจับคู่ใหญ่สุดที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด (3) การจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุด (4) การจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด และ (5) การจับคู่ใหญ่สุดโดยไม่คำนึงถึงค่าน้ำหนักรวม โดยการจับคู่แต่ละประเภทมีความเหมาะสมกับลักษณะของปัญหาที่แตกต่างกันไป ดังนี้

(1) การจับคู่ใหญ่สุดที่มีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุด เป็นการจับคู่ที่เน้นให้เซตการจับคู่มีขนาดใหญ่ที่สุด โดยที่ค่าน้ำหนักรวมต้องมากที่สุดเช่นกัน ซึ่งการจับคู่แบบนี้เหมาะกับปัญหาที่ต้องการหาการจับคู่ที่ใหญ่ที่สุดและมีคำตอบหรือผลกำไรสูงที่สุด

(2) การจับคู่ใหญ่สุดที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด เป็นการจับคู่ที่คล้ายกับรูปแบบที่ (1) แต่แตกต่างตรงที่การจับคู่ในรูปแบบนี้ต้องการให้ค่าน้ำหนักรวมมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเหมาะสมกับปัญหาที่เน้นการหาต้นทุนต่ำที่สุด

(3) การจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุด เป็นการจับคู่ที่มุ่งเน้นให้ผลรวมของค่าน้ำหนักทั้งหมดมีค่ามากที่สุด โดยไม่จำเป็นต้องได้เซตการจับคู่ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด วิธีนี้เหมาะกับปัญหาที่ต้องการผลตอบแทนหรือประสิทธิภาพโดยรวมสูงสุด เช่น การจัดสรรงานให้ตรงกับความถนัดของแต่ละบุคคล แม้อาจมีบางคนที่ไม่ได้รับการจัดสรรงานก็ตาม

(4) การจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด เป็นการจับคู่ที่มุ่งลดผลรวมของค่าน้ำหนักให้มีค่าน้อยที่สุด โดยไม่จำเป็นต้องได้เซตการจับคู่ที่ใหญ่ที่สุด วิธีนี้เหมาะกับปัญหาที่เน้นการลดต้นทุนหรือความสูญเสียให้น้อยที่สุด แม้อาจมีบางองค์ประกอบที่ไม่ได้รับการจับคู่ก็ตาม

(5) การจับคู่ใหญ่สุดโดยไม่คำนึงถึงค่าน้ำหนักรวม เป็นการจับคู่ที่มุ่งเน้นให้เซตการจับคู่มีขนาดใหญ่ที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยไม่พิจารณาค่าน้ำหนักของเส้นเชื่อม

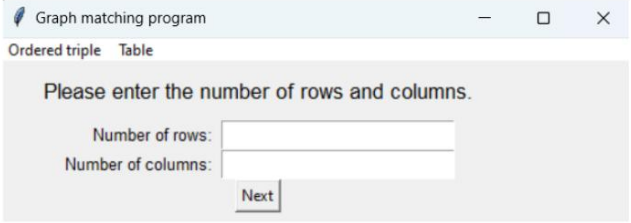
ซึ่งตัวอย่างการใช้งานแอปพลิเคชันและผลการจับคู่ได้ถูกแสดงและอธิบายไว้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 การจับคู่ใหญ่สุดที่มีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุด

เมื่อผู้ใช้งานได้เข้าสู่ระบบ ก่อนที่จะดำเนินการหาการจับคู่ในกราฟ ผู้ใช้ต้องเลือกวิธีการนำเข้าข้อมูลดังที่ได้อธิบายไปในก่อนหน้านี้ ดังภาพที่ 6



(a)



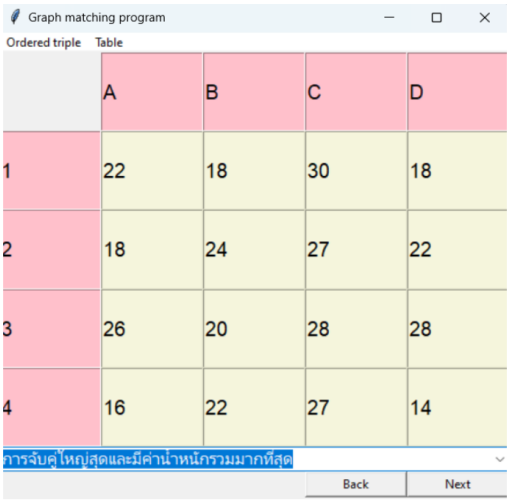
(b)

ภาพที่ 6 การรับข้อมูลเข้า (a) เมื่อต้องการรับค่าแบบสามสิ่งอันดับ และ (b) การรับค่าเข้าแบบตาราง

กรณีที่เป็นการรับค่าเข้าในรูปแบบตาราง หลังจากที่ระบุจำนวนแถวและหลักแล้ว ระบบจะทำการสร้างตารางที่มีมิติเท่ากับที่กำหนด จากนั้นผู้ใช้กรอกชื่อแถว ชื่อหลัก พร้อมค่าน้ำหนักลงในตารางที่ปรากฏขึ้นมา ดังเช่น ปัญหาการจัดพนักงานขายให้เหมาะสมกับสินค้าประจำเคาน์เตอร์เพื่อให้ได้กำไรมากที่สุด ขั้นแรกผู้ใช้ต้องทำการกรอกข้อมูลดังตารางที่ 6 ลงในระบบ โดยภาพที่ 6 แสดงการนำเข้าข้อมูลในรูปแบบของตาราง และการเลือกวิธีการจับคู่แบบจับคู่ใหญ่สุดและมีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุด

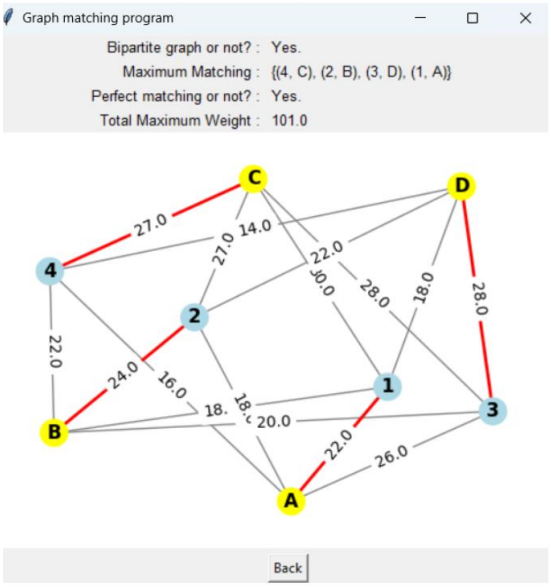
ตารางที่ 6 กำไรที่พนักงานขายสามารถทำได้ในแต่ละเคาน์เตอร์สินค้า

หมายเลขเคาน์เตอร์	พนักงานขาย			
	A	B	C	D
1	22	18	30	18
2	18	24	27	22
3	26	20	28	28
4	16	22	27	14



ภาพที่ 7 การเลือกฟังก์ชันการจับคู่ใหญ่สุดและมีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุด

จากภาพที่ 7 เมื่อกดปุ่ม “Next” ระบบจะทำการประมวลผลตามขั้นตอนวิธีที่กำหนด และแสดงผลลัพธ์ของการจับคู่ที่เลือกดังภาพที่ 8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พนักงาน A ถูกจัดให้ประจำเคาน์เตอร์ 1 พนักงาน B ถูกจัดให้ประจำเคาน์เตอร์ 2 พนักงาน C ถูกจัดให้ประจำเคาน์เตอร์ 4 และพนักงาน D ถูกจัดให้ประจำเคาน์เตอร์ 3 และมีผลรวมค่าน้ำหนักมากที่สุดคือ 101



ภาพที่ 8 ผลการจับคู่ใหญ่สุดและมีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุดของข้อมูลทดสอบตารางที่ 6

4.2 การจับคู่ใหญ่สุดที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด

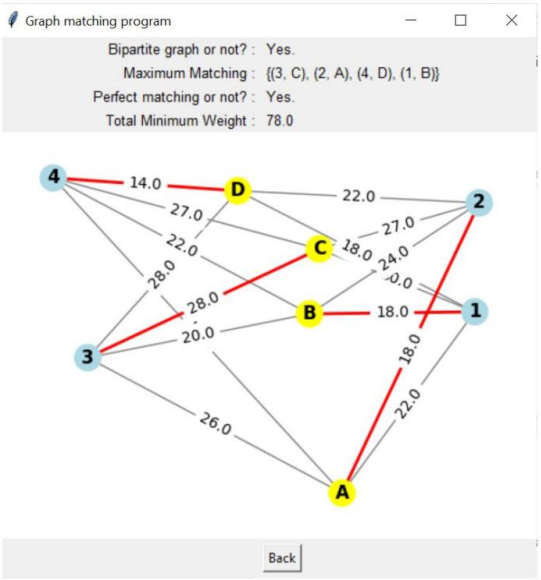
ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้แอปพลิเคชันเพื่อทำการหาการจับคู่ในกราฟซึ่งเป็นการจับคู่ใหญ่สุดแต่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด โดยข้อมูลที่นำมาทำการทดลองคือ

บริษัท Anon ต้องการจัดพนักงาน A, B, C และ D ไปประจำ 4 สาขา โดยที่พนักงานแต่ละคนมีค่าใช้จ่ายเงินเดือนที่แตกต่างกันในแต่ละสาขา ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตารางแสดงค่าใช้จ่ายเงินเดือนของพนักงานแต่ละคนในแต่ละสาขาใน 1 ปี (หน่วย: แสนบาท)

สาขา	พนักงาน			
	A	B	C	D
1	22	18	30	18
2	18	24	27	22
3	26	20	28	28
4	16	22	27	14

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานของระบบแสดงได้ดังภาพที่ 9 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า พนักงาน A ถูกจัดให้ประจำเคาน์เตอร์ 2 พนักงาน B ถูกจัดให้ประจำเคาน์เตอร์ 1 พนักงาน C ถูกจัดให้ประจำเคาน์เตอร์ 3 และพนักงาน D ถูกจัดให้ประจำเคาน์เตอร์ 4 และมีผลรวมค่าน้ำหนักน้อยที่สุดคือ 78 นั่นคือบริษัทจะมีค่าใช้จ่ายเงินเดือนของพนักงานน้อยที่สุด 78 แสนบาท



ภาพที่ 9 ผลการจับคู่ใหญ่สุดและมีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุดของข้อมูลทดสอบตารางที่ 7

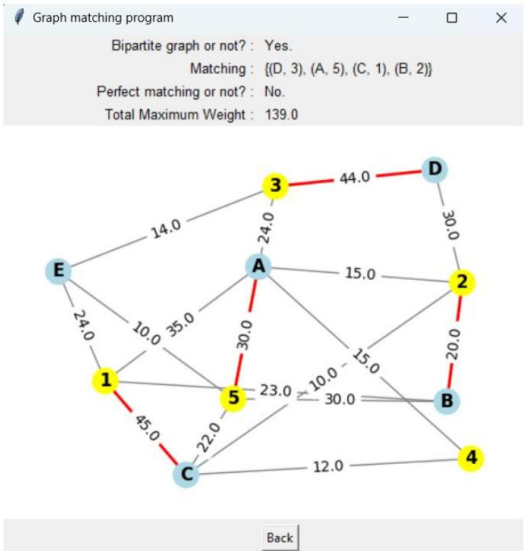
4.3 การจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุด

การจับคู่ในกราฟลักษณะนี้จะเน้นที่การได้ค่าน้ำหนักรวมมากที่สุด โดยไม่คำนึงถึงขนาดของการจับคู่ในกราฟ โดยข้อมูลที่นำมาทำการทดลองเพื่อหาการจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุดได้แสดงไว้ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ความสามารถในการทำอาหาร (กล่อง) ของเชฟต่อการทำอาหาร 1 ครั้ง

เชฟ	ชนิดของอาหาร				
	1	2	3	4	5
A	35	15	24	15	30
B	23	20	-	-	30
C	45	10	-	12	22
D	-	30	44	-	-
E	24	-	14	-	10

ข้อมูลในตารางที่ 8 แสดงความสามารถของเชฟแต่ละคนในการทำอาหารกล่องในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งเชฟแต่ละคนจะมีความถนัดในการทำอาหารแต่ละประเภทแตกต่างกัน ดังนั้นหากต้องการจัดสรรงานให้เชฟแต่ละคนประกอบอาหารคนละ 1 ชนิด จะสามารถแบ่งงานได้อย่างไร เพื่อให้ได้ปริมาณอาหารมากที่สุด เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ข้อมูลในตารางที่ 8 จะถูกนำเข้าสู่โปรแกรมประยุกต์ และทำการเลือกฟังก์ชันการแก้ปัญหาการหาการจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุด โดยผลลัพธ์เป็นไปดังภาพที่ 10 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เชฟ A ได้รับเลือกให้ทำอาหารประเภทที่ 5 เชฟ B ได้รับเลือกให้ทำอาหารประเภทที่ 2 เชฟ C ได้รับเลือกให้ทำอาหารประเภทที่ 1 และเชฟ D ได้รับเลือกให้ทำอาหารประเภทที่ 3 และจำนวนอาหารที่สามารถทำได้มากที่สุดคือ 139 กล่อง ในขณะที่เชฟ E ไม่ได้รับเลือกให้ทำอาหารประเภทใดเลย เนื่องจากอาหารประเภทที่ 1 3 และ 5 ถูกจัดสรรให้เชฟ C D และ A แล้ว ตามลำดับ



ภาพที่ 10 ผลการจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมมากที่สุดของข้อมูลทดสอบตารางที่ 8

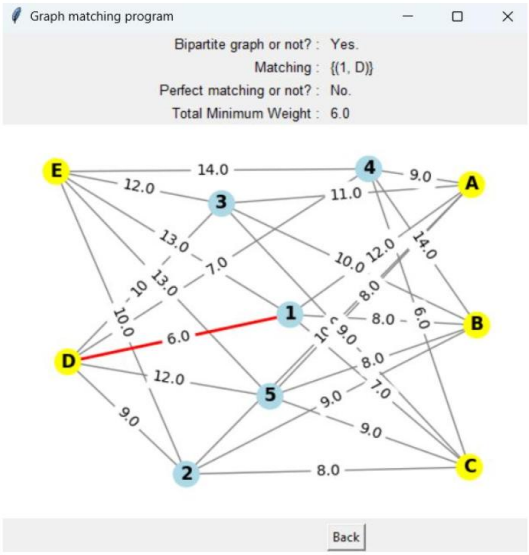
4.4 การจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด

สำหรับข้อมูลในการทดสอบปัญหาการหาการจับคู่กราฟถ่วงน้ำหนัก ที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด จะยกตัวอย่างปัญหาเกี่ยวกับการที่ผู้ประกอบการรายหนึ่งต้องการจ้างให้โรงงานแห่งที่ 1-5 ทำการผลิตสินค้าเพื่อนำออกจำหน่าย โดยตารางที่ 9 แสดงต้นทุนการผลิตต่อหน่วย (บาท) ของสินค้าแต่ละประเภท แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดด้านเงินทุน ผู้ประกอบการจึงต้องการทราบว่าควรจ้างบริษัทใดผลิตสินค้าเพียงหนึ่งชนิดเพื่อให้ได้ปริมาณมากที่สุด โดยใช้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด

ตารางที่ 9 ต้นทุนการผลิตสินค้าแต่ละประเภทต่อหน่วยของโรงงานแห่งที่ 1-5

โรงงาน	ต้นทุนการผลิตแต่ละประเภทต่อหน่วย (บาท)				
	A	B	C	D	E
1	12	8	7	6	13
2	10	9	8	9	10
3	11	10	9	10	12
4	9	14	6	7	14
5	8	8	9	12	13

ในการแก้ปัญหานี้ ผู้ใช้ได้ทำการเลือกฟังก์ชันการทำงานแบบการจับคู่กราฟถ่วงน้ำหนักที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุด เพราะไม่ต้องการให้ความสำคัญกับการจับคู่ใหญ่สุด ซึ่งจะช่วยคัดเลือกคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในปัญหาการจ้างโรงงานเพื่อผลิตสินค้าเพียงหนึ่งชนิด โดยต้องการปริมาณสินค้ามากที่สุด และต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด โดยผลลัพธ์เป็นดังภาพที่ 11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีเพียงโรงงานที่ 1 เพียงโรงงานเดียวที่ได้รับการจัดสรรให้ผลิตงานประเภท D ซึ่งปัญหาการหาการจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุดนี้จะเน้นการบริหารงานเพื่อให้ได้ต้นทุนต่ำที่สุด ดังนั้นจึงมีองค์ประกอบบางองค์ประกอบ (ได้แก่โรงงานที่ 2-5) ไม่ได้รับการจับคู่ในการแก้ปัญหาประเภทนี้



ภาพที่ 11 ผลการจับคู่ที่มีค่าน้ำหนักรวมน้อยที่สุดของข้อมูลทดสอบตารางที่ 9

4.5 การจับคู่ใหญ่สุดโดยไม่คำนึงถึงค่าน้ำหนักรวม

เป็นการหาการจับคู่ที่ต้องการให้เซตการจับคู่มีขนาดใหญ่ที่สุดโดยไม่คำนึงถึงค่าน้ำหนักรวมว่าจะมีค่ามากที่สุดหรือน้อยที่สุด ตัวอย่างเช่นปัญหาการจัดตารางห้องประชุม หากต้องการจัดการประชุมเพื่อประชุมกลุ่มย่อยกลุ่มละ 1 ชั่วโมง ในช่วงเวลา 8.00-12.00 น. ภายใต้เงื่อนไขจำนวนห้องประชุมมีไม่จำกัด และแต่ละกลุ่มประกอบด้วยสมาชิกดังต่อไปนี้

กลุ่มที่ 1: A, B, P

กลุ่มที่ 2: A, J, H, S, T

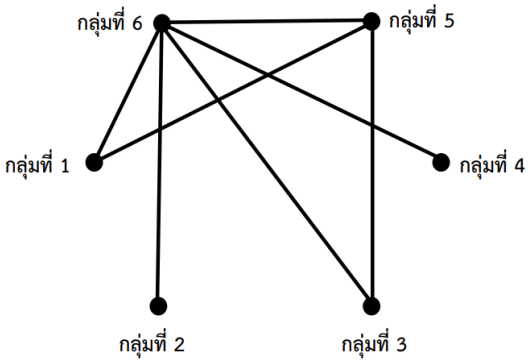
กลุ่มที่ 3: G, H, L, P

กลุ่มที่ 4: B, P, L, M, T

กลุ่มที่ 5: R, J, S, M

กลุ่มที่ 6: E, N, Z

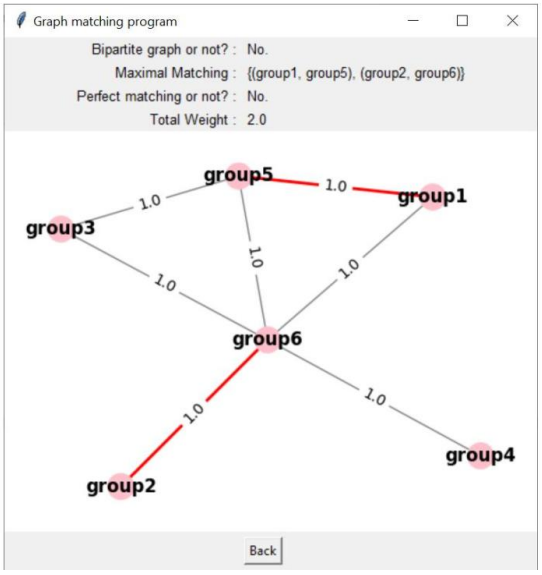
จากข้อมูลจะเห็นว่ามีสมาชิกบางคนสังกัดมากกว่า 1 กลุ่มย่อย เช่น A เป็นสมาชิกของกลุ่มที่ 1 และ 2 จึงทำให้กลุ่มที่ 1 และ 2 ไม่สามารถจัดประชุมในเวลาเดียวกันได้ มิฉะนั้นแล้ว A จะไม่สามารถเข้าประชุมได้ครบ ดังนั้นจะจัดการประชุมอย่างไรเพื่อให้สมาชิกทุกคนได้เข้าร่วมการประชุมในกลุ่มที่ตนเองสังกัดอย่างครบถ้วน เพื่อแก้ปัญหานี้ จึงจำเป็นต้องแปลงปัญหาและข้อมูลที่กำหนดให้อยู่ในรูปของกราฟ (ภาพที่ 12) เมื่อกำหนดให้จุดยอดในกราฟแทนกลุ่มการประชุม เส้นเชื่อมระหว่าง 2 จุดใด ๆ แทนการที่ไม่มีสมาชิกคนใดที่เป็นสมาชิกใน 2 กลุ่มนั้น ๆ และกำหนดค่าน้ำหนักของแต่ละเส้นเป็น 1 เนื่องจากการประชุมของทุกกลุ่มมีความสำคัญเท่ากัน



ภาพที่ 12 กราฟปัญหาการจัดตารางประชุม

เมื่อทำการนำเข้าข้อมูลกราฟในภาพที่ 12 เข้าสู่ระบบแล้ว จึงเลือกการจับคู่แบบใหญ่สุด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะพบว่า กลุ่มที่ 1 และ 5 สามารถจัดประชุมพร้อมกันได้ ในขณะที่กลุ่มที่ 2 สามารถจัดประชุมพร้อมกับกลุ่มที่ 6 และกลุ่มที่ 3 และ 4 ต้องจัดการประชุมแบบเดี่ยว (ดังแสดงในภาพที่ 13) ทำให้สามารถจัดตารางการใช้ห้องประชุมได้ดังนี้

เวลา 8.00 – 9.00 น. กลุ่ม 1 และ 5
เวลา 9.00 – 10.00 น. กลุ่ม 2 และ 6
เวลา 10.00 – 11.00 น. กลุ่ม 3
เวลา 11.00 – 12.00 น. กลุ่ม 4



ภาพที่ 13 ผลการจับคู่ใหญ่สุด

จากการดำเนินการพัฒนาระบบและตรวจสอบผลลัพธ์การทำงานพบว่าเป็นระบบที่สามารถช่วยผู้ใช้งานเพื่อการจับคู่ในกราฟถ่วงน้ำหนักสำหรับแก้ปัญหาการจัดสรรงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ด้วยข้อจำกัดในด้านที่เป็นระบบอิสระ ยังไม่รองรับการทำงานบนเว็บไซต์ รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการสร้างกราฟเมื่อมีจุดยอดเป็นจำนวนมาก และการทดลองจับคู่บนชุดข้อมูล (Dataset) แบบต่าง ๆ ทำให้การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบเพื่อให้ทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ใช้ได้กับชุดข้อมูลที่มีความหลากหลาย และสามารถประมวลผลได้ในระยะเวลาอันรวดเร็วจึงเป็นเป้าหมายที่สำคัญและท้าทายต่องานวิจัยนี้ต่อไปในอนาคต

สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับการหาการจับคู่ในกราฟถ่วงน้ำหนัก ซึ่งมีจุดแข็งที่สำคัญคือ แอปพลิเคชันนี้สามารถรองรับการรับเข้าของข้อมูลได้ 2 รูปแบบ และสามารถหาการจับคู่ได้หลากหลายรูปแบบถึง 5 ลักษณะ ที่ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้งานจริงมากกว่าซอฟต์แวร์หรือโค้ดที่มีอยู่ทั่วไปที่มักจำกัดเพียงกรณีใดกรณีหนึ่ง ผลลัพธ์จากการพัฒนานี้จึงไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนหรือเพิ่มผลประโยชน์ในปัญหาการจัดสรรงาน แต่ยังสามารถนำไปต่อยอดในสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรทรัพยากร การขนส่ง และการวางแผนตารางงานได้อย่างกว้างขวาง โดยแสดงให้เห็นถึงการบูรณาการระหว่างทฤษฎีทางคณิตศาสตร์และเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่เอื้อเฟื้อทรัพยากรและสิ่งอำนวยความสะดวกที่จำเป็นต่อการทำวิจัย จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. Shahriar Tanvir Alam, Eshfar Sagor, Tanjeel Ahmed, Tabassum Haque, Md Shoaib Mahmud, Salman Ibrahim, Ononya Shahjahan, Mubtasim Rubaet. Assessment of Assignment Problem using Hungarian Method. Proceedings of the First Australian International Conference on Industrial Engineering and Operations Management; 20-21 December 2022; Sydney, Australia. 2328-2338. https://ieomsociety.org/proceedings/2022australia/498.pdf
2. Jayasree T G, Malavika V. Graph Theory for Optimum Assignment. International Journal of Scientific Research in Science and Technology. 2025; 12(16): 337-343. https://ijsrst.com/home/issue/view/article.php?id=IJSRST25121640
3. Fatemeh Rajabi-Alni, Alireza Bagheri. Computing a Many-to-Many Matching with Demands and Capacities between Two Sets Using the Hungarian Algorithm. Journal of Mathematics. 2023; Volume 2023, Article ID 7761902: 1-6. https://doi.org/10.1155/2023/7761902
4. M. Usha Devi, A. Marimuthu, S. Santhana Megala. Bipartite Graph Matching in Donor-Recipient Using Enhanced Hopcroft Karp Algorithm for Liver transplantation. Advances and Applications in Mathematical Sciences. 2022; 21(9): 5291-5298. https://www.mililink.com/upload/article/956498328aams_vol_219_july_2022_a41_p5291-5298_m._usha_devi_et_al.pdf
5. Gabriel Cristian Dragomir-Loga, Marius Pop. Edmonds' Blossom Algorithm Analysis in a Medical Emergency Management System. The 9th IEEE International Conference on E-Health and Bioengineering - EHB 2021 Grigore T. Popa University of Medicine and Pharmacy; 18-19 November 2021; Web Conference, Romania. 1-4. https://ieeexplore.ieee.org/document/9657586
6. นวรัตน์ อนันต์ชื่น. ทฤษฎีกราฟ 1 .พิมพ์ครั้งที่ 1. นครปฐม: ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2540. 5-7, 113-118. https://lib.rmutp.ac.th/bibitem?bibid=b00033744

7. Chartrand, G., Lesniak, L. Graphs & Digraphs. 4th ed. Florida: Chapman & Hall/CRC; 2005. 28-30. https://books.google.co.th/books/about/Graphs_Digraphs_Fourth_Edition.html?id=LgZKLPRH2D4C&redir_esc=y
8. วรานุช แขมมณี. ทฤษฎีกราฟเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2559. 2-6, 120. https://www.chulabook.com/testprep/25508?srsltid=AfmBOoq4WHZqXg8sjDXafxZywmtLfRs1QrJqnoZBuAAcf2t2OETPgZgC
9. West, D.B. Introduction to Graph Theory. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall; 2001. 107-111. https://books.google.co.th/books/about/Introduction_to_Graph_Theory.html?id=TuvuAAAAMAAJ&redir_esc=y
10. Bondy, AJ, Murty, USR. Graph Theory with Applications. 5th ed. U.S.A: Elsevier Science Publishing Co., Inc.; 1982. 70-90. https://www.iro.umontreal.ca/~hahn/IFT3545/GTWA.pdf
11. วิษณุ ช้างเนียม. โครงสร้างข้อมูลและอัลกอริทึม + การประยุกต์ใช้ AI (DATA STRUCTURE & ALGORITHM + AI). พิมพ์ครั้งที่ 3 นนทบุรี: บริษัท ไอดีซี พรีเมียร์ จำกัด; 2568. 305-307. https://www.chulabook.com/computer/219458?srsltid=AfmBOopXXwwLjJGsVu32jHSVbHkWBe-arLZFB_adImKtsZnlPnrcgBNc
12. Akshitha, S., Ananda Kumar, K. S., Nethritha Meda, M., Sowmva, R., Suman Pawar, R. Implementation of Hungarian Algorithm to obtain Optimal Solution for Travelling Salesman Problem. In: 3rd IEEE. https://ieeexplore.ieee.org/document/9012439
13. Wang, Y., Wu, Y. -X., Zhang, H. An Improved Multi-Robot Task Allocation Algorithm Based on the Hungarian Algorithm. In: 44th Chinese Control Conference (CCC); 28-30 July 2025; Chongqing, China. 4903-4908. https://ieeexplore.ieee.org/document/11178894
14. Othman, F., Abdullah, R., Salam, R. A. Bipartite Graph for Protein Structure Matching, In: *Second Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS)*; 13-15 May 2008; Kuala Lumpur, Malaysia. IEEE publisher; 928-933. https://ieeexplore.ieee.org/document/4530600
15. Rong, H. -g., Li, Y. -j., Zhang, X. -s. An Image Matching Algorithm Based on Bipartite Graph, In: 7th International Conference on Information Science, Computer Technology and Transportation; 27-29 May 2022; Xishuangbanna, China. 1-4. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10071784
16. A. B. Chaudhuri. Flowchart and Algorithm Basics The Art of Programming. 2nd ed. Virginia: Mercury Learning and Information.; 2020. 1-17. https://books.google.co.th/books/about/Flowchart_and_Algorithm_Basics.html?id=pUOQzQEACAAJ&redir_esc=y
17. ศิริพร อ่วมมีเพียร. วิชาการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เบื้องต้นรหัสวิชา 20901-1002. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : วังอักษร, 2563. 21-38. https://search-library.spu.ac.th/bib/189590
18. Shopov, V., Markova, V. Application of Hungarian Algorithm for Assignment Problem. In: 2021 International Conference on Information Technologies (InfoTech); 16-17 Sep 2021; Varna, Bulgaria. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2021. 1-4. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9548600

19. Deo, N. Graph Theory with Applications to Engineering and Computer Science. 2nd ed. New York: Dover Publications, Inc.; 2016. 496. https://books.google.co.th/books/about/Graph_Theory_with_Applications_to_Engine.html?id=uk1KDAAAQBAJ&redir_esc=y
20. Denise, G., Matthias, B. The Practitioner's Guide to Graph Data. 1sted. California: O'Reilly Media.; 2020. 420. https://books.google.co.th/books/about/The_Practitioner_ s_Guide_to_Graph_Data.html?id=n6nYDwAAQBAJ&redir_esc=y

บทความวิจัย (Research Article)

ผลของการพัฒนารูปแบบการฟื้นฟูสมรรถภาพต่อเนื่องในผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมอง อำเภอวานรนิวาส จังหวัดสกลนคร

Effects of Developing a Continuous Rehabilitation Model for Stroke Patients in Wanon Niwat District, Sakon Nakhon Province

พิชชาพร พลทะสอน[1*]
Pitchaporn Phontason[1*]
[1]แผนกกายภาพบำบัด กลุ่มงานเวชกรรมฟื้นฟู โรงพยาบาลวานรนิวาส จ.สกลนคร 47120
[1]Physical therapy department, Physical medicine and rehabilitation department, Wanon Niwat Hospital, Sakon Nakhon Province 47120
*Corresponding author; email: Tune21013@hotmail.com

วันที่รับบทความ (Received) 9 มกราคม 2569
วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised) 24 มีนาคม 2569
วันที่ตอบรับบทความ (Accepted) 24 มีนาคม 2569

บทคัดย่อ

ผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองมักประสบปัญหาความสามารถในการปฏิบัติกิจวัตรประจำวันและคุณภาพชีวิตลดลง ส่งผลต่อทั้งผู้ป่วยและผู้ดูแล การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของโปรแกรมฟื้นฟูสมรรถภาพจึงมีความจำเป็น เพื่อยกระดับการดำรงชีวิตและคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยอย่างเหมาะสม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เปรียบเทียบระดับความสามารถในการปฏิบัติกิจวัตรประจำวัน คุณภาพชีวิต ค่าอรรถประโยชน์ด้านสุขภาพของกลุ่มผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง ก่อนและหลังโปรแกรมฟื้นฟูสมรรถภาพ 2) เพื่อประเมินความพึงพอใจของกลุ่มผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองและกลุ่มผู้ดูแลต่อการพัฒนารูปแบบการฟื้นฟูสมรรถภาพในผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมอง โดยการศึกษาครั้งนี้เป็น การวิจัยกึ่งทดลอง แบบกลุ่มเดียววัดก่อน–หลัง (one-group pretest-posttest design) กลุ่มตัวอย่างคือผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง 50 คน คัดเลือกแบบเฉพาะเจาะจง เก็บข้อมูลระหว่างเดือนมีนาคม–กันยายน 2568 เครื่องมือที่ใช้ได้แก่ แบบประเมิน Barthel ADL Index (BI), แบบสอบถาม EQ-5D-5L และแบบสอบถามความพึงพอใจ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติพรรณนาและสถิติ Paired t-test ผลการศึกษาพบว่า ก่อนเข้าร่วมโปรแกรม ผู้ป่วยมีคะแนน BI เฉลี่ย 8.02±5.06 คะแนน และเพิ่มขึ้นเป็น 15.74±4.60 คะแนน หลังเข้าร่วมโปรแกรมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.001$) ค่าอรรถประโยชน์จาก EQ-5D-5L เพิ่มจาก 0.20±0.29 เป็น 0.63±0.29 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.001$) ขณะที่ผู้ป่วยและผู้ดูแลมีความพึงพอใจในระดับสูง (47.51±2.66 และ 47.14±2.96 คะแนน ตามลำดับ) สรุปผลการศึกษา พบว่ารูปแบบการฟื้นฟูสมรรถภาพผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองมีประสิทธิภาพในการเสริมสร้างความสามารถในการใช้ชีวิตประจำวันและยกระดับคุณภาพชีวิตผู้ป่วย รวมทั้งสร้างความพึงพอใจแก่ผู้ป่วยและผู้ดูแล ดังนั้นควรมีการส่งเสริมให้นำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้ในสถานพยาบาลอย่างต่อเนื่อง เพื่อสนับสนุนการฟื้นฟูสมรรถภาพและยกระดับคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยในระยะยาว

คำสำคัญ: การฟื้นฟูสมรรถภาพต่อเนื่อง, ความสามารถในการทำกิจวัตรประจำวัน, คุณภาพชีวิต, ผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง, การฟื้นฟูสมรรถภาพระยะกลาง

Abstract

Patients with stroke often experience impaired ability to perform activities of daily living and reduced quality of life, which affect both patients and their caregivers. Therefore, the development and evaluation of a rehabilitation program are essential to enhance functional ability and improve patients' quality of life. This study aimed (1) to compare levels of activities of daily living, quality of life, and utility values of health-related quality of life among stroke patients before and after participating in a rehabilitation model, and (2) to evaluate the satisfaction of stroke patients and their caregivers with the developed rehabilitation model. A quasi-experimental one-group pretest–posttest design was conducted among 50 purposively selected stroke patients from March to September 2025. Data were collected using the Barthel Activities of Daily Living Index (BI), the EQ-5D-5L quality of life questionnaire, and a satisfaction survey. Descriptive statistics and paired t-test were used for data analysis. The results revealed that prior to participation, patients had a mean BI score of 8.02 ± 5.06, which significantly improved to 15.74 ± 4.60 after six months of continuous rehabilitation ($p< 0.001$). The mean EQ-5D-5L utility score significantly increased from 0.20 ± 0.29 to 0.63 ± 0.29 ($p< 0.001$). Both patients and caregivers reported high levels of satisfaction, with mean scores of 47.51 ± 2.66 and 47.14 ± 2.96 out of 50, respectively. In conclusion, the stroke rehabilitation program was effective in enhancing patients ability to perform activities of daily living and improving health-related quality of life, while also generating high satisfaction among both patients and caregivers. These findings highlight the importance of integrating structured rehabilitation programs into healthcare facilities on a continuous basis to support functional recovery and improve long-term quality of life in stroke patients.

Keywords: Continuous Rehabilitation, Activities of daily living, Quality of life, Stroke patients, Subacute stroke rehabilitation

บทนำ

โรคหลอดเลือดสมอง (Stroke) เป็นภาวะที่สมองได้รับเลือดไปเลี้ยงไม่เพียงพออย่างเฉียบพลัน อันเกิดจากหลอดเลือดอุดตัน (Ischemic stroke) หรือแตก (Hemorrhagic stroke) ส่งผลให้เซลล์สมองสูญเสียหน้าที่และเกิดความพิการตามมา เช่น อัมพาต การพูด การเข้าใจ และความจำผิดปกติ [1] โรคหลอดเลือดสมองจัดเป็นปัญหาสาธารณสุขสำคัญระดับโลก โดยองค์การอัมพาตโลก (World Stroke Organization: WSO) รายงานว่าโรคหลอดเลือดสมอง เป็นสาเหตุการเสียชีวิตอันดับ 2 ของโลก [2] และคาดการณ์ว่าอัตราการเสียชีวิตจากโรคหลอดเลือดสมองอาจเพิ่มขึ้นถึงราว 50% ภายในปี 2050 โดยผู้เสียชีวิตส่วนใหญ่จะอยู่ในประเทศรายได้ปานกลางถึงต่ำ [3] สำหรับประเทศไทย ข้อมูลจากกรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข ปี 2567 พบผู้ป่วยสะสมจำนวน 358,062 ราย และเสียชีวิต 39,086 ราย [4] แสดงให้เห็นว่าโรคหลอดเลือดสมองเป็นปัญหาสาธารณสุขสำคัญที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในสังคมผู้สูงอายุที่กำลังขยายตัว หากขาดมาตรการป้องกันและฟื้นฟูที่เหมาะสม โรคหลอดเลือดสมองยังเป็นสาเหตุการเจ็บป่วยเรื้อรังที่ส่งผลกระทบทั้งด้านร่างกาย จิตใจ และสังคม ผู้ป่วยที่รอดชีวิตจำนวนมากมีความพิการในระดับต่าง ๆ ร้อยละ 50 มีความพิการรุนแรงจนไม่สามารถช่วยเหลือตนเองได้ภายใน 1 เดือนหลังเกิดโรค [5] ส่งผลให้ผู้ป่วยต้องพึ่งพาผู้อื่น เกิดภาระทั้งต่อครอบครัวและสังคม ทำให้การฟื้นฟูสมรรถภาพโรคหลอดเลือดสมองเป็นขั้นตอนสำคัญและจำเป็นต้องเริ่มอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ช่วงแรกเพื่อกระตุ้นการฟื้นตัว ลดภาวะแทรกซ้อน และคืนคุณภาพชีวิตให้แก่ผู้ป่วย

ในพื้นที่เขตบริการของโรงพยาบาลวานรนิวาส อำเภอวานรนิวาส จังหวัดสกลนคร พบว่าจำนวนผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองเพิ่มขึ้นต่อเนื่องทุกปี โดยเฉพาะผู้ป่วยที่มีภาวะแขนขาอ่อนแรงทั้งแบบอัมพาตครึ่งซีกและอัมพาตสองข้าง ซึ่งหลายรายไม่สามารถยืน เดิน หรือช่วยเหลือตัวเองได้ สถิติในช่วงปี 2565 - 2567 พบผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองในพื้นที่เพิ่มขึ้นจาก 128 ราย เป็น 138 รายตามลำดับ ปัญหาที่พบคือ หลังจากผู้ป่วยได้รับการรักษาในโรงพยาบาลและกลับบ้านแล้ว ส่วนใหญ่ขาดโอกาสเข้ารับการฟื้นฟูสมรรถภาพอย่างต่อเนื่องในระยะ 6 เดือนแรก ซึ่งเป็นช่วงเวลาสำคัญ (Golden time period) จะช่วยให้ผู้ป่วยฟื้นตัวได้ดีที่สุด รวมไปถึง ญาติและผู้ดูแลยังขาดความรู้ความเข้าใจในการดูแลและฟื้นฟู ส่งผลให้ผู้ป่วยหลายรายสมรรถภาพร่างกายเสื่อมถอยลง กลายเป็นภาระต่อครอบครัวและสังคม สูญเสียรายได้และทรัพยากรจำนวนมาก

ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาในประเทศไทยพบว่า สมรรถภาพชีวิตที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพ (Health-related quality of life: HRQoL) ของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญภายใน 3 เดือนแรกหลังออกจากโรงพยาบาล และมีแนวโน้มคงที่ในช่วง 3 - 6 เดือนหลังการรักษา [6] งานวิจัยต่างประเทศยังมีรายงานว่า ปริมาณและความถี่ของการฟื้นฟูภายใน 6 เดือนหลังเกิดโรคมีผลสัมพันธ์เชิงบวกกับอัตราการรอดชีวิตระยะยาวของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง [7]

รูปแบบบริการฟื้นฟูสมรรถภาพผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองแบบเดิมของโรงพยาบาลวานรนิวาส มีข้อจำกัดด้านการเข้าถึงและความต่อเนื่อง โดยการให้บริการกายภาพบำบัดในผู้ป่วยในขึ้นอยู่กับการส่งปรึกษาจากแพทย์ ส่งผลให้ผู้ป่วยบางรายไม่ได้รับบริการอย่างทันท่วงที และภายหลังจำหน่ายยังขาดระบบติดตามฟื้นฟูอย่างต่อเนื่องทั้งในคลินิกผู้ป่วยนอกและในชุมชน การพัฒนารูปแบบบริการครั้งนี้จึงมุ่งปรับปรุงระบบเดิมภายใต้กรอบวิชาชีพ โดยกำหนดให้ผู้ป่วยได้รับการส่งปรึกษาภายใน 24 ชั่วโมง เพิ่มความรวดเร็วในการเข้าถึงบริการ และจัดให้มีการฟื้นฟูต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 6 เดือน ซึ่งเป็นช่วงเวลาสำคัญต่อการฟื้นตัว (golden period) ครอบคลุมทั้งการฝึกในรูปแบบผู้ป่วยนอกสัปดาห์ละ 1 ครั้ง ครั้งละ 2 ชั่วโมง และการติดตามในชุมชนอย่างน้อยเดือนละ 1 ครั้ง ภายใน 1 เดือนหลังจำหน่าย พร้อมทั้งมีการประเมินผลลัพธ์อย่างเป็นระบบ ทั้งนี้ รูปแบบดังกล่าวมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริการ ส่งเสริมการฟื้นตัว และเพิ่มความสามารถในการช่วยเหลือตนเองของผู้ป่วยให้ใกล้เคียงปกติมากที่สุดภายในระยะเวลาที่เหมาะสม

ดังนั้นผู้วิจัยและงานกายภาพบำบัดของโรงพยาบาลได้ตระหนักถึงปัญหาและเห็นความสำคัญนี้ จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนารูปแบบการฟื้นฟูสมรรถภาพผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองที่เหมาะสมและต่อเนื่อง เพื่อให้ผู้ป่วยและญาติสามารถเข้าถึงบริการได้ทันท่วงที โดยเฉพาะการเริ่มฟื้นฟูตั้งแต่ระยะต้น ควบคู่กับการติดตามและสนับสนุนต่อเนื่องทั้งในโรงพยาบาลและชุมชน เพื่อส่งเสริมให้ผู้ป่วยกลับมาทำกิจวัตรประจำวันได้ มีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น ลดภาระต่อครอบครัว และยกระดับมาตรฐานการดูแลผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองในพื้นที่

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของการใช้รูปแบบการฟื้นฟูสมรรถภาพผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองในโรงพยาบาลวานรนิวาส ดังนี้

1. เปรียบเทียบระดับความสามารถในการปฏิบัติกิจวัตรประจำวัน คุณภาพชีวิต ค่าอรรถประโยชน์ด้านสุขภาพของกลุ่มผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง ก่อนและหลังเข้าร่วมโปรแกรมฟื้นฟูสมรรถภาพ
2. เพื่อประเมินความพึงพอใจของกลุ่มผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองและกลุ่มผู้ดูแล ต่อการพัฒนารูปแบบการฟื้นฟูสมรรถภาพในผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมอง

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิจัยกึ่งทดลอง (Quasi-experimental research) ชนิดหนึ่งกลุ่มวัดก่อนและหลังการทดลอง (One groups, pretest-posttest design) โดยผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองและผู้ดูแล จะเข้าร่วมโปรแกรมฟื้นฟูสมรรถภาพระหว่างเดือน 1 มีนาคม 2568 - 30 กันยายน 2568 โดยรูปแบบระบบการฟื้นฟูสมรรถภาพผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองที่พัฒนาดังแสดงในภาพที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. เสริมสร้างความรู้เรื่องโรคหลอดเลือดสมองร่วมกับฝึกทักษะผู้ดูแลผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองสำหรับ ผู้ป่วยที่ช่วยเหลือตัวเองไม่ได้หรือผู้ป่วยที่ช่วยเหลือตัวเองได้น้อยตามความต้องการและความจำเป็นที่เหมาะสมกับผู้ป่วยแต่ละราย พร้อมแจกเอกสารแผ่นพับ

2. นักกายภาพบำบัดฝึกทักษะการออกกำลังกายแขนและขา เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของกล้ามเนื้อ การยืดกล้ามเนื้อเพื่อลดความตึงตัวของกล้ามเนื้อ ฝึกการทรงตัว การเคลื่อนย้าย การเดินขึ้นลงบันไดดังนี้

2.1 ผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมองรายใหม่ที่ได้รับการรักษาแบบผู้ป่วยในทุกราย ได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพภายใน 24 ชั่วโมง หลังแพทย์/พยาบาล ส่งปรึกษานักกายภาพบำบัด ได้รับการฟื้นฟูสมรรถภาพ วันละ 1 ชั่วโมง สัปดาห์ละ 3 ครั้ง และเยี่ยมบ้านหลังผู้ป่วยกลับบ้าน ถ้าผู้ป่วยมีความพร้อม นัดมาทำกายภาพบำบัดที่โรงพยาบาลวานรนิวาส หลังจากนั้นติดตามทุก 1 เดือน

2.2 ผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมองประเภทผู้ป่วยนอกได้รับการฟื้นฟู 2 ชั่วโมง/ครั้ง จำนวน 1 ครั้ง/สัปดาห์ ถ้าผู้ป่วยมีความพร้อมนัดมาทำกายภาพบำบัดที่โรงพยาบาลวานรนิวาส และติดตามเยี่ยมทุก 1 เดือนพร้อมประเมิน

3. จัดทำทะเบียนผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมองรายใหม่ หลังจำหน่ายออกจาก รพ. ที่มีความจำเป็นต้องได้รับการฟื้นฟูสมรรถภาพอย่างต่อเนื่องในชุมชน

4. จัดทำแผนเยี่ยมบ้านเพื่อฟื้นฟูสมรรถภาพในชุมชน ครอบคลุมถึงมอบหมายให้มีนักกายภาพบำบัดเพื่อการฟื้นฟูผู้ป่วยตามพื้นที่เขต รพ.สต. โดยเน้นฟื้นฟูผู้ป่วยตามรายชื่อทะเบียน โดยผู้ป่วยต้องได้รับการเยี่ยมบ้านเพื่อฟื้นฟูสมรรถภาพที่บ้าน (โปรแกรมตาม CPG) โดยนักกายภาพบำบัดประจำ รพ.สต. นั้น ภายในระยะเวลา 1 เดือนหลังจำหน่าย เป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที/ครั้ง อย่างน้อย 1 ครั้ง/เดือน

5. ออกเยี่ยมบ้านฟื้นฟูสมรรถภาพผู้ป่วยตามแผนปฏิบัติงานอย่างต่อเนื่องทุกเดือน โดยออกเยี่ยมร่วมกับเจ้าหน้าที่ รพ.สต. เพื่อก่อเกิดเครือข่ายการดูแลต่อเนื่องร่วมกับชุมชน และสร้างขวัญกำลังใจและกระตุ้นให้ผู้ป่วยและญาติ ตระหนักถึงความสำคัญของการฟื้นฟูสมรรถภาพให้กลับมาใกล้เคียงปกติมากที่สุด

6. ประเมินผล โดยใช้แบบประเมิน Barthel index และแบบประเมิน EQ-5D-5L ทุกครั้งที่ออกให้บริการฟื้นฟูสมรรถภาพ เพื่อติดตามดู progression ผู้ป่วย และค่อย ๆ ให้โปรแกรมการฟื้นฟูสมรรถภาพที่เหมาะสมตามแต่ละระดับความสามารถของผู้ป่วย ตามแนวทางการฟื้นฟูสมรรถภาพที่จัดทำขึ้น

7. กำหนดให้มีประชุมประจำเดือนหน่วยงาน ทุกวันศุกร์สุดท้ายของทุกเดือน เพื่อประชุมทบทวนวิชาการและแลกเปลี่ยนกรณีศึกษาภายในหน่วยงานทุกเดือน เพื่อกำกับติดตามและแลกเปลี่ยนเรียนรู้ปัญหา ตลอดจนหาแนวทางการฟื้นฟูสมรรถภาพในผู้ป่วยแต่ละรายร่วมกัน

8. เก็บข้อมูลและรายงานผลรายเดือนให้ที่ประชุมรับทราบ และจำหน่ายผู้ป่วย

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรเป้าหมาย คือ ผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองชนิดหลอดเลือดตีบ (Ischemic stroke) และชนิดหลอดเลือดแตก (Hemorrhagic stroke) ที่มีภูมิลำเนาในเขตอำเภอวานรนิวาส เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลวานรนิวาส ระหว่างเดือนมีนาคม - กันยายน 2568 จำนวน 50 คน และกลุ่มตัวอย่างผู้ดูแลผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง อีกจำนวน 50 คน เพื่อประเมินระดับความพึงพอใจต่อการพัฒนารูปแบบการฟื้นฟูสมรรถภาพในผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมอง

เกณฑ์การคัดเลือก (Inclusion criteria)

1. ได้รับการวินิจฉัยจากโรงพยาบาลวานรนิวาส ว่าเป็นผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองชนิดหลอดเลือดตีบ (Ischemic stroke) และชนิดหลอดเลือดแตก (Hemorrhagic stroke)

2. มีความสามารถในการดำเนินชีวิตประจำวันผู้ป่วย (The Barthel’s ADL Index) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 15 คะแนน

3. สามารถสื่อสารได้ มีผู้ดูแลที่สามารถให้ข้อมูลแทนได้ และยินยอมเข้าร่วมการศึกษา

เกณฑ์การคัดออก (Exclusion criteria)

1. ผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมองที่มีภาวะแทรกซ้อนเฉียบพลัน

การคำนวณจำนวนประชากรตัวอย่าง

การทดลองนี้มีจำนวนอาสาสมัคร 50 คน เป็นผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองได้รับการฟื้นฟูสมรรถภาพในโรงพยาบาลวานรนิวาส ที่เข้ารับการรักษาระหว่างเดือนมีนาคม-กันยายน 2568 โดยคำนวณจากงานวิจัยของสุรีรักษ์และคณะ [9] อ้างอิงจากผลการดำเนินชีวิตประจำวันผู้ป่วย (The Barthel's ADL Index) และคำนวณขนาดตัวอย่างด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป [10] ดังนี้

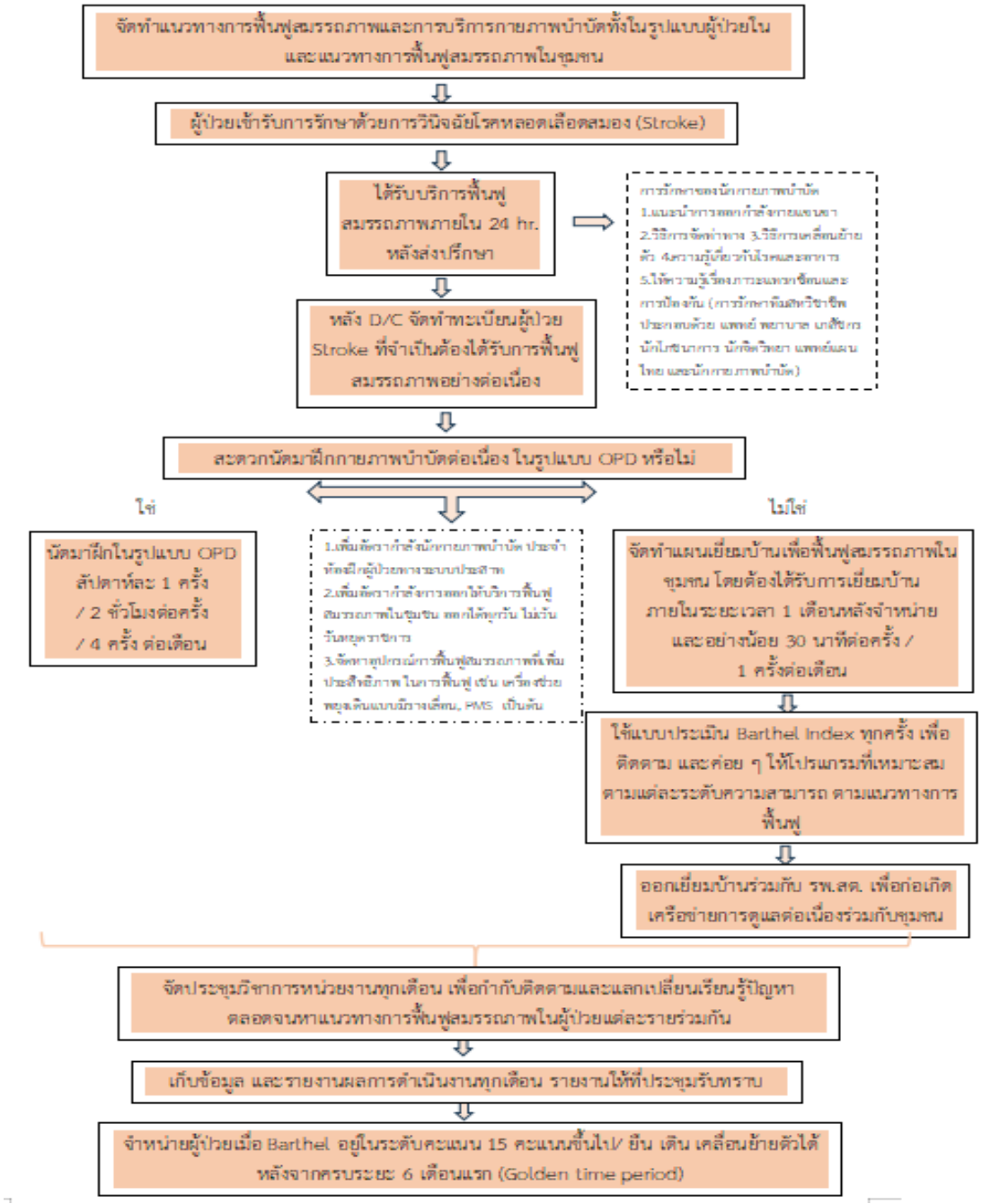
$$n = \frac{(z_{1-\alpha} + z_{1-\beta})^2 \sigma^2}{(\epsilon - \delta)^2}$$

$$\epsilon = \mu - \mu_0$$

กำหนดค่า Z(0.95) = 1.64, Z(0.8) = 0.84, Reference value ($\mu 0$) = 6.53, Mean (μ) = 12.8, SD. = 3.36, Magin (δ) = 5.0, n = 43 คน

และมีการกำหนดขนาดตัวอย่างเพิ่มเพื่อป้องกันการถอนตัวจากการศึกษา (drop out) ร้อยละ 15 จะได้จำนวนอาสาสมัครจำนวน 50 คน

ผู้วิจัยคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจง (Purposive sampling) [8] เป็นผู้ป่วยโรคหลอดเลือด สมองชนิดหลอดเลือดตีบ (Ischemic stroke) และ ชนิดหลอดเลือดแตก (Hemorrhagic stroke) ที่มีภูมิลำเนาในเขตอำเภอวานรนิวาส และมีความสามารถในการดำเนินชีวิตประจำวันผู้ป่วย (The Barthel's ADL Index) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 15 คะแนน



ภาพที่ 1 รูปแบบระบบการฟื้นฟูสมรรถภาพผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องมือในการทดลอง

1.1 คู่มือแนวทางการฟื้นฟูสมรรถภาพและการบริการกายภาพบำบัด (Clinical practice guideline: CPG) ทั้งในรูปแบบผู้ป่วยใน และแนวทางการฟื้นฟูสมรรถภาพในชุมชน (ฝึกทักษะการออกกำลังกายแขนและขา เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของกล้ามเนื้อ การยืดกล้ามเนื้อเพื่อลดความตึงตัวของกล้ามเนื้อ ฝึกการทรงตัว ฝึกการเคลื่อนย้าย การเดินขึ้นลงบันได) [11]

1.2 เครื่องมือทางกายภาพบำบัด สำหรับการฝึกผู้ป่วยทางระบบประสาท ได้แก่ เครื่องกระตุ้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (PMS: Peripheral magnetic stimulation) และเครื่องช่วยพยุงเดินแบบมีรางเลื่อน เป็นต้น

2. เครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล

2.1 แบบบันทึกประวัติผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมอง ประกอบด้วย

2.1.1 บันทึกประวัติข้อมูลพื้นฐานของผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมอง ที่มารับการรักษาที่โรงพยาบาลวานรนิวาสในรูปแบบผู้ป่วยใน เก็บข้อมูลตามแนวทางการบันทึกในเวชระเบียนทางกายภาพบำบัด แบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ข้อมูลผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมอง ได้แก่ อายุ เพศ สถานภาพสมรส การศึกษา อาชีพ ก่อนป่วย รายได้ของครอบครัว โรคประจำตัว สิทธิการรักษา วันที่เข้ารับการรักษา วันที่จำหน่าย การวินิจฉัยโรค

ส่วนที่ 2 ข้อมูลผู้ดูแลผู้ป่วย (Care giver) ได้แก่ เพศ อายุ สถานภาพสมรส และการศึกษา

2.1.2 แบบประเมินความสามารถการทำกิจวัตรประจำวัน ด้วยแบบดัชนีบาร์เธล (Barthel index: BI) พัฒนาโดยมาร์โฮนีและบาร์เทล [12] แปลเป็นภาษาไทยและอ้างโดยสุรีรักษ์ มั่นคง [9] เป็นเครื่องมือที่มีค่าความเชื่อมั่นอยู่ในระดับดีถึงดีมาก โดยมีค่าความสอดคล้องภายใน (Cronbach's alpha) ประมาณ 0.80 - 0.95 และค่าความเชื่อมั่นระหว่างผู้ประเมินและการทดสอบซ้ำ (ICC) มากกว่า 0.85 [13] ประกอบด้วยดัชนี 10 ด้าน แต่ละด้านประเมินระดับความสามารถ 0 - 3 คะแนน จะมีเกณฑ์ดังนี้

1. คะแนนเต็ม (3 คะแนน): สามารถทำกิจกรรมได้อย่างสมบูรณ์และไม่ต้องการความช่วยเหลือ
2. คะแนนบางส่วน (2 คะแนน): สามารถทำกิจกรรมได้บางส่วน แต่ยังต้องการความช่วยเหลือจากผู้อื่น
3. คะแนนต่ำสุด (1 คะแนน): ไม่สามารถทำกิจกรรมได้เอง ต้องการความช่วยเหลืออย่างเต็มที่
4. ไม่สามารถทำกิจกรรมได้ (0 คะแนน): ไม่สามารถทำกิจกรรมได้เลย

โดยคะแนนรวมสูงสุด 20 คะแนน คะแนนที่สูงขึ้นบอกถึงระดับความสามารถมากขึ้น งานวิจัยนี้ใช้เกณฑ์ประเมินความสามารถในการทำกิจวัตรประจำวันตามกลุ่มศักยภาพผู้สูงอายุ ได้แก่ มีภาวะพึ่งพิงโดยสมบูรณ์ (0 - 4 คะแนน) ภาวะพึ่งพิงรุนแรง (5 – 8 คะแนน) ภาวะพึ่งพิงปานกลาง (9 - 11 คะแนน) และไม่เป็นการพึ่งพิง (12 - 20 คะแนน)

2.1.3 แบบประเมินคุณภาพชีวิตด้วยแบบประเมิน EQ-5D-5L (The European Quality of Life Measure-5 Domain) ที่ประเมินคุณภาพชีวิตด้านสุขภาพฉบับภาษาไทย [14] มีค่าความเชื่อมั่นที่ผ่านการประเมินในผู้ป่วยโรคเรื้อรัง พบว่า ICC ของคะแนนรวมอยู่ที่ 0.89 แสดงให้เห็นว่าแบบประเมินมีความเชื่อมั่นดีถึงดีมาก [15] ประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 แบบประเมินคุณภาพชีวิตด้านสุขภาพด้วยมิติทางสุขภาพ 5 ด้าน ได้แก่ การเคลื่อนไหว การดูแลตนเอง กิจกรรมที่ทำเป็นประจำ อาการเจ็บป่วย/อาการไม่สบายตัว และความวิตกกังวล/ความซึมเศร้า คำตอบเป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating scale) 5 ระดับ คะแนนคุณภาพชีวิตผู้ป่วยมีค่าระหว่าง 5-25 คะแนน แปลผลคะแนน ออกเป็น 3 ระดับ คือ คุณภาพชีวิตสูง (5 - 11 คะแนน) คุณภาพชีวิตปานกลาง (12 - 18 คะแนน) และคุณภาพชีวิตระดับต่ำ (19 - 25 คะแนน) คะแนนคุณภาพชีวิตด้านสุขภาพ EQ-5D-5L นำมาคำนวณคะแนนอรรถประโยชน์ โดยค่าอรรถประโยชน์ มีค่าตั้งแต่ 0 - 1 ซึ่ง 0 หมายถึง เสียชีวิต และ 1 หมายถึง สุขภาพแข็งแรงสมบูรณ์ที่สุด แปรผลตามตารางค่า สัมประสิทธิ์สำหรับคำนวณคะแนนอรรถประโยชน์ของแบบสอบถาม EQ-5D-5L ฉบับภาษาไทย [14] ส่วนที่ 2 แบบวัดสุขภาพทางตรงด้วยสเกลที่มีค่าตั้งแต่ 0 - 100 โดย 0 หมายถึง สุขภาพแย่ที่สุด และ 100 หมายถึงสุขภาพที่ดีที่สุด

2.2 แบบประเมินความพึงพอใจของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองและผู้ดูแล ผู้วิจัยได้จัดทำขึ้นโดย นำเสนอผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 ท่าน เพื่อตรวจสอบความเที่ยงตรงด้านเนื้อหาแล้วนำผลการประเมินมาคำนวณหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of item-objective congruence; IOC) ผลการประเมิน IOC พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.67 - 1.00 โดยแบบสอบถามมีจำนวน 10 ข้อ คำตอบเป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating scale) 5 ระดับ ได้แก่ พึงพอใจมากที่สุด (5 คะแนน) พึงพอใจมาก (4 คะแนน) พึงพอใจปานกลาง (3 คะแนน) พึงพอใจน้อย (2 คะแนน) พึงพอใจน้อยที่สุด (1 คะแนน) ไม่พึงพอใจ (0 คะแนน) คะแนนความพึงพอใจของครอบครัวผู้ป่วยมีค่าตั้งแต่ 0 - 50 คะแนน แปลผลคะแนนด้วยค่าพิสัย 3 ระดับ คือ ความพึงพอใจต่ำ (0 - 17 คะแนน) ความพึงพอใจปานกลาง (18 - 34 คะแนน) ความพึงพอใจสูง (35 - 50 คะแนน)

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา โดยพรรณนาความถี่ ร้อยละ ในตัวแปรเชิงกลุ่ม(Categorical variable) และค่าเฉลี่ย (Mean) ± ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) ในตัวแปรต่อเนื่อง(Continuous variable) และใช้สถิติเชิงอนุมาน เพื่อเปรียบเทียบคะแนนความสามารถในการทำกิจวัตรประจำวันตามดัชนีบาร์เธลเอดีแอล (Barthel ADL Index; BI) คุณภาพชีวิต และความพึงพอใจก่อนและหลังการทดลอง โดยสถิติแบบ paired t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยโปรแกรม SPSS® Version 26.0

การพิทักษ์สิทธิกลุ่มตัวอย่าง

ผู้วิจัยได้เสนอโครงการวิจัยเพื่อขอพิจารณาจริยธรรมการวิจัยจากคณะอนุกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร หนังสือรับรองเลขที่ HEC-04-68-013 ทั้งนี้ ผู้วิจัยจะไม่นำความลับและข้อมูลต่าง ๆ ของผู้ถูกวิจัยไปเปิดเผยเป็นการเฉพาะตัว แต่จะนำเสนอข้อมูลที่ได้ทั้งหมดในรูปของผลวิจัยโดยภาพรวม

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างที่เป็นผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองที่เข้ารับการรักษา ณ โรงพยาบาลวานรนิวาส โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ข้อมูลพื้นฐานของผู้ป่วยและผู้ดูแล โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากเวชระเบียนทางกายภาพบำบัดของผู้ป่วยใน แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลผู้ป่วย และข้อมูลผู้ดูแล
2. การประเมินความสามารถในการดำเนินชีวิตประจำวัน ประเมินด้วยแบบประเมิน Barthel Index (BI) โดยทำการบันทึกข้อมูลก่อนและหลังการได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพ
3. การประเมินคุณภาพชีวิตด้านสุขภาพ ใช้แบบสอบถาม EQ-5D-5L ประเมินคุณภาพชีวิตด้านสุขภาพ ครอบคลุม 5 มิติ โดยเก็บข้อมูลก่อนและหลังการได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพ
4. การประเมินความพึงพอใจของผู้ป่วยและครอบครัว ใช้แบบสอบถามความพึงพอใจจำนวน 10 ข้อ โดยเก็บรวบรวมข้อมูลภายหลังการได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ข้อมูลพื้นฐานของอาสาสมัคร

งานวิจัยนี้มีจำนวนอาสาสมัคร 50 คน เป็นผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมอง พบว่า เพศชาย ร้อยละ 46 เพศหญิง ร้อยละ 54 กลุ่มอายุ 18 - 59 ปี ร้อยละ 38 กลุ่มอายุ 60 ปีขึ้นไป ร้อยละ 62 สถานภาพโสด ร้อยละ 10 สมรส ร้อยละ 66 และหม้าย/หย่าร้าง ร้อยละ 24 การอยู่อาศัยพบว่าอยู่คนเดียวร้อยละ 2 อยู่กับคู่สมรส ร้อยละ 66 และอยู่กับบุตรหลาน ร้อยละ 32 การศึกษาระดับประถมศึกษา ร้อยละ 74 ระดับมัธยมศึกษา ร้อยละ 18 ระดับปริญญาตรีหรือสูงกว่า ร้อยละ 8 พบว่าอาสาสมัครที่ไม่ได้ประกอบอาชีพ คิดเป็นร้อยละ 64 อาชีพเกษตรกร ร้อยละ 16 ข้าราชการ/พนักงานรัฐ ร้อยละ 4 ค้าขาย/ธุรกิจส่วนตัว ร้อยละ 4 และรับจ้างทั่วไป ร้อยละ 12 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลพื้นฐานของอาสาสมัครที่เข้าร่วมโครงการ

ข้อมูลอาสมัคร (n=50)	จำนวน	ร้อยละ
1. เพศ		
ชาย	23	46.00
หญิง	27	54.00
2. อายุ		
กลุ่มอายุ 18-59 ปี	19	38.00
กลุ่มอายุ 60 ปีขึ้นไป	31	62.00

ข้อมูลอาสมัคร (n=50)	จำนวน	ร้อยละ
3. สถานภาพ		
โสด	5	10.00
สมรส	33	66.00
หม้าย/หย่าร้าง	12	24.00
4. การอยู่อาศัย		
อยู่คนเดียว	1	2.00
อยู่กับคู่สมรส	33	66.00
อยู่กับบุตรหลาน	16	32.00
5. การศึกษา		
ระดับประถมศึกษา	37	74.00
ระดับมัธยมศึกษา	9	18.00
ระดับปริญญาตรีหรือสูงกว่า	4	8.00
6. อาชีพ		
ไม่ได้ประกอบอาชีพ	32	64.00
เกษตรกร	8	16.00
ข้าราชการ/พนักงานรัฐ	2	4.00
ค้าขาย/ธุรกิจส่วนตัว	2	4.00
รับจ้างทั่วไป	6	12.00

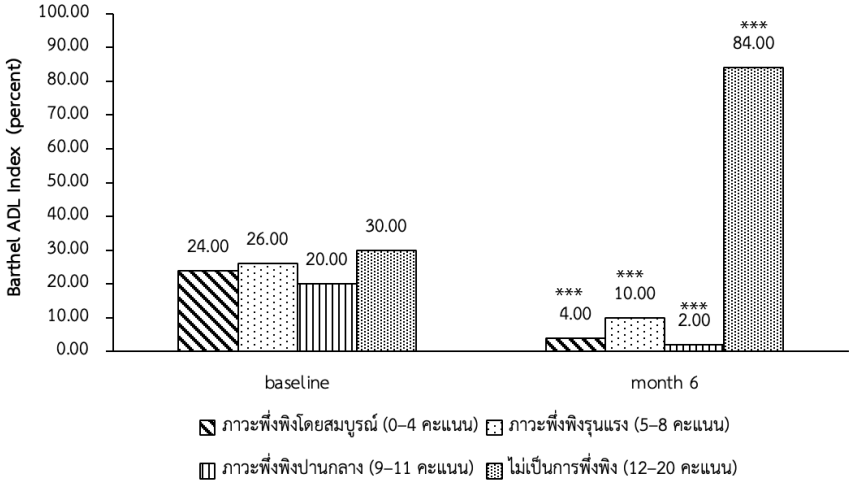
2. การเปรียบเทียบผลการทดสอบความสามารถในการปฏิบัติกิจวัตรประจำวันตามดัชนีบาร์เธลเอดีแอล (Barthel ADL Index; BI) คุณภาพชีวิตด้านสุขภาพด้วยมิติทางสุขภาพ 5 ด้าน (EQ-5D-5L) ก่อนและหลังการได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพ ของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง พบว่า

ก่อนเริ่มการได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพ พบว่า มีภาวะพึ่งพิงโดยสมบูรณ์ (0 - 4 คะแนน) จำนวน 12 คน คิดเป็นร้อยละ 24 ภาวะพึ่งพิงรุนแรง (5 - 8 คะแนน) จำนวน 13 คน คิดเป็นร้อยละ 26 ภาวะพึ่งพิงปานกลาง (9 - 11 คะแนน) จำนวน 10 คน คิดเป็นร้อยละ 20 และไม่เป็นการพึ่งพิง (12 - 20 คะแนน) จำนวน 15 คน คิดเป็นร้อยละ 30 หลังการได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพแล้ว พบว่า อาสาสมัครมี ค่า BI เพิ่มขึ้นโดยมีภาวะไม่เป็นการพึ่งพิง จำนวน 42 คน คิดเป็นร้อยละ 84 ภาวะพึ่งพิงรุนแรง จำนวน 5 คน คิดเป็นร้อยละ 10 ภาวะพึ่งพิงโดยสมบูรณ์ จำนวน 2 คน คิดเป็นร้อยละ 4 และภาวะพึ่งพิงปานกลาง จำนวน 1 คน คิดเป็นร้อยละ 2 ตามลำดับ โดยมีระดับ BI ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเพื่อเทียบกับก่อนได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพ ($p<0.001$) ดังแสดงในภาพที่ 2

การเปรียบเทียบผลการทดสอบความสามารถในการปฏิบัติกิจวัตรประจำวัน (BI) พบว่าก่อนเริ่มการได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพ มีค่า BI เท่ากับ 8.02 ± 5.06 คะแนน และหลังจากได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพเป็นเวลา 6 เดือนแล้ว มีค่า BI เท่ากับ 15.74 ± 4.60 คะแนน จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองมี ค่า BI เพิ่มขึ้น มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.001$) เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพ โดยมีค่า mean difference เท่ากับ -7.72 (95%CI = -9.19 ถึง -6.25; t =-10.54) ดังแสดงในตารางที่ 2

ค่าเฉลี่ยคะแนนคุณภาพชีวิตด้านสุขภาพด้วยมิติทางสุขภาพ 5 ด้าน EQ-5D-5L ก่อนและหลังได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพ พบว่า ก่อนได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพมีค่าคะแนนอรรถประโยชน์ เท่ากับ 0.20±0.29 คะแนน หลังได้รับ

บริการฯ เท่ากับ 0.63±0.29 คะแนน พบว่าค่าเฉลี่ยคะแนนอรรถประโยชน์หลังได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพเพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.001) โดยมีค่า mean difference เท่ากับ -0.43 (95%CI = -0.51 ถึง -0.35; t = -11.09) ดังแสดงในตารางที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงระดับความสามารถในการดำเนินชีวิตประจำวัน (Barthel ADL Index; BI) (ร้อยละ)
หมายเหตุ: ***p-value<0.001 เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพ

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบความสามารถในการปฏิบัติกิจวัตรประจำวัน (Barthel ADL Index) และคุณภาพชีวิตด้านสุขภาพด้วยมิติทางสุขภาพ 5 ด้าน EQ-5D-5L ของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองก่อนและหลังได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพ (n=50)

รายการประเมิน	ก่อนการทดลอง mean±SD	หลังการทดลอง mean±SD	mean difference (95%CI)	t	p-value
ความสามารถในการปฏิบัติกิจวัตรประจำวัน (Barthel ADL Index)	8.02±5.06	15.74±4.60***	-7.72 (-9.19 – -6.25)	-10.54	<.001
คุณภาพชีวิตด้านสุขภาพ คะแนนอรรถประโยชน์ (Utility จาก EQ-5D-5L)	0.20±0.29	0.63±0.29***	-0.43 (-0.51 – -0.35)	-11.09	<.001

หมายเหตุ: ***p-value<0.001 เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพ

3. ความพึงพอใจของผู้ดูแลผู้ป่วยและผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองในการเข้ารับรูปแบบการบริการฟื้นฟูสมรรถภาพโรงพยาบาลวานรนิวาส อำเภอวานรนิวาส จังหวัดสกลนคร หลังการดำเนินการจัดโปรแกรมฟื้นฟูสมรรถภาพในผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมอง พบว่าผู้ดูแลผู้ป่วยมีความพึงพอใจ คะแนนเฉลี่ย 47.14±2.96 คะแนน อยู่ในระดับพอใจมาก และผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองมีความพึงพอใจในการได้รับโปรแกรมฟื้นฟูสมรรถภาพสูง เท่ากับ 47.51±2.66 คะแนน อยู่ในระดับพอใจมาก ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงคะแนนความพึงพอใจของผู้ดูแลผู้ป่วยและผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง หลังได้รับโปรแกรมฟื้นฟูสมรรถภาพ

คะแนนความพึงพอใจ (50 คะแนน)	Mean ± SD	ระดับ
ความพึงพอใจของผู้ดูแลผู้ป่วย (n=50)	47.14±2.96	มาก
ความพึงพอใจของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง (n=50)	47.51±2.66	มาก

สรุปผลและอภิปรายผล

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารูปแบบการฟื้นฟูสมรรถภาพต่อเนื่องในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง โรงพยาบาลวานรนิวาส จังหวัดสกลนคร ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า รูปแบบการฟื้นฟูสมรรถภาพต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มความสามารถในการดำเนินชีวิตประจำวันของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยคะแนนความสามารถในการปฏิบัติกิจวัตรประจำวัน (Barthel ADL Index) เฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 8.02±5.06 คะแนน ก่อนเข้าร่วมโปรแกรม เป็น 15.74±4.60 คะแนน หลังเข้าร่วมโปรแกรม 6 เดือน ($p<0.001$) สะท้อนถึงการลดระดับภาวะพึ่งพิงและการเพิ่มศักยภาพในการช่วยเหลือตนเอง นอกจากนี้ ค่าอรรถประโยชน์ด้านคุณภาพชีวิต (EQ-5D-5L) เพิ่มขึ้นจาก 0.20±0.29 เป็น 0.63±0.29 ($p<0.001$) แสดงถึงการฟื้นตัวทั้งด้านร่างกายและมิติสุขภาวะโดยรวม ซึ่งสอดคล้องกับหลักฐานที่ระบุว่าความสามารถเชิงหน้าที่ (functional ability) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณภาพชีวิตในผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง

ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของสุรีรักษ์ และคณะ [9] ที่รายงานว่าการฟื้นฟูอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ระยะต้นช่วยส่งเสริมการฟื้นตัวทางกายภาพและจิตใจได้ดีกว่าการดูแลแบบไม่ต่อเนื่อง รวมถึงสอดคล้องกับหลักฐานจากต่างประเทศ [16] ที่สนับสนุนแนวคิด continuum of care ว่าสามารถลดภาวะแทรกซ้อนและเพิ่มโอกาสกลับไปช่วยเหลือตนเองในระยะยาวได้ นอกจากนี้ ความพึงพอใจของผู้ป่วย (47.51±2.66) และผู้ดูแล (47.14±2.96) อยู่ในระดับสูง สะท้อนถึงความเหมาะสมของรูปแบบบริการ และความสอดคล้องกับความต้องการของครอบครัว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [17] ที่ชี้ว่าการมีส่วนร่วมของผู้ดูแลเป็นปัจจัยสำคัญต่อความต่อเนื่องและประสิทธิผลของการฟื้นฟู

กลไกที่อาจอธิบายผลลัพธ์ดังกล่าวคือ การจัดโปรแกรมฟื้นฟูที่เน้นความเข้มข้น ความสม่ำเสมอ และความต่อเนื่องในช่วง 3 - 6 เดือนแรกหลังเกิดโรค ซึ่งเป็นช่วงสำคัญของกระบวนการ neuroplasticity การฝึกซ้ำแบบมีเป้าหมาย (task-specific repetitive training) และการส่งเสริม motor relearning ช่วยกระตุ้นการปรับโครงสร้างและการทำงานของระบบประสาท ส่งผลให้เกิดการฟื้นตัวเชิงหน้าที่อย่างเป็นรูปธรรม [6, 7, 18] รูปแบบบริการที่เชื่อมโยงการดูแลจากโรงพยาบาลสู่ชุมชนและที่บ้านยังช่วยลดช่องว่างหลังจำหน่าย เพิ่มความสม่ำเสมอของการฝึก และลดภาวะแทรกซ้อน อันเป็นปัจจัยที่มีรายงานว่าสัมพันธ์กับผลลัพธ์ระยะยาวที่ดีขึ้น [16, 17] จุดเด่นของโปรแกรมนี้จึงอยู่ที่การบูรณาการทีมสหวิชาชีพ การมีส่วนร่วมของครอบครัว และการดูแลต่อเนื่องแบบองค์รวม ซึ่งแตกต่างจากรูปแบบเดิม ที่การบริการการฟื้นฟูสมรรถภาพของโรงพยาบาล เมื่อผู้ป่วยกลุ่มโรคหลอดเลือดสมอง มารับการรักษาแบบผู้ป่วยในของโรงพยาบาล นักกายภาพบำบัดจะให้บริการการฟื้นฟูสมรรถภาพได้ หลังจากแพทย์ส่งปรึกษาเท่านั้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดทำให้ผู้ป่วยบางรายอาจไม่ได้รับบริการฟื้นฟูสมรรถภาพอย่างทันท่วงที

อย่างไรก็ตาม แม้ผลลัพธ์โดยรวมจะดีขึ้น แต่ยังพบว่าผู้ป่วยบางรายคงมีภาวะพึ่งพิงรุนแรง ร้อยละ 10 ภาวะพึ่งพิงโดยสมบูรณ์ ร้อยละ 4 และภาวะพึ่งพิงระดับปานกลาง ร้อยละ 2 หลังสิ้นสุดโปรแกรม ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับปัจจัยด้านอายุ ความรุนแรงของโรค โรคร่วม และระดับการสนับสนุนจากครอบครัว ดังที่มีรายงานในงานวิจัยก่อนหน้า [19] สะท้อนให้เห็นว่าผลลัพธ์ของการฟื้นฟูมีความซับซ้อนและขึ้นกับบริบทเฉพาะราย

ข้อจำกัดของการศึกษานี้คือเป็นการวิจัยกึ่งทดลองแบบกลุ่มเดียว (quasi-experimental one-group design) ไม่มีการเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม จึงอาจได้รับอิทธิพลจากปัจจัยแทรกซ้อน อีกทั้งกลุ่มตัวอย่างมีจำนวนจำกัด (50 ราย) และ

เป็นผู้ป่วยในพื้นที่อำเภอวานรนิวาส จังหวัดสกลนคร ซึ่งอาจจำกัดการอ้างอิงทั่วไป ควรมีการศึกษาในรูปแบบ randomized controlled trial และขยายพื้นที่ศึกษาในอนาคตเพื่อยืนยันประสิทธิผลของรูปแบบบริการดังกล่าว

สรุปได้ว่ารูปแบบการฟื้นฟูสมรรถภาพต่อเนื่องที่โรงพยาบาลวานรนิวาสมีประสิทธิผลในการเพิ่มความสามารถในการดำเนินชีวิตประจำวัน ยกระดับคุณภาพชีวิต และสร้างความพึงพอใจแก่ผู้ป่วยและผู้ดูแล จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสำหรับการพัฒนาระบบบริการฟื้นฟูสมรรถภาพในระดับอำเภอและจังหวัดต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Begbutayeva SB, Eshpulatov SS, Musurmonova GO, Eshankulova ZZ, Kasimov AA, Mamurova MM. Ischemic stroke symptoms and treatment. Western European Journal of Medicine and Medical Science. 2024; 2(7): 67-72. https://westerneuropeanstudies.com/index.php/3/article/view/1332
2. Feigin VL, Brainin M, Norrving B, Martins S, Sacco RL, Hacke W, Fisher M, Pandian J, Lindsay P. World Stroke Organization (WSO): global stroke fact sheet 2022. International journal of stroke. 2022; 17(1): 18-29. https://www.semanticscholar.org/paper/World-Stroke-Organization-(WSO)%3A-Global-Stroke-Fact-Feigin-Brainin/34226ad9380ea975779fefc11113235d680b7013
3. Institute for Health Metrics and Evaluation [Internet]. Stroke deaths could jump 50% by 2050, study warns. Axios. [updated 2023 Jun 23; cited 2024 Oct 10]; Available from: https://www.axios.com/2023/10/10/stroke-deaths-could-jump-50-by-2050-study-warns
4. กองโรคไม่ติดต่อ กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข. “วันหลอดเลือดสมองโลก พ.ศ. 2567” [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [เข้าถึงเมื่อ 3 ตุลาคม 2568]. เข้าถึงได้จาก: https://ddc.moph.go.th/brc/news.php?news=47206&deptcode=brc
5. ยงชัย นิละนนท์. “อัมพฤกษ์อัมพาตโรคเรื้อรังที่ต้องดูแล”. [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [เข้าถึงเมื่อ 6 กุมภาพันธ์ 2568]. เข้าถึงได้จาก: https://si.mahidol.ac.th/th/healthdetail.asp?aid=707
6. Butsing N, Voss JG, Keandoungchun J, Thongniran N, Griffin MT. Changes of health-related quality of life within 6 months after stroke by clinical and sociodemographic factors. Scientific Reports. 2025 Jan 2; 15(1): 416. https://www.nature.com/articles/s41598-024-84454-5
7. Nam JS, Heo SJ, Kim YW, Lee SC, Yang SN, Yoon SY. Association between frequency of rehabilitation therapy and long-term mortality after stroke: a nationwide cohort study. Stroke. 2024; 55(9): 2274-2283. https://www.ahajournals.org/doi/10.1161/STROKEAHA.123.046008
8. Ngamjarus C. Sample size calculation for health science research. 1st ed. Khon Kaen: Khon Kaen University Printing House; 2021.
9. สุรีรักษ์ มั่นคง, พิสมัย นพรัตน์, ณาตยา ปัญญาคม. ผลของโปรแกรมฟื้นฟูสมรรถภาพระยะกลางผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองในโรงพยาบาลท่าปลา. วารสารสิ่งแวดล้อมศึกษาการแพทย์และสุขภาพ. 2022;7(1):96-107. https://so06.tci-thaijo.org/index.php/hej/article/view/255075
10. Chow SC, Shao J, Wang H, Lokhnygina Y. Sample size calculations in clinical research. 3rd ed. Boca Raton (FL): Chapman and Hall/CRC; 2017. https://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/15304/1/9103.pdf

11. Massakulpan P, Saringcarinkul T, Riewthong K, Thimayom P. Clinical practice guidelines for stroke rehabilitation. 3rd ed. Bangkok: Thana press. 2016.
12. Fi M. Functional evaluation: the Barthel index. Maryland state medical journal. 1965; 14: 61-65.
13. Eriyani T, Shalahuddin I, Pebrianti S, Maulana I. Instruments for Assessing Patient Independence in Self-Care: A Scoping Review. Journal of Multidisciplinary Healthcare. 2025; 2387-2399. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.2147/JMDH.S510034
14. Pattanaphesaj J. Health-related quality of life measure (EQ-5D-5L): measurement property testing and its preference-based score in Thai population (Doctoral dissertation, Mahidol University). Bangkok: Mahidol University. 2014. https://repository.li.mahidol.ac.th/handle/123456789/89482
15. Sonsa-ardjit N, Sakthong P. Reliability and validity of the Thai version of EQ-5D-5L questionnaire on patients with chronic disease. Chulalongkorn Medical Journal. 2015; 59(5): 489-501. https://he05.tci-thaijo.org/index.php/CMJ/article/view/603
16. Langhorne P, Bernhardt J, Kwakkel G. Stroke rehabilitation. Lancet. 2011; 377(9778): 1693-1702. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21571152/
17. Gustavsson M, Guidetti S, Eriksson G, von Koch L, Ytterberg C. Factors affecting outcome in participation one year after stroke: a secondary analysis of a randomized controlled trial. Journal of rehabilitation medicine. 2019; 51(3): 160-166. https://doi.org/10.2340/16501977-2523
18. Zotey V, Andhale A, Shegekar T, Juganavar A. Adaptive neuroplasticity in brain injury recovery: strategies and insights. Cureus. 2023; 15(9): e. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37885532/
19. Teasell R, Foley N, Hussein N, Speechley M. The elements of stroke rehabilitation. In: Evidence-based review of stroke rehabilitation. 17th ed. London (ON): Sockit Solutions. 2016.

บทความวิจัย (Research Article)

นวัตกรรมระบบบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษาด้วยเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันแบบไร้เซิร์ฟเวอร์

An Innovative System for Student Project Management and Retrieval Using Serverless Web Application Technology

ศุภชัย ใบปอด[1*] จักรพันธ์ ศรีวงษา[1] ทินกร คุณาสิทธิ์[1] เอกรินทร์ ศรีลาพัฒน์[1]
พวงผกา คุณาสิทธิ์[1] และ สิริวิวัฒน์ ละตา[2]
Supachai Baipod[1*], Jackaphan Sriwongsa[1], Tinnakorn Kunasit[1], Ekkharin Srilaphat[1]
Puangpaka Kunasit[1] and Siriwiwat Lata[2]
[1]สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
[1]Program in Computer Science, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Mahasarakham University
[2]ภาควิชานิเทศศาสตร์ คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
[2]Department of Communication Arts, Faculty of Informatics, Mahasarakham University
*Corresponding author; email: supachai@rmu.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
18 กุมภาพันธ์ 2569	26 มีนาคม 2569	4 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

กลุ่มโปรแกรมวิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ประสบปัญหาการจัดเก็บและสืบค้นโครงงานนักศึกษาในรูปแบบเอกสารที่ไม่มีระบบฐานข้อมูลกลาง ส่งผลให้ข้อมูลกระจัดกระจายและเสี่ยงต่อการสูญหาย การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาระบบบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษาด้วยเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ และ 2) ประเมินประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น การดำเนินการวิจัยอาศัยกระบวนการวงจรการพัฒนาระบบ (SDLC) โดยประยุกต์ใช้ Google Apps Script ร่วมกับ Google Sheets ในการพัฒนาระบบฐานข้อมูลและส่วนประมวลผลแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ (Serverless Architecture) และออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งานด้วย Tailwind CSS ให้รองรับการแสดงผลบนอุปกรณ์ที่หลากหลาย กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพ คือ ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ จำนวน 5 ท่าน ซึ่งได้มาโดยการเลือกแบบเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ระบบบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษาฯ และแบบประเมินประสิทธิภาพระบบ (Black-Box Testing) สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ผลการวิจัยพบว่า 1) ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้บนเว็บเบราว์เซอร์อย่างสมบูรณ์ ประกอบด้วยฟังก์ชันสำคัญ ได้แก่ ระบบสืบค้นโครงงาน ระบบแสดงรายละเอียดและดาวน์โหลดเอกสาร และระบบบริหารจัดการข้อมูลสำหรับผู้ดูแลระบบ ช่วยลดความซับซ้อนและประหยัดงบประมาณในการดูแลรักษาเซิร์ฟเวอร์ 2) ผลการประเมินประสิทธิภาพโดยผู้เชี่ยวชาญพบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในภาพรวมอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X}$ = 4.57, S.D. = 0.52) โดยด้านความใช้งานง่าย (Usability) มีคะแนนสูงสุด ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแก้ปัญหาการจัดการโครงงานเดิมได้อย่างเป็นรูปธรรม ลดภาระค่าใช้จ่ายด้านเซิร์ฟเวอร์ และเป็นต้นแบบสำหรับสถาบันการศึกษาอื่นที่มีงบประมาณจำกัดในการพัฒนาระบบสารสนเทศต้นทุนต่ำต่อไป

คำสำคัญ: เว็บแอปพลิเคชันแบบไร้เซิร์ฟเวอร์, กูเกิลแอปส์สคริปต์, กูเกิลชีต, การบริหารจัดการโครงงาน

Abstract

The Computer Science Program, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Mahasarakham University, has encountered challenges in managing and retrieving student projects due to the absence of a centralized database system, resulting in fragmented data and risks of information loss. This research aimed to: (1) develop a student project management and retrieval system using serverless web application technology, and (2) evaluate the efficiency of the developed system. The study employed the System Development Life Cycle (SDLC) as the research methodology. The system was developed using Google Apps Script in conjunction with Google Sheets to implement a serverless database and processing architecture. The user interface was designed using Tailwind CSS to ensure responsiveness across multiple devices. The sample group consisted of five experts in computer engineering and information technology, selected through purposive sampling. The research instruments included the developed system and a system efficiency evaluation form based on Black-Box Testing. Data were analyzed using mean ($\bar{x}$) and standard deviation (S.D.). The results revealed that: (1) the developed system functioned effectively on web browsers, comprising key features such as project search, document display and download, and administrative data management. The system reduced operational complexity and eliminated the need for server maintenance costs. (2) The overall system efficiency was rated at a very good level ($\bar{x}$= 4.57, S.D. = 0.52), with usability receiving the highest score. The system effectively addressed existing project management issues, reduced infrastructure costs, and can serve as a prototype for low-cost information systems in educational institutions with limited budgets.

Keywords: Serverless Web Application, Google Apps Script, Google Sheets, Project Management

บทนำ

ในยุคปัจจุบัน เทคโนโลยีดิจิทัลได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพลิกโฉมระบบการศึกษาและการบริหารจัดการสารสนเทศในสถาบันอุดมศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดการความรู้ (Knowledge Management) ที่มุ่งเน้นการจัดเก็บและเผยแพร่องค์ความรู้ทางวิชาการให้เกิดประโยชน์สูงสุด หนึ่งในผลผลิตทางวิชาการที่มีคุณค่าและสะท้อนถึงศักยภาพของบัณฑิต คือ โครงงานนักศึกษา (Student Projects) หรือปริญญานิพนธ์ ซึ่งเป็นทรัพย์สินทางปัญญาที่สำคัญ จริยา ทิพย์หทัย [1] ได้ระบุว่าการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการจัดการความรู้นั้นช่วยให้บุคลากรและนักศึกษาสามารถเข้าถึงแหล่งข้อมูลได้สะดวกรวดเร็วและเป็นระบบ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ทัศนีย์ ทรัพย์ประมวล [2] และ ภานรินทร์ อิ่นแก้ว และคณะ [3] ที่พบว่าการพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการสืบค้นโครงงานฉบับเต็ม ช่วยแก้ปัญหาความยุ่งยากในการจัดเก็บและการค้นคืนข้อมูลที่มีปริมาณมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ผู้เรียนสามารถนำองค์ความรู้เดิมมาต่อยอดและสร้างสรรค์นวัตกรรมใหม่ได้ดียิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตาม ในบริบทของกลุ่มโปรแกรมวิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีการจัดการเรียนการสอนเน้นการปฏิบัติและมีผลงานโครงงานจำนวนมากในแต่ละปีการศึกษา ยังประสบปัญหาสำคัญด้านการบริหารจัดการโครงงาน กล่าวคือ ในระบบเดิมนั้นได้เคยมีการพัฒนาระบบสารสนเทศสำหรับจัดเก็บและสืบค้นโครงงานที่ทำงานบนเซิร์ฟเวอร์ส่วนกลางของทางมหาวิทยาลัย อย่างไรก็ตามเมื่อเซิร์ฟเวอร์ดังกล่าวเกิดความขัดข้อง ส่งผลให้ข้อมูลโครงงานที่สะสมไว้สูญหายและไม่สามารถกู้คืนได้ ทำให้สาขาวิชาต้องหัน

กลับมาพึ่งพาการจัดเก็บในรูปแบบเอกสารกระดาษที่วางในชั้นของสาขาวิชา และไฟล์ดิจิทัลที่กระจายอยู่ในสื่อบันทึกข้อมูลส่วนตัว เช่น แฟลชไดรว์ หรือโฟลเดอร์แชร์ไดรว์ของสาขา โดยไม่มีการเชื่อมโยงหรือจัดระบบร่วมกัน เมื่อนักศึกษาหรืออาจารย์ต้องการสืบค้นโครงงานย้อนหลัง จำเป็นต้องติดต่อสอบถามจากบุคคลที่เกี่ยวข้องโดยตรง ทำให้เกิดความล่าช้า ข้อมูลกระจัดกระจาย และมีความเสี่ยงต่อการสูญหายซ้ำหากอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลชำรุดเสียหายหรือมีการเปลี่ยนแปลงบุคลากร ปัญหาดังกล่าวสอดคล้องกับข้อค้นพบของ ศุภชัย ทองสุข และคณะ [4] ที่ระบุว่าการขาดระบบบริหารจัดการโครงงานที่มีประสิทธิภาพทำให้เกิดความซ้ำซ้อนในการปฏิบัติงาน และเป็นอุปสรรคต่ออาจารย์ที่ปรึกษาในการติดตามงานของนักศึกษา นอกจากนี้ ชิรพงษ์ ญานุชิตร และคณะ [5] ยังชี้ให้เห็นว่าระบบจัดเก็บและสืบค้นในปัจจุบันจำเป็นต้องคำนึงถึงประสบการณ์ผู้ใช้งาน (User Experience) และความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลเป็นสำคัญ

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวภายใต้ข้อจำกัดด้านงบประมาณและทรัพยากรบุคคลในการดูแลรักษาเครื่องแม่ข่าย (Server) ของหน่วยงาน แนวคิดสถาปัตยกรรมแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ (Serverless Architecture) และการประมวลผลแบบคลาวด์ (Cloud Computing) จึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความสนใจและมีความเหมาะสมอย่างยิ่ง โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้เครื่องมือจาก Google Workspace ได้แก่ Google Apps Script ร่วมกับ Google Sheets ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีการนำเทคโนโลยีนี้มาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ดังเช่นงานวิจัยของ สุพล บ่อคุ้ม และคณะ [6] ที่พัฒนาระบบติดตามกระแสงานบริการออนไลน์และพบว่าช่วยลดขั้นตอนและเวลาในการปฏิบัติงานได้จริง สอดคล้องกับ คนึงศรี นิลดี [7] และ เปรมฤดี ปลื้มเชื้อ [8] ที่นำ Google Apps Script มาใช้ในการติดตามทุนวิจัยและงานจัดซื้อจัดจ้าง ซึ่งช่วยให้ผู้บริหารติดตามสถานะงานได้แบบเรียลไทม์ นอกจากนี้ ธนรรณพร แสงสว่าง และคณะ [9] และ รัชดาภรณ์ มณีตัน และคณะ [10] ได้ยืนยันถึงประสิทธิภาพของ Google Sheets ในฐานะฐานข้อมูลบนคลาวด์ว่ามีความเสถียร ยืดหยุ่น และรองรับการจัดการข้อมูลองค์กรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แม้จะมีการศึกษาการใช้เทคโนโลยีดังกล่าวในงานสารบรรณ งานงบประมาณ หรือระบบฐานข้อมูลทั่วไป แต่การนำมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาระบบบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษา ที่บูรณาการร่วมกับเฟรมเวิร์กการออกแบบสมัยใหม่อย่าง Tailwind CSS เพื่อให้ได้ส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface) ที่สวยงาม ทันสมัย และรองรับการใช้งานผ่านอุปกรณ์เคลื่อนที่ (Responsive Design) ยังมีอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งยังไม่พบงานวิจัยที่บูรณาการสถาปัตยกรรมแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ (Serverless Architecture) บนฐาน Google Workspace เข้ากับ workflow การจัดการโครงงานนักศึกษาแบบครบวงจร ตั้งแต่การอัปโหลดเอกสาร การสืบค้นแบบ Full-text จนถึงการดาวน์โหลดเอกสารฉบับเต็ม ภายใต้ต้นทุนการพัฒนาและดูแลรักษาระบบที่ต่ำ ซึ่งเหมาะสมกับบริบทของสาขาวิชาที่มีงบประมาณจำกัด ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษาด้วยเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ สำหรับกลุ่มโปรแกรมวิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม โดยมุ่งหวังให้ระบบนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเก็บ สืบค้น และเผยแพร่องค์ความรู้จากโครงงานนักศึกษา อำนวยความสะดวกให้กับอาจารย์ นักศึกษา และผู้ใช้งานทั่วไป รวมทั้งเป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบสารสนเทศต้นทุนต่ำที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับสถาบันการศึกษาต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษาด้วยเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ สำหรับกลุ่มโปรแกรมวิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้น

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่อง "การพัฒนาระบบบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษาด้วยเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันแบบไร้เซิร์ฟเวอร์" ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามระเบียบวิธีวิจัยและพัฒนา (Research and Development) โดยประยุกต์ใช้วงจรการพัฒนาระบบ (System Development Life Cycle: SDLC) ซึ่งเป็นมาตรฐานกระบวนการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [2], [5], [7] โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน 5 ขั้นตอน ดังนี้

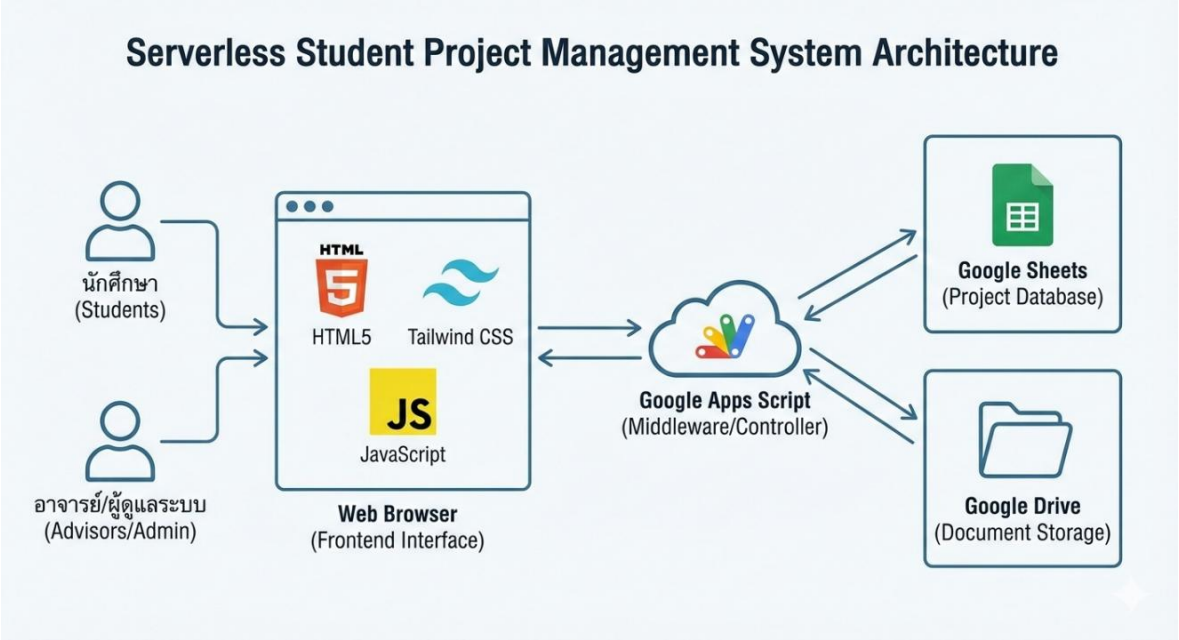
1. การศึกษาและวิเคราะห์ความต้องการ (Requirement Analysis) ผู้วิจัยได้ศึกษาปัญหาและรวบรวมความต้องการจากกระบวนการบริหารจัดการโครงงานเดิม พบปัญหาด้านความล่าช้าในการสืบค้นและการสูญหายของข้อมูล [1] จึงได้กำหนดความต้องการของระบบใหม่ให้เป็นเว็บแอปพลิเคชันที่ทำงานบนคลาวด์ (Cloud-based) โดยไม่ต้องพึ่งพาเซิร์ฟเวอร์กายภาพ (Serverless) และต้องรองรับการแสดงผลบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ (Responsive Design) โดยในการออกแบบและพัฒนาระบบนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1.1 แนวคิดสถาปัตยกรรมแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ (Serverless Architecture) สถาปัตยกรรมแบบไร้เซิร์ฟเวอร์เป็นรูปแบบการพัฒนาระบบบนโครงสร้างพื้นฐานคลาวด์ (Cloud Computing) ที่ผู้พัฒนาไม่จำเป็นต้องบริหารจัดการเซิร์ฟเวอร์กายภาพด้วยตนเอง โดยการประมวลผลและจัดเก็บข้อมูลดำเนินการผ่านบริการของผู้ให้บริการคลาวด์ทั้งหมด ส่งผลให้ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายและภาระการดูแลรักษาระบบได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับหน่วยงานที่มีงบประมาณจำกัด สอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาระบบสารสนเทศต้นทุนต่ำที่ สุพล บ่อคุ้ม และคณะ [6] คนึงศรี นิลดี [7] และ เปรมฤดี ปลื้มเชื้อ [8] ได้นำไปประยุกต์ใช้จริงและพบว่าช่วยลดขั้นตอนและภาระการดูแลรักษาระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ธนรรณพร แสงสว่าง และคณะ [9] และ รัชดาภรณ์ มณีตัน และคณะ [10] ยังได้ยืนยันถึงความเสถียรและความยืดหยุ่นของ Google Sheets ในฐานะฐานข้อมูลบนคลาวด์ที่รองรับการจัดการข้อมูลองค์กรได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องพึ่งพาเซิร์ฟเวอร์กายภาพ

1.2 แนวคิดการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งานแบบตอบสนอง (Responsive Design) การออกแบบเว็บแอปพลิเคชันในปัจจุบันจำเป็นต้องคำนึงถึงการแสดงผลบนอุปกรณ์ที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นคอมพิวเตอร์ แท็บเล็ต หรือสมาร์ตโฟน แนวคิด Responsive Design จึงเป็นมาตรฐานสำคัญที่ทำให้ส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface) ปรับขนาดและเลย์เอาต์ให้เหมาะสมกับหน้าจอโดยอัตโนมัติ ซึ่ง ชิรพงษ์ ญานุชิตร และคณะ [5] ชี้ให้เห็นว่าระบบสืบค้นสารสนเทศในยุคปัจจุบันจำเป็นต้องคำนึงถึงประสบการณ์ผู้ใช้งาน (User Experience) และความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลบนอุปกรณ์ที่หลากหลายเป็นสำคัญ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้เฟรมเวิร์ก Tailwind CSS ในการพัฒนาส่วนติดต่อผู้ใช้งาน เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงรองรับการออกแบบ Responsive Design ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยให้ระบบมีความสวยงามทันสมัยตามมาตรฐานการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันในยุคปัจจุบัน

จากการวิเคราะห์ความต้องการพบว่าระบบมีกลุ่มผู้ใช้งานหลัก 2 กลุ่ม ได้แก่ (1) ผู้ใช้งานทั่วไป (General User) ที่สามารถสืบค้นโครงงาน ดูรายละเอียด และดาวน์โหลดเอกสาร PDF โดยไม่ต้องเข้าสู่ระบบ และ (2) ผู้ดูแลระบบ (Administrator) ที่สามารถเพิ่ม แก้ไข ลบข้อมูลโครงงาน อัปโหลดไฟล์ PDF และจัดการผู้ใช้งานผ่านการตรวจสอบสิทธิ์

2. การออกแบบระบบ (System Design) ผู้วิจัยดำเนินการออกแบบส่วนประกอบสำคัญของระบบ โดยมีสถาปัตยกรรมระบบโดยรวมดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สถาปัตยกรรมระบบ (System Architecture)

โดยในภาพที่ 1 แสดงให้เห็นการออกแบบสถาปัตยกรรม (System Architecture) โดยรวมของระบบ ดังนี้

2.1 การออกแบบฐานข้อมูล โดยใช้ Google Sheets เป็นฐานข้อมูลหลักในการจัดเก็บข้อมูลโครงงาน (Metadata) และสถานะการดำเนินงาน เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงและประหยัดค่าใช้จ่าย โดยฐานข้อมูลประกอบด้วย 1 ไฟล์ 3 Sheet ดังแสดงในตารางที่ 1

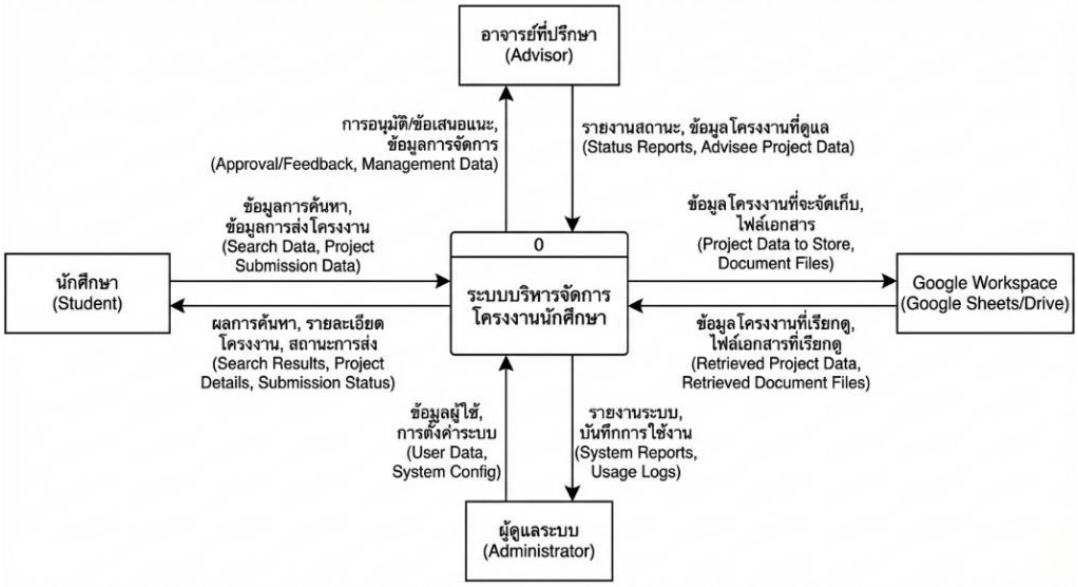
ตารางที่ 1 โครงสร้างฐานข้อมูลของระบบบน Google Sheets

Sheet	Field	Data Type	Description
members	email	Text	อีเมลผู้ใช้งาน
	Name	Text	ชื่อ-นามสกุลผู้ใช้งาน
	passwordHash	Text	รหัสผ่านที่เข้ารหัสแล้ว
	registerDate	Date	วันที่ลงทะเบียน
projects	ProjectID	Text	รหัสโครงงาน
	NameTH	Text	ชื่อโครงงานภาษาไทย
	NameEN	Text	ชื่อโครงงานภาษาอังกฤษ
	Authors	Text	ชื่อผู้จัดทำโครงงาน
	Advisors	Text	ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
	Keywords	Text	คำสำคัญของโครงงาน
	PublicationYear	Number	ปีการศึกษาที่จัดทำ
	AbstractTH	Text	บทคัดย่อภาษาไทย
	AbstractEN	Text	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ
	FileID	Text	ID ไฟล์ PDF บน Google Drive

Sheet	Field	Data Type	Description
	UploadDate	Date	วันที่อัปโหลดเอกสาร
	UploaderEmail	Text	อีเมลผู้อัปโหลด
passwordresets	Email	Text	อีเมลผู้ขอรีเซ็ตรหัสผ่าน
	Token	Text	Token สำหรับยืนยันตัวตน
	ExpiryTimestamp	DateTime	วันเวลาหมดอายุของ Token

2.2 การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (UI Design) ออกแบบโดยใช้เฟรมเวิร์ก Tailwind CSS เพื่อให้เกิดความสวยงาม ทันสมัย และสนับสนุนการใช้งานผ่านสมาร์ตโฟน โดยเน้นประสบการณ์ผู้ใช้ (User Experience) เป็นสำคัญ

2.3 การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ โดยออกแบบกระบวนการทำงานแบบ Serverless โดยใช้ Google Apps Script เป็นตัวกลางในการประมวลผลระหว่างหน้าเว็บและฐานข้อมูล ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มผู้ใช้งานและระบบแสดงดังแผนภาพบริบทในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภาพบริบท (Context Diagram) ของระบบ

3. การพัฒนาระบบ (System Development) ดำเนินการเขียนโปรแกรมตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้ภาษา HTML, CSS (Tailwind), และ JavaScript ในฝั่ง Client-side และใช้ Google Apps Script (GAS) ในฝั่ง Server-side เชื่อมต่อกับ Google Sheets API เพื่อจัดการข้อมูล CRUD (Create, Read, Update, Delete) สำหรับการจัดการไฟล์เอกสารโครงงาน ระบบใช้ Google Drive เป็นพื้นที่จัดเก็บไฟล์ PDF ของเล่มรายงานโครงงานแต่ละชิ้น โดยเมื่อผู้ดูแลระบบอัปโหลดไฟล์ผ่านหน้าเว็บ Google Apps Script จะดำเนินการนำไฟล์ขึ้นบน Google Drive และบันทึก URL ของไฟล์นั้นลงใน Google Sheets โดยอัตโนมัติ ทำให้เมื่อผู้ใช้งานค้นหาพบโครงงานและต้องการดาวน์โหลดเอกสารฉบับเต็ม ระบบจะดึง URL ดังกล่าวจาก Google Sheets เพื่อเชื่อมต่อไปยังไฟล์บน Google Drive ให้ผู้ใช้ดาวน์โหลดหรืออ่านออนไลน์ได้ทันที

4. การทดสอบและหาประสิทธิภาพระบบ (System Testing & Efficiency Evaluation) ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยใช้วิธีการประเมินประสิทธิภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ (Expert Judgment) ด้วยเทคนิค Black-Box Testing เพื่อตรวจสอบการทำงานของฟังก์ชันต่างๆ ว่าถูกต้องตามความต้องการและปราศจากข้อผิดพลาด (Bugs) หรือไม่ ดังนี้

4.1 กลุ่มเป้าหมายผู้ประเมิน งานวิจัยนี้ประเมินโดย ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ เทคโนโลยีสารสนเทศ หรือการพัฒนาซอฟต์แวร์ จำนวน 5 ท่าน ซึ่งได้มาโดยการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling)

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่

4.2.1 ระบบบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษาด้วยเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ ที่พัฒนาขึ้น

4.2.2 แบบประเมินประสิทธิภาพระบบ (Black-Box Testing) แบ่งเกณฑ์การพิจารณาเป็น 4 ด้าน ได้แก่ 1) ด้านฟังก์ชันการทำงาน (Functional Requirement Test) 2) ด้านความถูกต้องของฟังก์ชัน (Functional Test) 3) ด้านความใช้งานง่าย (Usability Test) และ 4) ด้านความปลอดภัยของระบบ (Security Test) [6, 11]

4.2.3 การตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือวิจัย ก่อนนำแบบประเมินประสิทธิภาพระบบไปใช้จริง ผู้วิจัยได้ดำเนินการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) โดยนำแบบประเมินไปให้ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศพิจารณาความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ของการประเมินในแต่ละด้าน ผลการพิจารณาพบว่าข้อคำถามทุกข้อมีความสอดคล้องและครอบคลุมเนื้อหาที่ต้องการวัดได้อย่างเหมาะสม จึงนำแบบประเมินฉบับที่ผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาแล้วไปใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน ต่อไป

4.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล: ผู้วิจัยนำเสนอระบบแก่ผู้เชี่ยวชาญเพื่อทดลองใช้งานจริง และบันทึกผลการประเมินลงในแบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (5-Point Likert Scale) [8, 10, 11] ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์ประเมินผลที่ใช้ในแบบสอบถามของผู้เชี่ยวชาญ

ระดับเกณฑ์ในการให้คะแนน			การแปลความหมาย
เชิงคุณภาพ	เชิงปริมาณ	คะแนนเฉลี่ย	
ดีมาก	5	4.51-5.00	ระบบรองรับการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพระดับดีมาก
ดี	4	3.51-4.50	ระบบรองรับการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพระดับดี
พอใช้	3	2.51-3.50	ระบบรองรับการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพระดับพอใช้
ปรับปรุง	2	1.51-2.50	ระบบรองรับการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพระดับพอใช้
ไม่เหมาะสม	1	1.00-1.50	ระบบรองรับการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพระดับไม่เหมาะสม

4.4 การวิเคราะห์ข้อมูล นำผลคะแนนที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (*S.D.*) แล้วแปลผลตามเกณฑ์มาตรฐาน โดยกำหนดว่าระบบต้องมีผลการประเมินอยู่ในระดับ "ดี" ขึ้นไป จึงจะถือว่าผ่านเกณฑ์

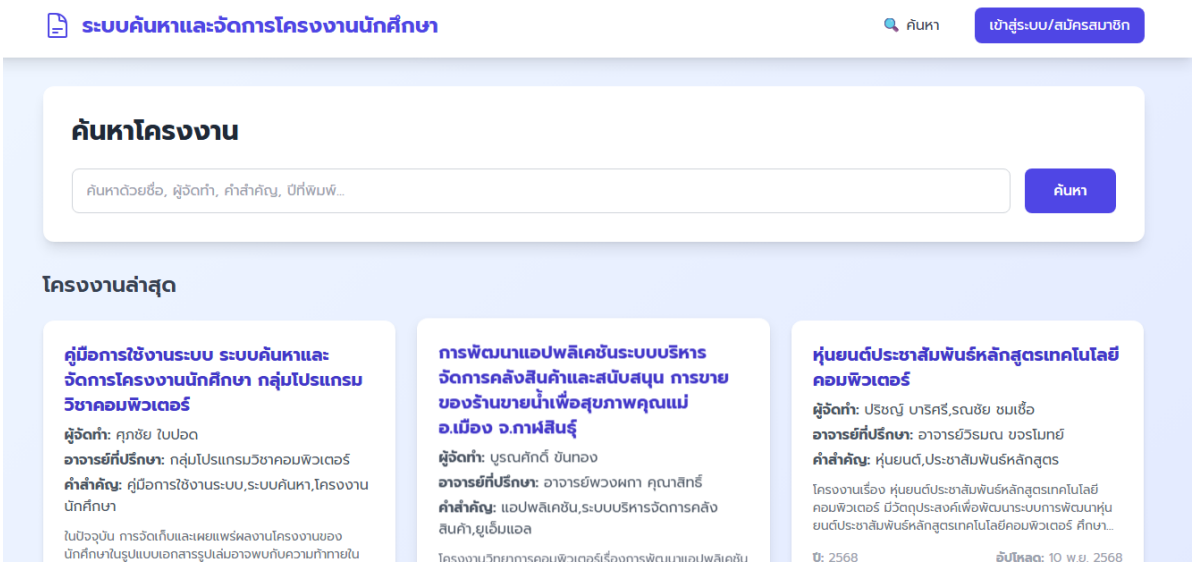
5. การติดตั้งและการบำรุงรักษาระบบ (Implementation & Maintenance) เมื่อระบบผ่านการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญแล้ว จึงนำระบบขึ้นใช้งานจริง (Deploy) ผ่าน Google Apps Script Web App และเผยแพร่ลิงก์ให้แก่นักศึกษาและอาจารย์ในสาขาวิชาเพื่อใช้งาน พร้อมทั้งจัดทำคู่มือการใช้งานและคอยตรวจสอบดูแลระบบให้ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

ผลการวิจัย

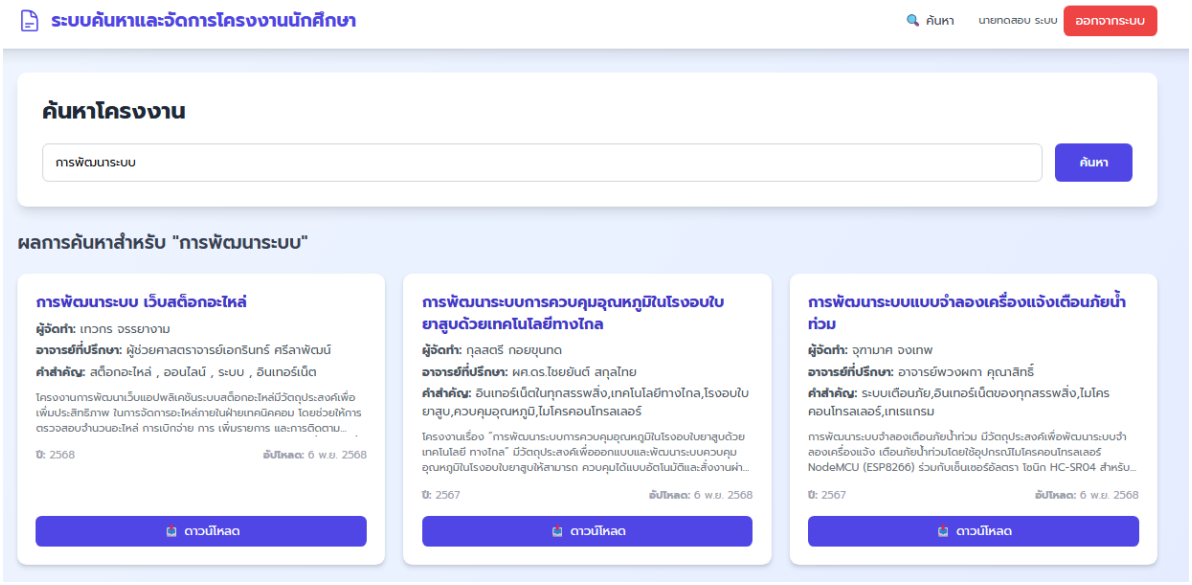
จากการดำเนินการวิจัยเรื่อง “นวัตกรรมการบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษาด้วยเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันแบบไร้เซิร์ฟเวอร์” ผู้วิจัยขอนำเสนอผลการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. ผลการพัฒนาระบบ (System Development Results) ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษาจนเสร็จสมบูรณ์ โดยระบบทำงานในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) บนสถาปัตยกรรมแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ (Serverless Architecture) ซึ่งหมายความว่าระบบทำงานได้โดยไม่ต้องพึ่งพาเซิร์ฟเวอร์กายภาพของหน่วยงาน ส่งผลให้ไม่มีค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อหรือดูแลรักษาเซิร์ฟเวอร์ ไม่ต้องการผู้ดูแลระบบเครือข่ายโดยเฉพาะ และสามารถขยายขนาดการใช้งานได้ตามความต้องการโดยอัตโนมัติผ่านโครงสร้างพื้นฐานของ Google Cloud นอกจากนี้ระบบยังมีการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (User Interface) ให้รองรับการแสดงผลบนอุปกรณ์ที่หลากหลาย (Responsive Design) ผลการพัฒนาในส่วนสำคัญมีดังนี้

1.1 ส่วนหน้าแรกและระบบสืบค้น (Home & Search Interface) ซึ่งระบบได้รับการออกแบบให้มีความทันสมัยโดยใช้ Tailwind CSS เน้นความเรียบง่ายและใช้งานสะดวก (User-Friendly) ผู้ใช้งานสามารถสืบค้นโครงงานได้จากชื่อโครงงาน ชื่อผู้จัดทำ คำสำคัญ หรือปีที่พิมพ์ โดยระบบจะประมวลผลและแสดงรายการโครงงานแบบเรียลไทม์ (Real-time) ดึงข้อมูลโดยตรงจากฐานข้อมูล Google Sheets ดังแสดงในภาพที่ 3 กรณีที่ยังไม่เข้าสู่ระบบจะไม่สามารถดาวน์โหลดไฟล์ได้ และเมื่อผู้ใช้งานทำการสมัครสมาชิกหรือเข้าสู่ระบบแล้ว ทำการสืบค้นและพบโครงงานที่ต้องการ ระบบจะแสดงผลลัพธ์พร้อมรายละเอียดโครงงาน พร้อมปุ่มสำหรับดาวน์โหลดหรืออ่านเอกสารฉบับเต็ม (PDF) ดังแสดงในภาพที่ 4

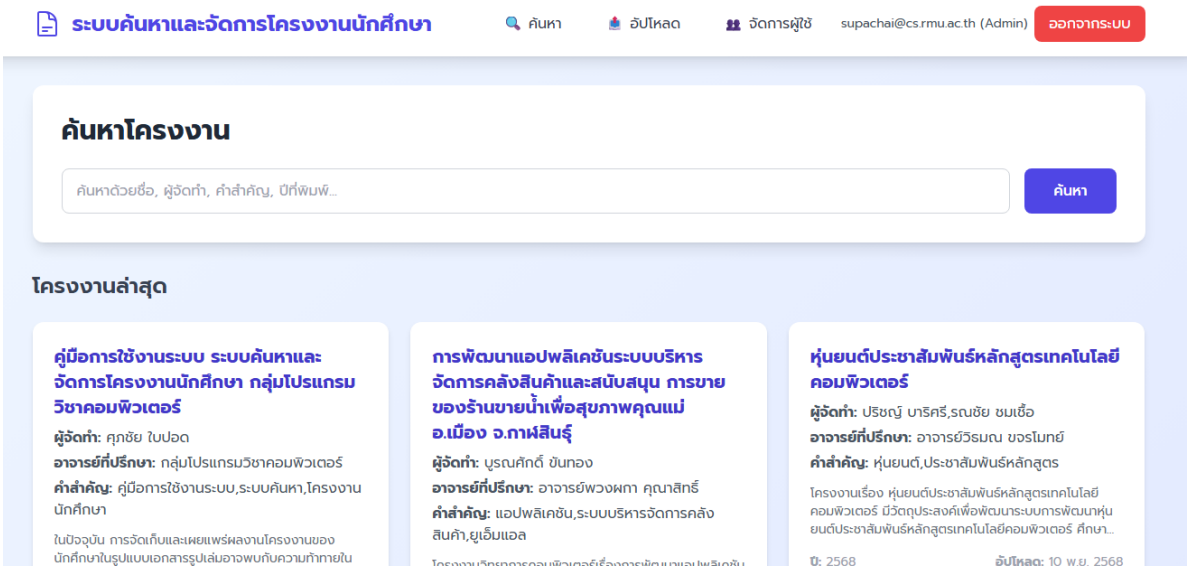


ภาพที่ 3 หน้าจอหลักและส่วนการสืบค้นข้อมูลโครงงาน

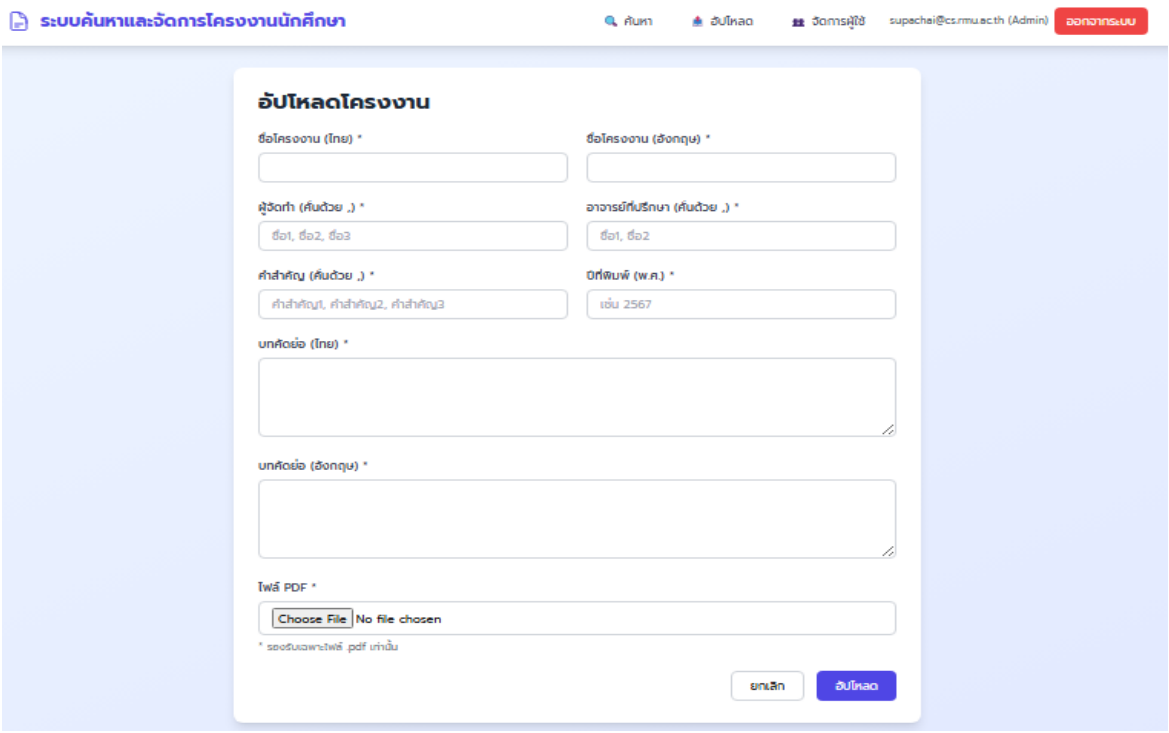


ภาพที่ 4 หน้าจอแสดงผลการค้นหาโครงงานและปุ่มดาวน์โหลดเอกสารฉบับเต็ม

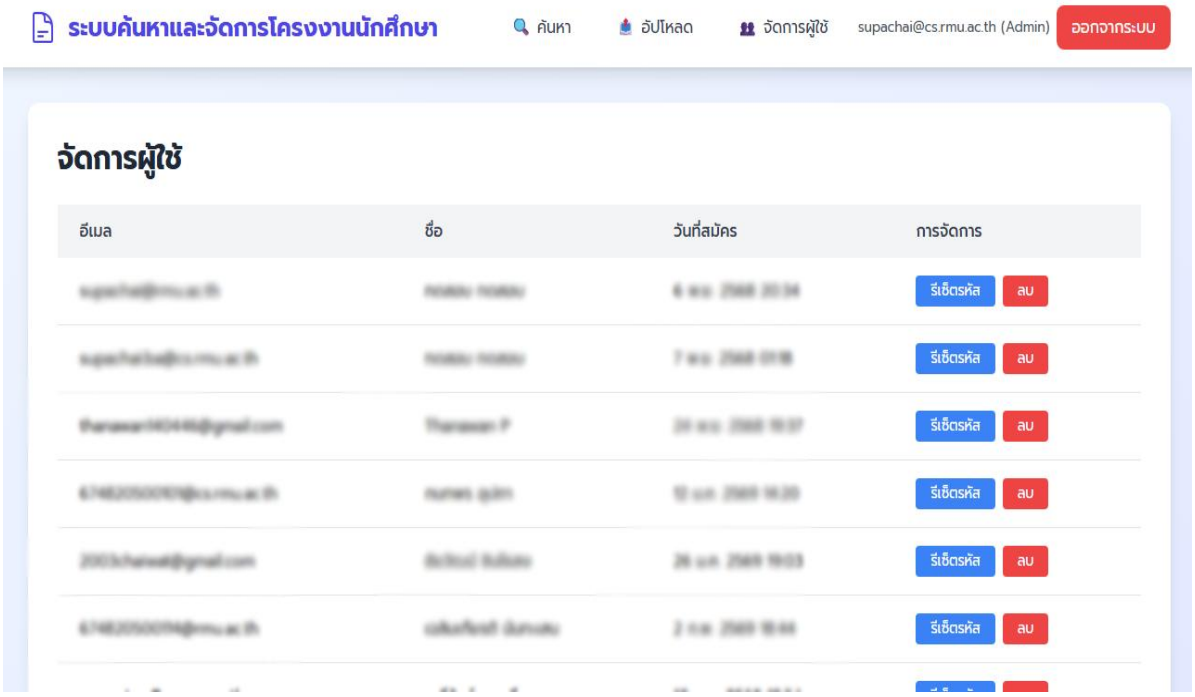
1.2 ส่วนผู้ดูแลระบบ (Administrator Interface) สำหรับอาจารย์หรือเจ้าหน้าที่ ระบบมีฟังก์ชันการตรวจสอบสิทธิ์ (Authentication) เพื่อเข้าสู่ระบบจัดการข้อมูล โดยสามารถ เพิ่ม ลบ และแก้ไขข้อมูลโครงงานผ่านฟอร์มบันทึกข้อมูลที่เชื่อมต่อกับ Google Sheets ได้ทันที ช่วยลดความซับซ้อนในการจัดการฐานข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งจะมีเมนูการจัดการงานต่างๆ อยู่ในส่วนแถบเมนูด้านบนของเว็บ ในส่วนของหน้าในการอัปโหลดไฟล์โครงงาน ดังแสดงในภาพที่ 6 และหน้าสำหรับจัดการผู้ใช้ ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 5 หน้าจอสำหรับผู้ดูแลระบบในการจัดการข้อมูลโครงงาน



ภาพที่ 6 หน้าในการอัปโหลดข้อมูลและไฟล์ PDF โครงงาน



ภาพที่ 7 หน้าสำหรับจัดการผู้ใช้

2. ผลการประเมินประสิทธิภาพระบบ (System Efficiency Evaluation Results) ผู้วิจัยได้นำระบบที่พัฒนาขึ้นไปให้ผู้เชี่ยวชาญด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ จำนวน 5 ท่าน ประเมินประสิทธิภาพโดยใช้วิธี Black-Box Testing ใน 4 ด้านหลัก ผลการประเมินปรากฏดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแปลผลการประเมินประสิทธิภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (*S.D.*)	ระดับประสิทธิภาพ
1. ด้านฟังก์ชันการทำงาน (Functional Requirement Test)	**4.60**	**0.55**	**ดีมาก**
1.1 ระบบสามารถบันทึกและจัดเก็บข้อมูลได้ถูกต้อง	4.80	0.45	ดีมาก
1.2 ระบบสามารถสืบค้นข้อมูลได้ตรงตามเงื่อนไข	4.60	0.55	ดีมาก
1.3 ระบบแสดงผลข้อมูลโครงงานได้ครบถ้วน	4.40	0.55	ดี
2. ด้านความถูกต้องของฟังก์ชัน (Functional Test)	**4.53**	**0.52**	**ดีมาก**
2.1 ความถูกต้องของการเชื่อมโยงลิงก์ (Links)	4.60	0.55	ดีมาก
2.2 ความถูกต้องของการดาวน์โหลดไฟล์เอกสาร	4.40	0.55	ดี
2.3 ความถูกต้องของการตรวจสอบสิทธิ์เข้าใช้งาน	4.60	0.55	ดีมาก
3. ด้านความใช้งานง่าย (Usability Test)	**4.67**	**0.49**	**ดีมาก**
3.1 ความสวยงามและความทันสมัยของหน้าจอ (UI)	4.80	0.45	ดีมาก
3.2 ความสะดวกในการใช้งานเมนูต่างๆ (UX)	4.60	0.55	ดีมาก
3.3 การรองรับการแสดงผลบนมือถือ (Responsive)	4.60	0.55	ดีมาก
4. ด้านความปลอดภัยของระบบ (Security Test)	**4.47**	**0.52**	**ดี**
4.1 ระบบมีการป้องกันการเข้าถึงข้อมูลส่วนสำคัญ	4.40	0.55	ดี
4.2 ความปลอดภัยของฐานข้อมูล (Google Sheets)	4.53	0.50	ดีมาก
รวมเฉลี่ยทุกด้าน (Total Average)	**4.57**	**0.52**	**ดีมาก**

จากตารางที่ 3 พบว่า ผลการประเมินประสิทธิภาพระบบในภาพรวมอยู่ในระดับ ดีมาก ($\bar{x}$ = 4.57, **S.D.** = 0.52) เมื่อพิจารณารายด้านพบว่า ด้านที่มีคะแนนเฉลี่ยสูงสุดคือ ด้านความใช้งานง่าย (Usability Test) ($\bar{x}$ = 4.67) รองลงมาคือ ด้านฟังก์ชันการทำงาน ($\bar{x}$ = 4.60) และ ด้านความถูกต้องของฟังก์ชัน ($\bar{x}$ = 4.53) ตามลำดับ ส่วนด้านที่มีคะแนนเฉลี่ยต่ำสุดคือ ด้านความปลอดภัยของระบบ ($\bar{x}$ = 4.47) ซึ่งยังคงอยู่ในเกณฑ์ดี แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพและความพร้อมสำหรับการนำไปใช้งานจริงเพื่อบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษา

อภิปรายผล

จากการพัฒนานวัตกรรมการบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษาด้วยเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ ผู้วิจัยมีประเด็นสำคัญที่นำมาอภิปรายผลร่วมกับแนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. ประสิทธิภาพของสถาปัตยกรรมแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ (Serverless Architecture) ผลการวิจัยพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องพึ่งพาเซิร์ฟเวอร์กายภาพ ส่งผลให้ลดภาระค่าใช้จ่ายและลดความซับซ้อนในการติดตั้งระบบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ มัณฑนา ขาวพิมาย และคณะ [12] และ Lira-Camargo et al. [21] ที่ยืนยันว่าการประยุกต์ใช้ Google Apps Script ช่วยให้การจัดการข้อมูลมีความยืดหยุ่น ลดงานซ้ำซ้อน และสามารถสร้างระบบอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพสูงได้โดยไม่ต้องลงทุนโครงสร้างพื้นฐานเพิ่มเติม นอกจากนี้ การเลือกใช้สถาปัตยกรรมแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ยังสอดคล้องกับแนวคิด Green IT ตามที่ Pan et al. [22] ได้เสนอแนะไว้ว่า Serverless Computing เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยลดการใช้พลังงานและต้นทุนในการบำรุงรักษาได้ดีกว่าระบบเซิร์ฟเวอร์แบบดั้งเดิม ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการพัฒนาระบบสารสนเทศในองค์กรที่มีงบประมาณจำกัด

2. ประสิทธิภาพด้านการใช้งานและการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (Usability & UI Design) ผลการประเมินประสิทธิภาพในด้านความใช้งานง่าย (Usability) มีคะแนนเฉลี่ยสูงสุด ($\overline{x}$ = 4.67) แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้เฟรมเวิร์ก Tailwind CSS ในการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน มีส่วนสำคัญที่ทำให้ระบบมีความสวยงาม ทันสมัย และใช้งานง่าย สอดคล้องกับงานวิจัยของ ธนพล แย้มทุ่ง และ อรอุมา พร้าโมต [14] ที่พบว่าการออกแบบ UX/UI ที่ดีส่งผลโดยตรงต่อความพึงพอใจของผู้ใช้งาน และตอบโจทย์พฤติกรรมการใช้งานในยุคดิจิทัลตามที่ คนึงศรี นิลดี [7] ได้เสนอแนะไว้

3. ประสิทธิภาพด้านการสืบค้นและจัดการสารสนเทศ (Information Retrieval & Management) ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแก้ปัญหาความยุ่งยากในการสืบค้นโครงงานเก่าและการสูญหายของไฟล์เอกสารได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยผลการประเมินด้านฟังก์ชันการทำงานอยู่ในระดับดีมาก ($\overline{x}$ = 4.60) ผู้ใช้งานสามารถค้นหาข้อมูลได้รวดเร็วและแม่นยำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ ทัศนีย์ ทรัพย์ประมวล [2] และ ภานรินทร์ อิ่นแก้ว และคณะ [3] นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยต่างประเทศของ Abiola et al. [23] ที่พบว่าการพัฒนาระบบบริหารจัดการโครงงานนักศึกษาบนเว็บช่วยลดความซ้ำซ้อนของหัวข้อโครงงาน และเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามความคืบหน้าของนักศึกษาได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับการจัดการแบบเอกสาร

4. ความถูกต้องและความปลอดภัยของข้อมูล (Data Integrity & Security) แม้ว่าระบบจะใช้ฐานข้อมูลบนคลาวด์สาธารณะ (Google Sheets) แต่ผลการประเมินด้านความปลอดภัยยังอยู่ในเกณฑ์ดี ($\overline{x}$ = 4.47) เนื่องจากการกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงผ่าน Google Account และการเขียนสคริปต์ตรวจสอบสิทธิ์ (Authentication Script) ในฝั่ง Server-side ช่วยป้องกันการเข้าถึงข้อมูลจากผู้ที่ไม่ได้รับอนุญาตได้ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ จารุกิตติ์ สายสิงห์ [11] ที่ระบุว่าการกำหนดสิทธิ์ผู้ใช้งาน (User Role Authorization) เป็นปัจจัยสำคัญที่สร้างความเชื่อมั่นในการใช้งานระบบสารสนเทศบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ต อย่างไรก็ตาม คะแนนในด้านนี้ยังน้อยกว่าด้านอื่นเล็กน้อย ซึ่งผู้วิจัยมีข้อสังเกตว่าอาจเป็นเพราะข้อจำกัดบางประการของ Google Sheets API ในการจัดการ Log File ที่ละเอียดซับซ้อนเมื่อเทียบกับฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ (RDBMS) ระดับองค์กร

สรุปผล

การวิจัยเรื่อง "การพัฒนาระบบบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษาด้วยเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันแบบไร้เซิร์ฟเวอร์" สามารถสรุปผลการดำเนินการตามวัตถุประสงค์การวิจัยได้ดังนี้

1. ผลการพัฒนาระบบ ผู้วิจัยสามารถพัฒนานวัตกรรมระบบบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษาได้สำเร็จตามขอบเขตที่กำหนด โดยระบบมีลักษณะเป็นเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) ที่ทำงานบนสถาปัตยกรรมแบบไร้เซิร์ฟเวอร์

(Serverless Architecture) ประยุกต์ใช้ Google Apps Script เป็นตัวขับเคลื่อนหลักและใช้ Google Sheets เป็นฐานข้อมูล ซึ่งช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายและขั้นตอนการดูแลรักษาเซิร์ฟเวอร์ ระบบรองรับการใช้งานผ่านเว็บเบราว์เซอร์บนอุปกรณ์ที่หลากหลาย (Responsive Design) และประกอบด้วยฟังก์ชันหลักที่สำคัญ ได้แก่ ระบบสืบค้นโครงงานที่รวดเร็ว ระบบแสดงรายละเอียดและดาวน์โหลดเอกสารฉบับเต็ม และระบบบริหารจัดการข้อมูลสำหรับผู้ดูแลระบบ ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวกให้แก่นักศึกษา อาจารย์ และบุคลากรในการเข้าถึงสารสนเทศโครงงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ผลการประเมินประสิทธิภาพระบบ จากการนำระบบที่พัฒนาขึ้นไปประเมินประสิทธิภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน ด้วยวิธีการทดสอบแบบ Black-Box Testing พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในภาพรวมอยู่ในระดับ ดีมาก ($\overline{X}$ = 4.57, ***S.D.*** = 0.52) โดยด้านที่มีคะแนนประเมินสูงสุดคือ ด้านความใช้งานง่าย (Usability) ($\overline{X}$ = 4.67) รองลงมาคือ ด้านฟังก์ชันการทำงาน ($\overline{X}$ = 4.60) ด้านความถูกต้องของฟังก์ชัน ($\overline{X}$ = 4.53) และด้านความปลอดภัยของระบบ ($\overline{X}$ = 4.47) ตามลำดับ ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้อง ครบถ้วน และมีความพร้อมสำหรับการนำไปใช้งานจริงเพื่อยกระดับการบริหารจัดการโครงงานของสาขาวิชา

ข้อเสนอแนะ

จากการพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพระบบบริหารจัดการและสืบค้นโครงงานนักศึกษาด้วยเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์และแนวทางสำหรับการศึกษาพัฒนาในอนาคต ดังนี้

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1.1 การสำรองข้อมูล (Data Backup) แม้ว่าระบบจะจัดเก็บข้อมูลบน Google Cloud ที่มีความปลอดภัยสูง แต่เพื่อป้องกันความผิดพลาดจากการใช้งาน (Human Error) หรือกรณีบัญชี Google ของผู้ดูแลระบบเกิดปัญหา ควรมีการส่งออกข้อมูลจาก Google Sheets เป็นไฟล์สำรอง (เช่น .xlsx หรือ .csv) และดาวน์โหลดไฟล์เอกสารโครงงานมาเก็บไว้ในอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลสำรอง (Local Storage) อย่างสม่ำเสมอตามรอบระยะเวลาที่กำหนด เช่น ทุกสิ้นภาคการศึกษา

1.2 การเตรียมความพร้อมของผู้ใช้งาน ควรมีการจัดทำคู่มือการใช้งานฉบับย่อ (Quick Guide) หรือวิดีโอแนะนำการใช้งานสั้นๆ แนะนำขั้นตอนการสืบค้นและการส่งเล่มโครงงาน เพื่อให้นักศึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาสามารถใช้งานระบบได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในส่วนของการกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงไฟล์เอกสารฉบับเต็ม

1.3 สภาพแวดล้อมการใช้งาน เนื่องจากระบบพัฒนาขึ้นด้วยเทคโนโลยีเว็บสมัยใหม่ (Modern Web Technologies) จึงขอแนะนำให้ผู้ใช้งานเข้าใช้ระบบผ่านเว็บเบราว์เซอร์ที่มีความทันสมัย เช่น Google Chrome, Microsoft Edge หรือ Safari เวอร์ชันปัจจุบัน เพื่อให้การแสดงผลส่วนติดต่อผู้ใช้ (UI) และการทำงานของสคริปต์มีความสมบูรณ์และสวยงามที่สุด

2. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

2.1 การเพิ่มระบบแจ้งเตือน (Notification System) ควรพัฒนาส่วนขยายเพื่อเชื่อมต่อกับระบบแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันยอดนิยม เช่น Line Notify หรือ E-mail Automation เพื่อแจ้งสถานะการส่งโครงงาน การอนุมัติหัวข้อ หรือการแจ้งเตือนเมื่อใกล้ถึงกำหนดส่งเล่มโครงงาน ซึ่งจะช่วยให้การสื่อสารระหว่างนักศึกษาและผู้ดูแลระบบมีความรวดเร็วยิ่งขึ้น

2.2 การยกระดับฐานข้อมูล (Database Scalability) หากในอนาคตมีจำนวนโครงงานและไฟล์เอกสารสะสมเป็นจำนวนมากจนเกินขีดจำกัดของ Google Sheets การวิจัยครั้งต่อไปอาจพิจารณาปรับเปลี่ยนไปใช้ฐานข้อมูลบนคลาวด์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น Google Firebase หรือ Cloud SQL เพื่อรองรับการประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) และเพิ่มความรวดเร็วในการสืบค้นข้อมูลที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

2.3 การประเมินความสามารถในการใช้งานด้วย System Usability Scale (SUS) การวิจัยครั้งต่อไปควรเพิ่มการประเมินด้วย SUS ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานสากล ในการวัดความสามารถในการใช้งาน (Usability) จากมุมมองของผู้ใช้งานจริงในบริบทการใช้งานระบบ โดยเก็บข้อมูลจากนักศึกษาชั้นปีที่ 4 ที่ดำเนินโครงงานในรุ่นถัดไป เพื่อให้ผลการวิจัย มีความครอบคลุมทั้งในมิติเชิงเทคนิคและมิติประสบการณ์ผู้ใช้งานอย่างรอบด้าน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มโปรแกรมวิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบพระคุณผู้เชี่ยวชาญทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำและประเมินประสิทธิภาพระบบ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. จริยา ทิพย์หทัย. การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการจัดการความรู้ของสำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์. รายงานการวิจัย. นครสวรรค์: สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์; 2565. https://knowledge.nsru.ac.th/storage/files/file_attach/1669785524.pdf
2. ทัศนีย์ ทรัพย์ประมวล. การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการให้บริการสืบค้นโครงงานฉบับเต็มของสาขาวิชาคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ. วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม (STIJ). 2566; 4(3): 11-25. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/stij/article/view/258576
3. ภานรินทร์ อิ่นแก้ว, พุธิตา เจือจันทร์, วิชุดา ไชยศิวามงคล. การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อการค้นคืนสารสนเทศปริญญานิพนธ์ สำหรับปริญญาตรี สาขาวิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 2565; 50(2): 114-125. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/KKUSciJ/article/view/250304
4. ศุภชัย ทองสุข, สถิต เพ็ชรโยยิ่ง, ชัยวัฒน์ บุญอ่อน. การพัฒนาระบบบริหารจัดการโครงงาน กรณีศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมซอฟต์แวร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ. วารสารวิทยาการสารสนเทศและเทคโนโลยี. 2568; 15(1): 39-48. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/JIST/article/view/255004
5. ชิรพงษ์ ญานุชิตร, ณิชาภัทร พรหมศร, ปุณยนุช ตันติเดชามงคล, ศิวดล มะลิซ้อน. การออกแบบและพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันระบบจัดเก็บ สืบค้น และแสดงผลงานปริญญานิพนธ์และงานวิจัย. วารสารนวัตกรรมสื่อและการสื่อสาร. 2567; 3(2): 36-57. https://doi.org/10.60101/jimc2024.1439
6. สุพล บ่อคุ้ม, ธนันชนัย อุ่นสิม, เจตนา วีระกุล, เตชิต ชื่นประทุมทอง. การพัฒนาระบบติดตามกระแสงานด้านบริการสารเคมีออนไลน์. วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์. 2567; 3(2): 1-13. https://doi.org/10.14456/ksti.2024.11
7. คนึงศรี นิลดี. การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการติดตามทุนวิจัยภายใน คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์. 2568; 4(2): 53-64. https://doi.org/10.14456/ksti.2025.12
8. เปรมฤดี ปลื้มเชื้อ. การพัฒนาระบบติดตามการจัดซื้อจัดจ้างด้วยแอพพลิเคชั่นกูเกิลชีต: มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ. วารสารเมธีวิจัย. 2568; 2(3): 26. https://so16.tci-thaijo.org/index.php/SJ_SS/article/view/1139
9. ธนรรณพร แสงสว่าง, นัฏจรี เจริญสุข, นันทพงศ์ หมิแหละหมัน. การพัฒนาระบบบันทึกข้อมูลโดยใช้กูเกิลแอปพลิเคชันทางการศึกษาในการบริหารงานบุคคล โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ สุราษฎร์ธานี. วารสารร้อยแก่นสาร. 2566; 8(9). https://so02.tci-thaijo.org/index.php/JRKSA/article/view/262951

10. รัชดาภรณ์ มณีตัน, กนกรัตน์ จิรสัจจานุกูล, อัตภาพ มณีเติม. การสังเคราะห์องค์ประกอบของการใช้โปรแกรม Google Sheet เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม. 2568; 19(3). https://so05.tci-thaijo.org/index.php/rmuj/article/view/284057
11. จารุกิตติ์ สายสิงห์. การประเมินประสิทธิภาพระบบจัดเก็บฐานข้อมูลบุคลากรทางการศึกษา. วารสารวิชาการและวิจัย มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. 2565; 12(1): 16-28. https://so04.tci-thaijo.org/index.php/neuarj/article/view/245202
12. มัณฑนา ขาวพิมาย, รุจิราลัย หิมะธนะสุวรรณ, เนตรนภา ดวงจันทร์, เอกชัย คนคิด. การประยุกต์ใช้ Google Apps Script ร่วมกับ Google Sheet กรณีศึกษา: ระบบคำของบประมาณของมหาวิทยาลัยขอนแก่น. Mahidol R2R e-Journal. 2568; 12(3). http://doi.org/10.14456/jmu.2025.32
13. ปิ่นกมล สมพีร์วงศ์, สฤษฎ์ชัย ปรีดาวัลย์. การประยุกต์ใช้ Google Sheet สำหรับการจัดทำแผนปฏิบัติงานของวิทยาลัยการสาธารณสุขสิรินธร จังหวัดชลบุรี. วารสารวิจัยระบบสาธารณสุข. 2564; 15(4): 490-510. https://he04.tci-thaijo.org/index.php/j_hsr/article/view/3306
14. ธนพล แย้มทุ่ง, อรอุมา พร้าโมต. การออกแบบและพัฒนาระบบสารสนเทศกิจกรรมนักศึกษาผ่านเว็บแอปพลิเคชัน กรณีศึกษาสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม. Advanced Science Journal. 2568; 25(1). https://li02.tci-thaijo.org/index.php/adscij/article/view/740
15. วัชรวิชญ์ ดาวสว่าง, ยุทธศักดิ์ ทอดทอง, จารุวัฒน์ มณีรัตนาพร. การประยุกต์ใช้แอปพลิเคชัน AppSheet ร่วมกับ Google Spreadsheet สำหรับงานอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี. 2567; 3(1). https://technology.udru.ac.th/journal/article-detail/225
16. วุฒิพงษ์ ฮามวงศ์, พิเชษฐ เวชวิฐาน. การสร้างระบบฐานข้อมูลหมอพื้นบ้านในจังหวัดสกลนครที่ชุมชนเข้าถึงได้. วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์. 2567; 3(2): 73-84. https://doi.org/10.14456/ksti.2024.17
17. ณหทัย สงผัด, นิตยา มณีนิล, ธีรพงศ์ สงผัด. การพัฒนาระบบสารสนเทศโรงเรียนเครือข่ายฝึกประสบการณ์วิชาชีพครู คณะครุศาสตร์และการพัฒนามนุษย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ. วารสารคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสร้างสรรค์. 2568; 3(2): 257-270. https://doi.org/10.14456/jcct.2025.20
18. กำธร สารวรรณ, ภูริ จันทิมา, วรพจน์ สมมูล, รณชัย สังหมื่นเม้า, พรศิริ คำหล้า. ระบบตรวจสอบและแจ้งเตือนสถานะและการเปลี่ยนแปลงเว็บไซต์แบบเรียลไทม์. วารสารงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ (ECTI-ARD). 2567; 4(1): 1-9. https://doi.org/10.37936/ectiard.2024-4-1.252617
19. นวกมล พลบุญ, รัชตะ อนวัชกุล. การพัฒนาระบบสมุดรับ-ส่งงานสารบรรณอิเล็กทรอนิกส์ของสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร. วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์. 2568; 20(1): 90-102. https://so05.tci-thaijo.org/index.php/PNRU_JHSS/article/view/275502
20. คนัสนันท์ เทพทัศน์ และ รัชนี สิทธิศักดิ์. การพัฒนาสื่อโมบายแอปพลิเคชันเพื่อส่งเสริมผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรายวิชาวิทยาการคำนวณ ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4. วารสารนาคบุตรปริทรรศน์. 2568; 17(2): 77-87. https://so04.tci-thaijo.org/index.php/nakboot/article/view/270973

21. Lira-Camargo J, Ogosi-Auqui J, Vera-Tito F. Implementation of Google App Script for Automatic Generation of Pre-registration Form. DYNA. 2025; 92(238): 35-38. https://doi.org/10.15446/dyna.v92n238.117750
22. Akour M, Alenezi M. Reducing Environmental Impact with Sustainable Serverless Computing. Sustainability. 2025; 17: 2999. https://doi.org/10.3390/su17072999
23. Abiola OA, Saheed OO, Akinola SO. Student Project Management System for Monitoring Undergraduate Projects. Journal of Behavioural Informatics, Digital Humanities and Development Research. 2024; 10(3): 47-56. https://fcc08321-8158-469b-b54d-f591e0bd3df4.filesusr.com/ugd/185b0a_a7a1545a94d2494fa6650b25b40c5c46.pdf

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาเครื่องมือประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรง สำหรับประชาชนในพื้นที่อำเภอนามน จังหวัดกาฬสินธุ์

Development of a Risk Assessment Tool for Colorectal Cancer among the Population in Namon District, Kalasin Province.

กฤษฎา วรรณจักร[1*]
Kritsada Wannajak[1*]
[1]กลุ่มงานเทคนิคการแพทย์ โรงพยาบาลนามน จังหวัดกาฬสินธุ์ ประเทศไทย
[1]Department of Medical Technology, Namon Hospital, Kalasin Province, Thailand
*Corresponding author; email: kritsada.wannajak@gmail.com

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
24 กุมภาพันธ์ 2569	7 เมษายน 2569	17 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

โรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรงเป็นปัญหาสาธารณสุขสำคัญที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในประเทศไทย การประเมินความเสี่ยงรายบุคคลอย่างมีประสิทธิภาพมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการคัดกรองเชิงรุกและเพิ่มการเข้าถึงบริการสุขภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและทดสอบคุณภาพของเครื่องมือประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรงสำหรับประชาชนทั่วไป ทั้งเพศชายและเพศหญิง อายุ 50–70 ปี ในพื้นที่อำเภอนามน จังหวัดกาฬสินธุ์

การวิจัยเป็นการศึกษาเชิงวิจัยและพัฒนา (Research and Development) ดำเนินการ 3 ระยะ ได้แก่ (1) การทบทวนวรรณกรรมและแนวทางสากลเพื่อกำหนดกรอบแนวคิดและองค์ประกอบของเครื่องมือ (2) การตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน ได้ค่าดัชนีความสอดคล้องของเนื้อหา (IOC) ภาพรวมเท่ากับ 0.95 และ (3) การทดลองใช้เครื่องมือในประชาชนจังหวัดมหาสารคาม จำนวน 30 คน เพื่อประเมินความชัดเจนและความเชื่อมั่นของเครื่องมือ

ผลการศึกษาพบว่า เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยปัจจัยด้านข้อมูลประชากร พฤติกรรมสุขภาพ ประวัติครอบครัว และอาการเตือนสำคัญ มีค่าความเชื่อมั่นภายใน (Cronbach's alpha) เท่ากับ 0.87 แสดงถึงความสอดคล้องภายในในระดับดี และมีความสามารถในการจำแนกระดับความเสี่ยง โดยมีค่าความไว (Sensitivity) เท่ากับ 82.50% และค่าความจำเพาะ (Specificity) เท่ากับ 78.40% จากการศึกษาในกลุ่มตัวอย่างประชาชนอายุ 50–70 ปี จำนวน 405 คน

สรุปได้ว่า เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีความตรงและความเชื่อมั่นในระดับดี สามารถใช้เป็นเครื่องมือคัดกรองเบื้องต้นในระดับปฐมภูมิและชุมชน เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเข้ารับการตรวจคัดกรอง ลดการส่งตรวจที่ไม่จำเป็น และเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการทรัพยากรสุขภาพในระดับพื้นที่

คำสำคัญ: การพัฒนาเครื่องมือ, การประเมินความเสี่ยง, มะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรง, การตรวจคัดกรอง

Abstract

Colorectal cancer is a major public health problem with a steadily increasing trend in Thailand. Effective individual risk assessment plays a crucial role in promoting proactive screening and improving access to healthcare services. This study aimed to develop and evaluate the quality of a risk assessment tool for colorectal cancer among the general population, including both males and females aged 50–70 years, in Namon District, Kalasin Province.

This research employed a Research and Development design conducted in three phases: (1) a review of literature and international guidelines to establish the conceptual framework and components of the tool; (2) content validity assessment by three experts, yielding an overall Index of Item-Objective Congruence (IOC) of 0.95; and (3) pilot testing with 30 participants in Maha Sarakham Province to assess clarity and reliability.

The results indicated that the developed tool consists of demographic factors, health behaviors, family history, and key warning symptoms. The internal consistency reliability was high, with a Cronbach's alpha of 0.87. The tool also demonstrated good discriminative ability, with a sensitivity of 82.50% and a specificity of 78.40%, based on a sample of 405 individuals aged 50–70 years who underwent colorectal cancer screening.

In conclusion, the developed risk assessment tool shows good validity and reliability. It can be used as a preliminary screening tool at the primary care and community levels to support decision-making for screening, reduce unnecessary referrals, and enhance the efficiency of local health resource management.

Keywords: tool development, risk assessment, colorectal cancer, screening

บทนำ

มะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรง (Colorectal cancer; CRC) เป็นปัญหาสาธารณสุขที่สำคัญระดับโลก โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในประเทศพัฒนาแล้วและประเทศกำลังพัฒนา รายงานของ International Agency for Research on Cancer ภายใต้ World Health Organization ระบุว่า ในปี 2022 CRC เป็นมะเร็งที่พบบ่อยอันดับ 3 ของโลก และเป็นสาเหตุการเสียชีวิตอันดับ 2 จากโรคมะเร็งทั้งหมด คิดเป็นผู้ป่วยรายใหม่มากกว่า 1.9 ล้านราย และเสียชีวิตกว่า 9 แสนรายต่อปี [1] แนวโน้มในช่วงปี 2024–2025 ยังคงสะท้อนภาระโรคที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงด้านโครงสร้างประชากรและวิถีชีวิตอย่างรวดเร็ว [2, 3]

สำหรับประเทศไทย ข้อมูลจากฐานทะเบียนมะเร็งระดับประเทศและรายงานสถิติล่าสุดระหว่างปี 2022–2024 ชี้ให้เห็นว่า CRC เป็นมะเร็งที่พบบ่อยในลำดับต้น ๆ ของทั้งเพศชายและหญิง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ [4,5] สำหรับประเทศไทย ข้อมูลจากฐานทะเบียนมะเร็งระดับประเทศและรายงานสถิติล่าสุดระหว่างปี ค.ศ. 2022–2024 ชี้ให้เห็นว่าโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และลำไส้ตรง (Colorectal Cancer: CRC) เป็นมะเร็งที่พบบ่อยในลำดับต้น ๆ ของทั้งเพศชายและเพศหญิง โดยจัดอยู่ในอันดับที่ 2 ในเพศชาย และอันดับที่ 3 ในเพศหญิง คิดเป็นประมาณ 19.00% และ 10.10% ของมะเร็งทั้งหมดตามลำดับ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ [6] ในระดับประเทศ มีหลักฐานเชิงระบาดวิทยาที่สะท้อนแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุบัติการณ์อย่างชัดเจน โดยพบว่า CRC เป็นมะเร็งที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นในทั้ง

สองเพศอย่างต่อเนื่อง (Annual Percent Change: เพศชาย 4.10% และเพศหญิง 3.10%) และมีผู้ป่วยรายใหม่มากกว่า 17,000 รายต่อปี คิดเป็นประมาณ 10.00% ของมะเร็งทั้งหมดในประเทศ [7, 8] ในระดับเขตสุขภาพ พบความแตกต่างของภาระโรคระหว่างภูมิภาค โดยเฉพาะในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งมีรายงานอัตราการเกิดโรคมะเร็งโดยรวมในระดับสูงเมื่อเทียบกับภูมิภาคอื่น และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นของ CRC อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้อาจสัมพันธ์กับปัจจัยด้านโครงสร้างประชากร พฤติกรรมสุขภาพ และความเหลื่อมล้ำในการเข้าถึงบริการคัดกรองและการรักษา ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจากทะเบียนมะเร็งระดับประเทศของประเทศไทย [9] ในระดับจังหวัด ข้อมูลเชิงพื้นที่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีบริบทใกล้เคียงกับจังหวัดกาฬสินธุ์ เช่น การศึกษาจากทะเบียนมะเร็งจังหวัดเลย พบว่าอัตราอุบัติการณ์มาตรฐานตามอายุ (ASR) ของ CRC เท่ากับ 13.7 ต่อประชากรแสนคนในช่วง ค.ศ. 2019–2021 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [10]
ปัจจัยเสี่ยงสำคัญ ได้แก่ อายุที่มากขึ้น พฤติกรรมการบริโภคอาหารไขมันสูงและใยอาหารต่ำ ภาวะอ้วน การขาดกิจกรรมทางกาย การสูบบุหรี่ และการดื่มแอลกอฮอล์ [11] ขณะเดียวกัน หลักฐานเชิงประจักษ์ยืนยันว่าการคัดกรองด้วยวิธีที่เหมาะสมสามารถลดอัตราการป่วยและการเสียชีวิตได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการตรวจหาเลือดแฝงในอุจจาระแบบ FIT (Fecal Immunochemical Test) ซึ่งมีความไวและความจำเพาะเหมาะสมกับระบบบริการปฐมภูมิ [12, 13]

ประเทศไทยได้บรรจุการคัดกรอง CRC ในสิทธิประโยชน์ของระบบหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ และมีการดำเนินงานภายใต้การกำกับของ National Health Security Office ร่วมกับ Ministry of Public Health โดยกำหนดกลุ่มเป้าหมายอายุ 50–70 ปี ประเทศไทยได้บรรจุการตรวจคัดกรองโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และลำไส้ตรง (colorectal cancer: CRC) ไว้ในสิทธิประโยชน์ของระบบหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ โดยดำเนินการภายใต้ความร่วมมือของสำนักงานหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ (National Health Security Office: NHSO) และกระทรวงสาธารณสุข (Ministry of Public Health: MOPH) ซึ่งกำหนดกลุ่มเป้าหมายประชากรทั่วไป (average-risk population) อายุ 50–70 ปีในการเข้ารับการคัดกรองด้วยวิธี fecal immunochemical test (FIT) ทุก 2 ปี [6, 9] การกำหนดช่วงอายุ 50–70 ปีดังกล่าวมีพื้นฐานมาจากหลักฐานเชิงระบาดวิทยาและข้อแนะนำระดับนานาชาติ ซึ่งระบุว่าความเสี่ยงของ CRC จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่อายุ 50 ปีขึ้นไป และการคัดกรองในช่วงอายุดังกล่าวสามารถลดอัตราการป่วยและการเสียชีวิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ องค์การอนามัยโลกและแนวทางสากลด้านการควบคุมโรคไม่ติดต่อ (NCDs) ยังแนะนำให้ประเทศต่าง ๆ ดำเนินการคัดกรอง CRC ในประชากรอายุ ≥50 ปี โดยใช้วิธีตรวจอุจจาระ FOBT (Fecal Occult Blood Test) หรือการตรวจหาเลือดแฝงในอุจจาระ FIT test (Fecal Immunochemical Test) เป็นเครื่องมือหลักในระบบบริการสุขภาพระดับประชากร [6, 14] ในบริบทของประเทศไทย การกำหนดกลุ่มอายุเป้าหมายดังกล่าวยังสอดคล้องกับนโยบาย Service Plan สาขามะเร็ง ของกระทรวงสาธารณสุข ซึ่งมุ่งเน้นการพัฒนาระบบบริการแบบครบวงจรตั้งแต่การป้องกัน การคัดกรอง การวินิจฉัย และการรักษา โดยเฉพาะการดำเนินโครงการคัดกรอง CRC ระดับประเทศที่เริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 ในประชากรอายุ 50–70 ปี เพื่อเพิ่มการเข้าถึงบริการและลดความเหลื่อมล้ำด้านสุขภาพ [6, 9, 14]

ดังนั้น การกำหนดกลุ่มเป้าหมายอายุ 50–70 ปีจึงเป็นผลลัพธ์ของการบูรณาการระหว่างหลักฐานเชิงวิชาการระดับสากลและนโยบายสาธารณสุขระดับประเทศ ซึ่งมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่มุ่งศึกษาปัจจัยและรูปแบบการเข้าถึงบริการคัดกรอง CRC ในประชากรกลุ่มเสี่ยงปกติ (average-risk population) เพื่อสนับสนุนการพัฒนาระบบบริการสุขภาพและเพิ่มประสิทธิผลของการดำเนินงานตามนโยบายระดับประเทศ อย่างไรก็ตาม อัตราการเข้ารับการคัดกรองจริงในหลายพื้นที่ยังต่ำกว่าเป้าหมายที่กำหนด [15] สะท้อนถึงช่องว่างเชิงระบบบริการ ปัจจัยด้านความรู้ ความเชื่อด้านสุขภาพ การเข้าถึงบริการ และการสื่อสารความเสี่ยง [16, 17]

งานวิจัยในช่วงปี 2022–2025 ชี้ว่า การประเมินความเสี่ยงรายบุคคล (Risk Stratification) และการพัฒนาเครื่องมือคัดกรองที่สอดคล้องกับบริบทพื้นที่ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการคัดกรองและเพิ่มอัตราการเข้าร่วมได้ [18, 19, 20] โดยเฉพาะในพื้นที่ชนบทหรือจังหวัดที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร การมีเครื่องมือประเมินความเสี่ยงที่ผ่านการตรวจสอบความ

ตรง (Validity) และความเชื่อมั่น (Reliability) อย่างเป็นระบบ จะช่วยให้สามารถจัดลำดับความสำคัญของกลุ่มเสี่ยงสูง ลดภาระการส่องกล้องที่ไม่จำเป็น และเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สาธารณสุข [21, 22] นอกจากนี้ ประเด็น CRC ยังเชื่อมโยงโดยตรงกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) โดยเฉพาะ SDG 3.4 ที่มุ่งลดการเสียชีวิตก่อนวัยอันควรจากโรคไม่ติดต่อ (NCDs) ลงหนึ่งในสามภายในปี 2030 [23] การพัฒนาโมเดลหรือเครื่องมือคัดกรองที่มีหลักฐานเชิงประจักษ์รองรับ จึงมีความสำคัญทั้งในมิติวิชาการ ระบบบริการ และเชิงนโยบายระดับประเทศ

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงไม่ได้ให้ความสำคัญเพียงการพัฒนาเครื่องมือประเมินความเสี่ยงเท่านั้น หากแต่มีบทบาทเชิงยุทธศาสตร์ในสามระดับสำคัญ ได้แก่ ระดับองค์ความรู้ทางวิชาการ ระดับระบบบริการสุขภาพ และระดับนโยบายสาธารณสุขระหว่างประเทศ 1) ในเชิงวิชาการ โครงการนี้จะสร้างหลักฐานเชิงประจักษ์ที่สะท้อนบริบทของประเทศรายได้ปานกลาง ซึ่งยังขาดข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการคัดกรองแบบอิงความเสี่ยง (Risk-Based Screening) ที่ผ่านการทดสอบอย่างเป็นระบบ การพัฒนาเครื่องมือที่มีความเที่ยงตรงและเหมาะสมเชิงวัฒนธรรมจะช่วยเติมเต็มช่องว่างองค์ความรู้ และขยายฐานข้อมูลของโลกที่ปัจจุบันยังเอนเอียงไปยังประเทศรายได้สูงเป็นหลัก งานวิจัยนี้จึงมีศักยภาพในการเป็นต้นแบบ (Model Framework) สำหรับประเทศที่มีโครงสร้างประชากรและข้อจำกัดด้านทรัพยากรคล้ายคลึงกัน 2) ในเชิงระบบบริการสุขภาพ โครงการมุ่งสร้างกลไกที่สามารถ “แปลงองค์ความรู้สู่การปฏิบัติจริง” (Translation to Practice) ได้อย่างเป็นรูปธรรม กล่าวคือ ผลการวิจัยจะไม่หยุดอยู่ที่การตีพิมพ์เชิงวิชาการ แต่สามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจในระดับหน่วยบริการปฐมภูมิ ช่วยให้บุคลากรสาธารณสุขสามารถจัดลำดับความสำคัญของผู้รับบริการตามระดับความเสี่ยง เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร และลดความสูญเสียจากการตรวจที่ไม่จำเป็น การออกแบบเช่นนี้ช่วยเชื่อมโยงงานวิจัยกับการดำเนินงานจริงในระบบสุขภาพ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของงานวิจัยเชิงนโยบายและระบบสุขภาพ (Health Systems Research) 3) ในเชิงนโยบายระดับนานาชาติ โครงการนี้สนับสนุนแนวคิดการพัฒนานโยบายสาธารณสุขบนฐานหลักฐาน (Evidence-Informed Policy) โดยเฉพาะในบริบททรัพยากรจำกัดที่จำเป็นต้องให้ความสำคัญกับความคุ้มค่าและประสิทธิภาพ การสร้างเครื่องมือคัดกรองตามระดับความเสี่ยงจะช่วยให้ประเทศสามารถปรับยุทธศาสตร์การป้องกันโรคมะเร็งจากรูปแบบทั่วไปไปสู่รูปแบบที่มุ่งเป้า (Targeted Prevention Strategy) ซึ่งสอดคล้องกับแนวทาง Global Health Equity และการลดความเหลื่อมล้ำด้านสุขภาพ ซึ่งจากข้อมูลสนับสนุนทั้งหมดล้วนมีความสำคัญของงานวิจัยฉบับนี้อยู่ที่การวางรากฐานเพื่อการลดภาระโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรงอย่างยั่งยืน ไม่เพียงลดอัตราการเสียชีวิต แต่ยังลดผลกระทบทางเศรษฐกิจ สังคม และคุณภาพชีวิตของประชากรในระยะยาว โดยเฉพาะในประเทศที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร การวิจัยครั้งนี้จึงเป็นการลงทุนเชิงโครงสร้างที่สร้างผลตอบแทนด้านสุขภาพ (Health Return on Investment) ในระยะยาว และมีศักยภาพในการขยายผลสู่ระดับภูมิภาคและนานาชาติอย่างเป็นรูปธรรม ซึ่งในภายใต้นโยบาย Service Plan สาขามะเร็ง ประเทศไทยได้ดำเนินการคัดกรองโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และลำไส้ตรงในลักษณะ “การตรวจคัดกรองเชิงรุก” โดยกำหนดกลุ่มเป้าหมายประชากรอายุ 50–70 ปี ซึ่งสอดคล้องกับหลักฐานเชิงระบาดวิทยาและแนวทางสากล [6, 9] การคัดกรองดำเนินการด้วยวิธีตรวจหาเลือดแฝงในอุจจาระด้วยชุดตรวจ Fecal Immunochemical Test (FIT) เป็นการประเมินเบื้องต้นในระดับชุมชน และในกรณีที่ผลตรวจเป็นบวก ผู้รับบริการจะได้รับการส่งต่อเข้าสู่กระบวนการวินิจฉัยด้วยการส่องกล้องลำไส้ใหญ่ (Colonoscopy) [6]

แนวทางดังกล่าวสะท้อนความสอดคล้องเชิงนโยบาย โดยมีการใช้เครื่องมือคัดกรองที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับบริบทของประเทศ รวมทั้งการจัดระบบส่งต่อและการรักษาแบบบูรณาการ [9] อย่างไรก็ตาม การขยายการคัดกรองเชิงรุกส่งผลให้จำนวนผู้ที่ได้รับการตรวจคัดกรองและตรวจพบผลบวกเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่ภาระงานที่เพิ่มขึ้นของระบบบริการสุขภาพ รวมถึงความต้องการบริการส่องกล้องลำไส้ใหญ่ที่สูงขึ้น [6, 9] สถานการณ์ดังกล่าวอาจก่อให้เกิดความแออัดของระบบบริการและระยะเวลารอคอยที่ยาวนานในบางพื้นที่ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิผลของนโยบายคัดกรองในระยะยาว [9, 14]

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาเครื่องมือประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรง สำหรับประชาชนทั่วไปอายุ 50–70 ปี ในอำเภอนามน จังหวัดกาฬสินธุ์
2. เพื่อประเมินคุณภาพของเครื่องมือด้านความตรงและความเชื่อมั่น
3. เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการจำแนกระดับความเสี่ยงของเครื่องมือ (Diagnostic Performance) โดยการวิเคราะห์ค่าความไว (Sensitivity) และค่าความจำเพาะ (Specificity) เปรียบเทียบกับเกณฑ์อ้างอิงการคัดกรองมาตรฐาน เพื่อพิจารณาความสามารถของเครื่องมือในการระบุประชากรกลุ่มเสี่ยงได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมในเชิงปฏิบัติการ
4. เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการจำแนกระดับความเสี่ยงของเครื่องมือ (Screening performance)

1. รูปแบบการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development : R&D) มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินคุณภาพของเครื่องมือประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรง สำหรับประชาชนอายุ 50–70 ปี ในพื้นที่อำเภอนามน จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยแบ่งออกเป็น 4 ระยะ ได้แก่ (1) การพัฒนาเครื่องมือ (2) การตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (3) การทดสอบความเชื่อมั่นและ (4) การประเมินประสิทธิภาพในการจำแนกระดับความเสี่ยง โดยมีระยะเวลาดำเนินงานวิจัยแบงออกเป็นสองช่วงเวลา คือ

ระยะเวลาดำเนินงานวิจัยตั้งแต่เริ่มกระบวนการวิจัยจนเสร็จสิ้น

1 ตุลาคม 2566 – 30 กันยายน 2567

การนำเครื่องมือที่ได้หลังจากกระบวนการพัฒนาไปใช้งานจริง

1 ตุลาคม 2567 – 31 ตุลาคม 2568

ระยะที่ 1 การพัฒนาเครื่องมือ

ผู้วิจัยทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบจากฐานข้อมูลวิชาการและแนวทางสากลที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยเสี่ยงและการคัดกรองโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรง โดยอ้างอิงแนวทางของ World Health Organization และ American Cancer Society เพื่อนำมากำหนดกรอบแนวคิด (Conceptual Framework) ของเครื่องมือ ซึ่งครอบคลุม 4 มิติหลัก ได้แก่ (1) ข้อมูลประชากร (2) พฤติกรรมสุขภาพ (3) ประวัติครอบครัว และ (4) อาการเตือนสำคัญ จากนั้นจัดทำข้อคำถามฉบับร่างในรูปแบบแบบประเมินคะแนนความเสี่ยง (Risk Scoring Form) ให้เหมาะสมกับบริบทบริการสุขภาพระดับปฐมภูมิ

ระยะที่ 2 การตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา

เครื่องมือฉบับร่างได้รับการประเมินความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน ประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านมะเร็งวิทยา ระบาดวิทยา และสาธารณสุข ทำการประเมินความสอดคล้องของข้อคำถามกับวัตถุประสงค์การวิจัย คำนวณค่าดัชนีความสอดคล้องของเนื้อหา (Index of Item–Objective Congruence: IOC) โดยกำหนดเกณฑ์ยอมรับที่ ≥ 0.80 และปรับปรุงแก้ไขข้อคำถามตามข้อเสนอแนะ

ระยะที่ 3 การทดสอบความเชื่อมั่น

นำเครื่องมือที่ปรับปรุงแล้วไปทดลองใช้ (Pilot Testing) กับประชาชนอายุ 50–70 ปี ในจังหวัดมหาสารคาม จำนวน 30 คน โดยวิธีการเลือกแบบสะดวก (Convenience Sampling) เพื่อประเมินความชัดเจนของภาษาและความเหมาะสมของเนื้อหา วิเคราะห์ความเชื่อมั่นภายในด้วยค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha) กำหนดเกณฑ์ยอมรับที่ ≥0.70

ระยะที่ 4 การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือ

นำเครื่องมือไปใช้ในกลุ่มประชาชนเป้าหมายที่เข้ารับการตรวจคัดกรองโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรงในพื้นที่อำเภอนามน วิเคราะห์ความสามารถในการจำแนกระดับความเสี่ยง โดยคำนวณค่าความไว (Sensitivity) และค่าความจำเพาะ (Specificity) เปรียบเทียบกับเกณฑ์อ้างอิงการคัดกรองมาตรฐาน และนำเครื่องมือไปใช้ในกลุ่มประชาชนเป้าหมายที่เข้ารับการตรวจคัดกรองโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และลำไส้ตรงในพื้นที่อำเภอนามน โดยประเมินความสามารถในการจำแนกระดับความเสี่ยงของเครื่องมือ เปรียบเทียบกับเกณฑ์อ้างอิง (Reference Standard) ดังนี้ ผลการตรวจ Fecal Immunochemical Test (FIT) ใช้เป็นเครื่องมือคัดกรองเบื้องต้น ผลการส่องกล้องลำไส้ใหญ่ (colonoscopy) ใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานสูงสุด (gold standard) สำหรับการยืนยันการวินิจฉัยในการวิเคราะห์นี้ กำหนดให้ “ภาวะมีโรค (Disease positive)” อ้างอิงจากผลการตรวจ colonoscopy ที่พบรอยโรคผิดปกติ เช่น Adenoma หรือ Colorectal Cancer และ “ภาวะไม่มีโรค (disease negative)” หมายถึงไม่พบความผิดปกติจากการส่องกล้อง จากนั้นนำผลการประเมินความเสี่ยงจากเครื่องมือมาเปรียบเทียบกับผลการวินิจฉัยดังกล่าว เพื่อคำนวณค่าความไว (Sensitivity) และค่าความจำเพาะ (Specificity) หากเหมาะสม จะนำวิเคราะห์เส้นโค้ง Receiver Operating Characteristic curve (ROC) เพื่อกำหนดจุดตัด (Cut-off Point) ที่เหมาะสม

การศึกษานี้ใช้การสุ่มตัวอย่างแบบหลายขั้นตอน (multistage sampling) ในประชากรอายุ 50–70 ปี ที่เข้ารับการคัดกรองมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรงในพื้นที่ศึกษา โดยกำหนดขนาดตัวอย่างจากสูตรของ Krejcie and Morgan สำหรับประชากรจำกัด (finite population) ซึ่งมีขนาดประชากรทั้งหมด (N) เท่ากับ 8,519 คน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.00 (χ^2 = 3.841) ค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (e) เท่ากับ 0.05 และสัดส่วนประชากร (P) เท่ากับ 0.5 ผลการคำนวณได้ขนาดตัวอย่างขั้นต่ำเท่ากับ 368 คน และเพื่อป้องกันการสูญหายของข้อมูล (attrition) ผู้วิจัยได้เพิ่มขนาดตัวอย่างอีก 10.00% ทำให้ได้ขนาดตัวอย่างรวมทั้งสิ้น 405 คน ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้

เกณฑ์คัดเข้า (Inclusion criteria)

อายุ 50–70 ปี

อาศัยอยู่ในพื้นที่ศึกษา

สมัครใจเข้าร่วมวิจัย

เกณฑ์คัดออก (Exclusion criteria)

มีประวัติมะเร็งลำไส้ใหญ่

อยู่ระหว่างการรักษาโรคร้ายแรง

ไม่สามารถให้ข้อมูลได้ครบถ้วน

2. การวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้สถิติพรรณนา ได้แก่ ความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ประเมินความตรงด้วยค่า IOC ความเชื่อมั่นด้วย Cronbach’s Alpha และประสิทธิภาพของเครื่องมือด้วยค่า Sensitivity และ Specificity โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมสถิติสำเร็จรูป

3. การพิทักษ์สิทธิ์กลุ่มตัวอย่าง

การวิจัยได้รับการรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ของสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดกาฬสินธุ์ เลขที่รับรอง KLS.REC. 530 / 2568 โดยผู้เข้าร่วมวิจัยได้รับข้อมูลรายละเอียดของการศึกษาและลงนามในหนังสือแสดงความยินยอมก่อนเข้าร่วมการวิจัย

ผลการวิจัย

1. ผลการพัฒนาเครื่องมือ

การพัฒนาเครื่องมือประเมินความเสี่ยงในครั้งนี้ดำเนินการอย่างเป็นระบบ โดยเริ่มจากการทบทวนวรรณกรรมทั้งใน และต่างประเทศรวมถึงแนวทางมาตรฐานด้านการคัดกรองและปัจจัยเสี่ยงโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรงของ World Health Organization และ American Cancer Society ร่วมกับหลักฐานเชิงประจักษ์จากงานวิจัยล่าสุด เพื่อนำมากำหนดกรอบแนวคิด (Conceptual Framework) ที่มีความครอบคลุมทั้งมิติทางชีวภาพ พฤติกรรม และบริบททางสังคมสุขภาพ

ผลจากกระบวนการสังเคราะห์องค์ความรู้ทั้งจากแนวทางสากล หลักฐานเชิงประจักษ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำให้สามารถกำหนดองค์ประกอบของเครื่องมือประเมินความเสี่ยงออกเป็น 4 มิติหลัก ซึ่งครอบคลุมปัจจัยเสี่ยงสำคัญทั้งในระดับบุคคลและครอบครัว ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1 ตารางสรุปข้อมูลเชิงปริมาณของ 4 มิติ และประสิทธิภาพการวินิจฉัยในการคัดกรองมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรง (n = 405)

ตารางที่ 1 สรุปข้อมูลเชิงปริมาณของ 4 มิติ และประสิทธิภาพการวินิจฉัยในการคัดกรองมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรง (n = 405)

มิติ	ตัวแปร	ผลลัพธ์เชิงปริมาณ	ค่าทางสถิติ
1. ข้อมูลประชากร	อายุ (ปี)	58.1 ± 5.9 (50–70)	p = 0.003*
	BMI (กก./ม²)	25.1 ± 3.8	p = 0.012*
	ผล FIT บวก	65 คน (16.00%)	–
	ผล FIT ลบ	340 คน (84.00%)	–
	อายุ (Adj.OR)	1.08 (95% CI: 1.02–1.15)	p = 0.005*
	BMI (Adj.OR)	1.12 (95% CI: 1.03–1.22)	p = 0.010*
	เพศชาย (Adj.OR)	2.31 (95% CI: 1.25–4.28)	p = 0.007*
2. พฤติกรรมสุขภาพ	การสูบบุหรี่ (Adj.OR)	2.85 (95% CI: 1.48–5.47)	p = 0.002*
3. ประวัติครอบครัว	ใช้ในแบบจำลองความเสี่ยง	ไม่ได้รายงานแยก	–
	ความเชื่อมั่นเครื่องมือ	Cronbach’s alpha = 0.87	–
	ความตรงเชิงเนื้อหา	IOC = 0.95	–
4. อาการเตือนสำคัญ	อาการทางคลินิก	10/30 ข้อ (33.30%)	–
	พฤติกรรมสุขภาพ	8/30 ข้อ (26.70%)	–
	ประวัติครอบครัว	5/30 ข้อ (16.70%)	–
	ปัจจัยอื่น	7/30 ข้อ (23.30%)	–
	ความสอดคล้องภายใน	α = 0.74–0.82	–
ประสิทธิภาพการวินิจฉัย	Sensitivity	82.50%	–
	Specificity	78.40%	–
	AUC (ROC)	0.84 (95% CI: 0.79–0.89)	–

มิติ	ตัวแปร	ผลลัพธ์เชิงปริมาณ	ค่าทางสถิติ
	True Positive	54 คน (13.30%)	–
	False Positive	74 คน (18.30%)	–
	True Negative	266 คน (65.70%)	–
	False Negative	11 คน (2.70%)	–

*หมายเหตุ: ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean ± SD) หรือจำนวน (ร้อยละ); Adj.OR = adjusted odds ratio จากการวิเคราะห์ถดถอยโลจิสติกพหุคูณ (multivariable logistic regression); 95% CI = ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95; FIT = fecal immunochemical test; BMI = body mass index; AUC = area under the receiver operating characteristic curve; IOC = index of item–objective congruence; *p < 0.05 แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

1) มิติด้านข้อมูลประชากร (Demographic Characteristics)

มิตินี้ครอบคลุมปัจจัยพื้นฐานที่มีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรง โดยจากผลการศึกษาในกลุ่มตัวอย่างจำนวน 405 คน พบว่าอายุเฉลี่ยเท่ากับ 58.1 ± 5.9 ปี ซึ่งอยู่ในช่วงวัยเสี่ยง (50–70 ปี) และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มที่มีผลตรวจ FIT บวกและลบ โดยกลุ่ม FIT บวกมีอายุเฉลี่ยสูงกว่า (60.4 เทียบกับ 57.6 ปี, p = 0.003) สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ถดถอยโลจิสติกพหุคูณที่พบว่า อายุที่เพิ่มขึ้นทุก 1 ปี ส่งผลให้ความเสี่ยงเพิ่มขึ้น 8% (Adj.OR = 1.08; 95% CI: 1.02–1.15) ในส่วนของดัชนีมวลกาย (BMI) พบค่าเฉลี่ย 25.1 ± 3.8 kg/m² และมีความแตกต่างระหว่างกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญ (p = 0.012) โดย BMI ที่เพิ่มขึ้นทุก 1 หน่วย ส่งผลให้ความเสี่ยงเพิ่มขึ้น 12.00% (Adj.OR = 1.12; 95% CI: 1.03–1.22) นอกจากนี้ เพศชายมีความเสี่ยงสูงกว่าเพศหญิงอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีโอกาสเกิดผล FIT บวกสูงกว่า 2.31 เท่า (Adj.OR = 2.31; 95% CI: 1.25–4.28; p = 0.007) เมื่อพิจารณาผลการคัดกรอง พบความชุกของผล FIT บวกเท่ากับ 16.00% (65/405) และผลลบ 84.00% (340/405) สะท้อนให้เห็นถึงภาระโรคในกลุ่มประชากรเป้าหมายอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ การรวมตัวแปรด้านระดับการศึกษาและสถานะทางเศรษฐกิจ ยังมีบทบาทสำคัญในการอธิบายความแตกต่างของพฤติกรรมสุขภาพและการเข้าถึงบริการคัดกรองในระดับประชากร

2) มิติด้านพฤติกรรมสุขภาพ (Health Behaviors)

มิตินี้มุ่งเน้นการประเมินปัจจัยเสี่ยงที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า “พฤติกรรมการสูบบุหรี่” เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงที่สุดในแบบจำลอง โดยผู้ที่มีประวัติสูบบุหรี่มีความเสี่ยงต่อการมีผล FIT บวกเพิ่มขึ้นถึง 2.85 เท่า (Adj.OR = 2.85; 95% CI: 1.48–5.47; p = 0.002) ผลการศึกษาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าพฤติกรรมสุขภาพมีบทบาทสำคัญในการกำหนดความเสี่ยงของโรค โดยเฉพาะพฤติกรรมเสี่ยงที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ เช่น การสูบบุหรี่ การบริโภคอาหาร และการมีกิจกรรมทางกาย ซึ่งการบูรณาการปัจจัยเหล่านี้ในเครื่องมือไม่เพียงช่วยประเมินความเสี่ยง แต่ยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการส่งเสริมสุขภาพและป้องกันโรคในระดับปฐมภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3) มิติด้านประวัติครอบครัว (Family History)

มิตินี้เน้นการประเมินความเสี่ยงทางพันธุกรรมจากประวัติครอบครัว แม้ว่าผลการศึกษานี้จะไม่ได้รายงานค่าปริมาณเชิงสถิติของตัวแปรนี้แยกเป็นรายตัว แต่ได้ถูกรวมเป็นองค์ประกอบสำคัญในเครื่องมือประเมินความเสี่ยง ซึ่งผ่านการตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือ พบว่ามีความตรงเชิงเนื้อหาในระดับสูง (IOC = 0.95) และมีความเชื่อมั่นโดยรวมอยู่ในระดับดีมาก (Cronbach’s alpha = 0.87) ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ตัวแปรด้านประวัติครอบครัวมีความสอดคล้องกับโครงสร้างของเครื่องมือ และมีบทบาทสำคัญในการช่วยจำแนกกลุ่มเสี่ยงสูงที่อาจต้องได้รับการคัดกรองที่เข้มข้นมากขึ้น

4) มิติด้านอาการเตือนสำคัญ (Warning Signs and Symptoms)

มิตินี้ครอบคลุมการประเมินอาการเตือนที่เกี่ยวข้องกับพยาธิสภาพของลำไส้ใหญ่ โดยพบว่าในโครงสร้างของเครื่องมือ องค์ประกอบด้านอาการมีสัดส่วนมากที่สุด คือ 10 จาก 30 ข้อ (33.30%) รองลงมาคือพฤติกรรมสุขภาพ 26.70%, ปัจจัยอื่น 23.30% และประวัติครอบครัว 16.70% ในด้านความเชื่อมั่นของเครื่องมือรายมิติ พบว่าอยู่ในช่วง Cronbach's alpha = 0.74–0.82 และมีค่าเฉลี่ยรวม 0.85 แสดงถึงความสอดคล้องภายในในระดับดี นอกจากนี้ การรวมมิติด้านอาการเตือนยังส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องมือ โดยพบว่าเครื่องมือมีค่าความไว (Sensitivity = 82.50%) และความจำเพาะ (Specificity = 78.40%) อยู่ในระดับดี และมีค่า AUC เท่ากับ 0.84 (95% CI: 0.79–0.89) เมื่อพิจารณาจาก confusion matrix พบว่าเครื่องมือสามารถจำแนกผู้ป่วยได้ถูกต้อง โดยมี True positive 13.30%, True negative 65.70%, False positive 18.30% และ False negative เพียง 2.70% ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการคัดกรองและความสามารถในการลดการพลาดการวินิจฉัยในระดับที่เหมาะสม

ผลการนำเครื่องมือที่พัฒนาแล้วไปใช้ (Implementation Outcomes)

การนำเครื่องมือที่ได้จากการพัฒนาหลังการกระบวนการวิจัยเสร็จสิ้น 1 ตุลาคม 2567 – 31 ตุลาคม 2568 ภายหลังการพัฒนาและตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือประเมินความเสี่ยงโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรงแล้ว ได้นำเครื่องมือไปทดลองใช้ในกลุ่มประชากรเป้าหมายในระดับพื้นที่ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง (Feasibility) ความยอมรับของผู้ใช้ (Acceptability) และประโยชน์เชิงระบบบริการ (Practical Utility) โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ (Feasibility)

ผลการทดลองใช้พบว่าเครื่องมือสามารถดำเนินการได้ภายในระยะเวลาเฉลี่ยที่เหมาะสม (ประมาณ 5–10 นาทีต่อราย) ไม่สร้างภาระงานเพิ่มมากเกินไปแก่บุคลากรสาธารณสุข และสามารถบูรณาการเข้ากับขั้นตอนการให้บริการคัดกรองเดิมได้ บุคลากรสามารถอธิบายและใช้เครื่องมือได้โดยไม่ต้องผ่านการฝึกอบรมที่ซับซ้อน เนื่องจากโครงสร้างคำถามมีความชัดเจน เข้าใจง่าย และสอดคล้องกับบริบทของประชาชนในพื้นที่ จากการทดลองใช้ในประชากรเป้าหมาย (n = 405) พบว่าเครื่องมือมีค่าเฉลี่ยคะแนนความเป็นไปได้ (Feasibility score) อยู่ในระดับสูง โดยใช้เวลาประเมินเฉลี่ยประมาณ 5–10 นาทีต่อราย ซึ่งสอดคล้องกับภาระงานปกติของบริการสุขภาพระดับปฐมภูมิ และไม่ก่อให้เกิดภาระงานเพิ่มเติมอย่างมีนัยสำคัญต่อบุคลากรสาธารณสุข นอกจากนี้ โครงสร้างของเครื่องมือมีความชัดเจน เข้าใจง่าย สามารถอธิบายและใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านการฝึกอบรมที่ซับซ้อน ส่งผลให้บุคลากรสามารถนำไปใช้ได้ทันทีในสถานการณ์จริง อีกทั้งยังสามารถบูรณาการเข้ากับขั้นตอนการคัดกรองเดิม เช่น การซักประวัติและการให้บริการตรวจ FIT ได้อย่างราบรื่นในเชิงปฏิบัติ เครื่องมือยังช่วยลดระยะเวลาในการตัดสินใจคัดกรอง เพิ่มความเป็นระบบในการประเมินความเสี่ยง และเอื้อต่อการให้บริการในพื้นที่ที่มีทรัพยากรจำกัด เช่น หน่วยบริการปฐมภูมิหรือชุมชนชนบท สะท้อนถึงความเหมาะสมและความยั่งยืนในการนำไปใช้จริงในระบบบริการสุขภาพต่อไป

2. ความยอมรับของผู้รับบริการ (Acceptability)

ประชาชนกลุ่มเป้าหมายให้ความร่วมมือในการตอบแบบประเมินในระดับดี โดยพบว่าผู้รับบริการร้อยละ 85.00 มีความพึงพอใจต่อการใช้เครื่องมือในระดับดี เนื่องจากคำถามไม่ซับซ้อน เข้าใจง่าย และเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมสุขภาพในชีวิตประจำวัน การมีเครื่องมือช่วยประเมินความเสี่ยงยังส่งผลให้ผู้รับบริการเกิดความตระหนักรู้ด้านความเสี่ยง (Risk Awareness) เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกลุ่มที่ถูกจัดอยู่ในระดับความเสี่ยงปานกลางถึงสูง ซึ่งมีแนวโน้มตัดสินใจเข้ารับการตรวจคัดกรองเพิ่มเติม เช่น FIT หรือ Colonoscopy มากขึ้น สะท้อนถึงความเป็นไปได้ในการนำเครื่องมือไปใช้จริงในระดับชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. ประสิทธิผลเชิงระบบบริการ (Service-Level Impact)

การใช้เครื่องมือช่วยให้บุคลากรสามารถจัดลำดับความสำคัญ (Prioritization) ของกลุ่มเป้าหมายได้ชัดเจนขึ้น โดยเฉพาะในบริบทที่ทรัพยากรมีจำกัด เช่น จำนวนชุดตรวจ FIT หรือคิวส่องกล้อง กลุ่มที่ได้รับการจัดเป็นความเสี่ยงสูงได้รับการส่งต่อเพื่อการตรวจเพิ่มเติมอย่างเหมาะสม ส่งผลให้กระบวนการคัดกรองมีความเป็นระบบมากขึ้น และลดความแออัดของการตรวจในกลุ่มความเสี่ยงต่ำ ผลการศึกษาพบว่าการจัดลำดับความสำคัญ (prioritization) ของกลุ่มเป้าหมาย ทำให้กลุ่มที่ได้รับการจัดเป็นความเสี่ยงสูงมีอัตราการตรวจพบความผิดปกติทางคลินิกสูงกว่ากลุ่มทั่วไปประมาณ 6.1 เท่า (ร้อยละ 16.0 เทียบกับ ร้อยละ 2.70) นอกจากนี้ยังช่วยลดภาระงานในสถานพยาบาลระดับตติยภูมิจากการคัดกรองกลุ่มเสี่ยงต่ำออกไปได้อย่างเป็นระบบ โดยพบว่าสัดส่วนผู้ที่ไม่จำเป็นต้องส่งต่อมีสูงถึง ร้อยละ **65.70** ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยระยะเวลารอคอย (wait time) ของผู้ป่วยที่มีความจำเป็นเร่งด่วนมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนถึงความคุ้มค่า (Value-Based Healthcare) ในการนำเครื่องมือไปประยุกต์ใช้ในระดับนโยบายและระบบบริการสุขภาพต่อไป

4. ผลต่อการตัดสินใจเชิงพฤติกรรม (Behavioral Impact)

เครื่องมือไม่ได้ทำหน้าที่เพียงเป็นแบบคัดกรอง แต่ยังทำหน้าที่เป็น “เครื่องมือสื่อสารความเสี่ยง” (Risk Communication Tool) ที่ช่วยให้ประชาชนเข้าใจระดับความเสี่ยงของตนเองอย่างเป็นรูปธรรม การรับรู้ความเสี่ยงส่วนบุคคล (Perceived Susceptibility) ที่เพิ่มขึ้นมีส่วนช่วยกระตุ้นแรงจูงใจในการเข้ารับบริการ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด Health Belief Model ที่ชี้ว่าการรับรู้ความเสี่ยงเป็นปัจจัยสำคัญต่อพฤติกรรมการป้องกันโรค

5. ความเหมาะสมเชิงบริบท (Contextual Appropriateness)

เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นออกแบบโดยอิงข้อมูลประชากรไทยและบริบทบริการปฐมภูมิ จึงมีความเหมาะสมกับระบบสุขภาพระดับอำเภอหรือจังหวัด ต่างจากโมเดลทำนายความเสี่ยงจากต่างประเทศที่อาจต้องใช้ข้อมูลทางชีวภาพหรือฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ขั้นสูง เครื่องมือนี้สามารถใช้ได้แม้ในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านเทคโนโลยี

6. ศักยภาพการขยายผล (Scalability)

จากผลการทดลองใช้ พบว่าเครื่องมือมีศักยภาพในการขยายผลไปยังพื้นที่อื่น โดยเฉพาะในระบบบริการสาธารณสุขระดับปฐมภูมิ ในอนาคตสามารถพัฒนาเป็นรูปแบบดิจิทัล (Digital Screening Tool) หรือเชื่อมต่อกับระบบ HDC/ฐานข้อมูลสุขภาพ เพื่อสนับสนุนการคัดกรองเชิงรุกในระดับจังหวัดหรือระดับประเทศ

อภิปรายผล

ผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือประเมินความเสี่ยงมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรงที่พัฒนาขึ้นมีคุณภาพอยู่ในระดับน่าพอใจ ทั้งด้านความตรงเชิงเนื้อหา ความเชื่อมั่นภายใน และความสามารถในการจำแนกระดับความเสี่ยง ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนา Risk Prediction Model และ Risk-Adapted Screening Strategy ที่ได้รับการสนับสนุนในวรรณกรรมวิชาการระยะหลัง [24,25,26] หลักฐานเชิงประจักษ์ระดับนานาชาติชี้ว่า การพัฒนาแบบจำลองความเสี่ยงที่รวมตัวแปรหลายมิติ เช่น อายุ เพศ ดัชนีมวลกาย พฤติกรรมการสูบบุหรี่ การบริโภคอาหาร การออกกำลังกาย และประวัติครอบครัว สามารถเพิ่มความแม่นยำในการจำแนกระดับความเสี่ยงได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับโมเดลที่ใช้ตัวแปรพื้นฐานเพียงอย่างเดียว [24, 27] แนวคิดการคัดกรองแบบปรับตามระดับความเสี่ยง (Risk-Stratified Screening) ยังได้รับการเสนอว่าเป็นกลยุทธ์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิผลของระบบคัดกรองในระดับประชากร และเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สาธารณสุข [25, 6] ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้าง 4 มิติของเครื่องมือในการศึกษาครั้งนี้ ที่รวมข้อมูลประชากร พฤติกรรมสุขภาพ ประวัติครอบครัว และอาการเตือน ในบริบทของเอเชีย งานวิจัยล่าสุดเกี่ยวกับการจัดกลุ่มความเสี่ยงสำหรับการคัดกรอง Colorectal Cancer (CRC) รายงานว่า การสร้าง Risk score จากข้อมูลเชิงพฤติกรรมร่วมกับข้อมูลทางคลินิกสามารถช่วยจำแนกกลุ่มเสี่ยงสูงเพื่อส่งต่อการตรวจ Colonoscopy ได้แม่นยำขึ้น แม้ค่า C-statistic จะอยู่ในระดับปานกลาง แต่มีความสำคัญเชิงระบบบริการ

เนื่องจากช่วยลดภาระการส่องกล้องที่ไม่จำเป็นในประชากรขนาดใหญ่ [27, 9] ผลดังกล่าวสนับสนุนแนวคิดว่าการบูรณาการตัวแปรหลายด้านในเครื่องมือประเมินความเสี่ยงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการคัดกรองได้ สำหรับประเทศไทย แม้งานพัฒนา Risk Prediction Tool โดยตรงยังมีจำนวนจำกัด แต่มีหลักฐานจากงานวิจัยด้านการเข้าถึงบริการและผลลัพธ์ของการคัดกรองที่สนับสนุนความสำคัญของปัจจัยพฤติกรรมและบริบทบริการสุขภาพ การศึกษาระดับประเทศเกี่ยวกับการเข้าถึงการคัดกรอง Colorectal Cancer (CRC) ในประชากรกลุ่มเสี่ยงเฉลี่ย พบว่าอัตราการเข้ารับการตรวจยังอยู่ในระดับปานกลาง และปัจจัยสำคัญที่สัมพันธ์กับการเข้าร่วม ได้แก่ การได้รับข้อมูลข่าวสาร การรับรู้ความเสี่ยง และการสนับสนุนจากบุคลากรสาธารณสุข [28] นอกจากนี้ รายงานผลการดำเนินงานคัดกรองของระบบสาธารณสุขไทยยังสะท้อนความท้าทายด้านความครอบคลุมและการติดตามผลหลัง FIT positive ซึ่งชี้ถึงความจำเป็นของเครื่องมือช่วยจัดลำดับความเสี่ยงอย่างเป็นระบบ [29]

ข้อมูลภาระโรคจาก GLOBOCAN 2022 ยังยืนยันว่า เป็นหนึ่งในมะเร็งที่มีอุบัติการณ์สูงในประเทศไทย [28] เมื่อพิจารณาร่วมกับแนวโน้มการใช้เทคโนโลยีดิจิทัลและระบบสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกในระบบบริการสุขภาพ [23, 29] การพัฒนาเครื่องมือประเมินความเสี่ยงที่สามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในระดับชุมชนจึงมีความสำคัญเชิงยุทธศาสตร์ ทั้งในมิติการเพิ่มอัตราการคัดกรอง การจัดลำดับความสำคัญของกลุ่มเสี่ยง และการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ
การศึกษานี้มีจุดเด่นในการพัฒนาเครื่องมือประเมินความเสี่ยงมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรงแบบบูรณาการ 4 มิติ ได้แก่ ข้อมูลประชากร พฤติกรรมสุขภาพ ประวัติครอบครัว และอาการเตือนสำคัญ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยเดิมที่มักเน้นเฉพาะปัจจัยด้านใดด้านหนึ่ง โดยการผสานทั้งปัจจัยที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ (เช่น อายุ เพศ) และปัจจัยที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ (เช่น พฤติกรรมสุขภาพ) ร่วมกับข้อมูลทางคลินิก ส่งผลให้สามารถจำแนกความเสี่ยงได้ครอบคลุมและเหมาะสมกับบริบทชุมชนมากยิ่งขึ้น ในด้านประสิทธิภาพของเครื่องมือ พบว่ามีค่า Sensitivity เท่ากับ 82.5% และ Specificity เท่ากับ 78.4% โดยมีค่า AUC เท่ากับ 0.84 ซึ่งอยู่ในระดับดี สะท้อนถึงความสามารถในการจำแนกผู้ที่มีความเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของเครื่องมือคัดกรองทางสาธารณสุข ค่าดังกล่าวถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และมีศักยภาพในการนำไปใช้จริง โดยเฉพาะการลดโอกาสการพลาดการตรวจพบ (False Negative) ซึ่งพบในสัดส่วนต่ำ ด้านความเชื่อมั่นของเครื่องมือ พบว่ามีค่า Cronbach's alpha เท่ากับ 0.87 และรายมิติอยู่ในช่วง 0.74–0.82 ซึ่งอยู่ในระดับดีถึงดีมากตามเกณฑ์มาตรฐาน (≥0.70) แสดงถึงความสอดคล้องภายในของเครื่องมือ ขณะที่ค่าความตรงเชิงเนื้อหา (IOC = 0.95) อยู่ในระดับสูงมาก สะท้อนถึงความเหมาะสมของข้อคำถามในการวัดตัวแปรที่ต้องการศึกษา จากการศึกษายังพบว่าผลการศึกษายังมีความสอดคล้องกับนโยบายการคัดกรองมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรงของ สำนักงานหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ ซึ่งสนับสนุนการใช้การตรวจ FIT ในประชากรกลุ่มอายุ 50–70 ปี โดยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยคัดกรองเชิงรุก จัดลำดับความเสี่ยงและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรในระบบบริการสุขภาพระดับปฐมภูมิได้

โดยสรุป เครื่องมือนี้มีทั้งความแม่นยำและความน่าเชื่อถือในระดับที่เหมาะสม พร้อมทั้งมีความสอดคล้องเชิงนโยบาย จึงมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสนับสนุนการคัดกรองและป้องกันมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรงในระดับชุมชนและระดับประเทศต่อไป

ข้อจำกัดของการวิจัย (Expanded Version)

แม้ว่าการศึกษานี้จะมีความเข้มแข็งด้านกระบวนการพัฒนาเครื่องมือ การตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้เชี่ยวชาญ และการทดสอบความเชื่อมั่นเชิงสถิติ แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดเชิงระเบียบวิธีและบริบทที่ควรพิจารณาอย่างรอบคอบ ดังนี้

1. ข้อจำกัดด้านรูปแบบการศึกษา (Study Design Limitation)

การวิจัยนี้ใช้รูปแบบการศึกษาแบบภาคตัดขวาง (Cross-Sectional Study) ซึ่งเก็บข้อมูลในช่วงเวลาเดียว ส่งผลให้ไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์เชิงเหตุและผล (Causal Inference) ได้อย่างชัดเจน แม้จะพบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเสี่ยงกับระดับความเสี่ยงหรือผลการคัดกรอง แต่ไม่สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยดังกล่าวเป็นสาเหตุโดยตรงของการเกิดโรค

นอกจากนี้ การไม่ติดตามผลในระยะยาวยังทำให้ไม่สามารถประเมิน predictive validity ของเครื่องมือได้อย่างสมบูรณ์ กล่าวคือ ยังไม่สามารถยืนยันได้ว่ากลุ่มที่ถูกจัดเป็น “เสี่ยงสูง” จะพัฒนาเป็นโรคในอนาคตมากกว่ากลุ่มเสี่ยงต่ำจริงหรือไม่ ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญสำหรับเครื่องมือทำนายความเสี่ยง

2. ข้อจำกัดด้านตัวแปรที่รวมในโมเดล (Model Specification Limitation)

เครื่องมือประเมินความเสี่ยงในงานวิจัยนี้เน้นปัจจัยประชากรศาสตร์และพฤติกรรมสุขภาพเป็นหลัก ยังไม่ได้รวมตัวแปรทางชีวภาพ (Biomarkers) เช่น ระดับInflammatory Markers, Genetic Polymorphisms หรือ Microbiome Profile ซึ่งมีหลักฐานเพิ่มขึ้นว่ามีบทบาทต่อความเสี่ยง Colorectal Cancer (CRC) การไม่รวมตัวแปรดังกล่าวอาจทำให้ความสามารถในการจำแนก (Discrimination Ability) ของโมเดลอยู่ในระดับปานกลาง และยังมีโอกาสเกิด Residual Confounding จากปัจจัยที่ไม่ได้วัด

3. ข้อจำกัดด้านการตรวจสอบความเที่ยงตรงภายนอก (External Validation)

แม้เครื่องมือจะผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) และความเชื่อมั่นภายใน (Internal Consistency Reliability) แล้ว แต่ยังไม่ได้ทดสอบในประชากรอิสระ (Independent Dataset) หรือพื้นที่อื่นการขาดการทดสอบแบบ External Validation อาจทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องมือสูงเกินจริงในกลุ่มตัวอย่างปัจจุบัน (Overfitting) และยังไม่สามารถยืนยันความเสถียรของโมเดลในบริบทที่แตกต่างกัน

4. ข้อจำกัดด้านพลังอำนาจทางสถิติ (Statistical Power)

แม้ว่าจะมีการคำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่างตามสูตรมาตรฐาน แต่หากจำนวนผู้ที่มีผลตรวจผิดปกติหรืออยู่ในกลุ่มเสี่ยงสูงมีสัดส่วนค่อนข้างน้อย อาจทำให้การวิเคราะห์บางตัวแปรมีพลังอำนาจทางสถิติ (Statistical Power) ไม่เพียงพอ โดยเฉพาะในการวิเคราะห์พหุคูณ (Multivariable Analysis)

5. ข้อจำกัดด้านบริบทเชิงระบบบริการ (Health System Context)

ผลการศึกษาอาจได้รับอิทธิพลจากนโยบายการคัดกรองระดับประเทศ การรณรงค์ในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูล หรือความพร้อมของบุคลากรสาธารณสุขในพื้นที่ ซึ่งอาจทำให้ระดับความตระหนักและพฤติกรรมการคัดกรองแตกต่างจากช่วงเวลาอื่น ดังนั้น การตีความผลควรคำนึงถึงบริบทเชิงระบบสุขภาพในช่วงเวลาที่ศึกษา

จากข้อมูลข้างต้นถึง แม้งานวิจัยนี้มีความเข้มแข็งด้านกระบวนการพัฒนาเครื่องมือและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านการออกแบบการศึกษา ความเป็นตัวแทนของกลุ่มตัวอย่าง การใช้ข้อมูลรายงานตนเอง และการขาดการตรวจสอบภายนอก ซึ่งอาจส่งผลต่อการตีความและการประยุกต์ใช้ผลลัพธ์ในระดับนโยบาย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากหลายภาคส่วน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัย ทั้งให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะเชิงวิชาการตลอดกระบวนการวิจัย รวมถึงบุคลากรสาธารณสุขในพื้นที่ศึกษา และประชาชนกลุ่มตัวอย่างทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล

ขอขอบคุณหน่วยงานต้นสังกัดผู้อำนวยการโรงพยาบาลนามน จังหวัดกาฬสินธุ์ และโรงพยาบาลเชียงยืน จังหวัดมหาสารคาม ที่เอื้ออำนวยทรัพยากรและการสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ท้ายที่สุดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณครูสมเกียรติ - คุณครูเพ็ญศรี วรรณจักร ครอบครัวที่อบอุ่น และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจเสมอมาคุณค่าและประโยชน์ใด ๆ งานวิจัยธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการดำเนินงาน ส่วนข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้น ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้

เอกสารอ้างอิง

1. International Agency for Research on Cancer. GLOBOCAN 2022: World fact sheet [Internet]. Lyon (France): International Agency for Research on Cancer; 2024 [cited 2026 Feb 27]. Available from: https://gco.iarc.who.int/media/globocan/factsheets/populations/900-world-fact-sheet.pdf
2. Bray F, Laversanne M, Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Soerjomataram I, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. CA Cancer J Clin. 2024; 74(3): 229-263. https://acsjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.3322/caac.21834
3. International Agency for Research on Cancer (IARC). Cancer Today: Absolute numbers, population mode [Internet]. Lyon (France): IARC; [cited 2026 Feb 27]. Available from: https://gco.iarc.fr/today/en/dataviz/pie?mode=population&group_populations=0
4. สำนักงานสถิติแห่งชาติ (Thailand). Statistical yearbook Thailand 2024 [Internet]. Bangkok: National Statistical Office; [cited 2026 Feb 27]. Available from: https://www.nso.go.th/public/e-book/Statistical-Yearbook/SYB-2024/281/
5. Ministry of Public Health (TH), Strategy and Planning Division. Public health statistics A.D. 2024 [Internet]. Nonthaburi: Ministry of Public Health; 2024 [cited 2026 Feb 27]. Available from: https://planning.anamai.moph.go.th/th
6. Phamornpon S, Tankumpuan T, Utriyaprasit K, Iramaneerat C. The access to colorectal cancer screening in Thai average-risk population: a situational study. BMC Health Serv Res. 2025; 25: 1164. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40890762/
7. Khuhaprema T, Srivatanakul P, Attasara P, et al. Cancer in Thailand Vol. IX (2013–2015). Bangkok: National Cancer Institute Thailand; 2018.
8. Lohsiriwat V, Chaisomboon N, Pattana-Arun J; Society of Colorectal Surgeons of Thailand. Current colorectal cancer in Thailand. Ann Coloproctol. 2020; 36(2): 78-82. https://doi.org/10.3393/ac.2020.01.07
9. Tiankanon K, Aniwan S, Rerknimitr R. Current status of colorectal cancer and its public health burden in Thailand. Clin Endosc. 2021; 54(4): 499–504. https://www.e-ce.org/journal/view.php?doi=10.5946/ce.2020.245-IDEN
10. National Cancer Institute Thailand. Cancer in Thailand Vol. XI, 2019–2021 [Internet]. Bangkok (TH): Department of Medical Services, Ministry of Public Health; 2025. p. 30–32. Available from: https://nci.go.th/files/cancer_stat/1771382030_file.pdf

11. World Health Organization. Noncommunicable diseases [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2024 [cited 2026 Feb 27]. Available from: https://www.who.int/health-topics/noncommunicable-diseases#tab=tab_1
12. Imperiale TF, Ransohoff DF, Itzkowitz SH, Levin TR, Lavin P, Lidgard GP, et al. Multitarget stool DNA testing for colorectal-cancer screening. N Engl J Med. 2014; 370(14): 1287-1297. https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMoa1311194
13. Davidson KW, Barry MJ, Mangione CM, Cabana M, Caughey AB, Davis EM, et al. Screening for Colorectal Cancer: US Preventive Services Task Force Recommendation Statement. JAMA. 2021; 325(19): 1965-1977. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34003218/
14. Saengow U, Chongsuvivatwong V, Geater A, Birch S. Preferences and acceptance of colorectal cancer screening in Thailand. Asian Pac J Cancer Prev. 2015; 16(6): 2269-2276. https://doi.org/10.7314/APJCP.2015.16.6.2269
15. เพียงหทัย อินกัน, จุฑาทิพ ทั่งทอง, สมบัติ แทนประเสริฐสุข, ธนะศักดิ์ แก้วชมภู, สัญญา วาสพกานต์, ประภาพร จันทร์เพ็ชร์ และคณะ. สถานการณ์ผู้ป่วยโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และไส้ตรงในระบบหลักประกันสุขภาพแห่งชาติของประเทศไทย ปีงบประมาณ 2547–2564. วารสารควบคุมโรค. 2567; 50(3): 513-525. https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail/10.14456%2Fdcj.2024.41
16. Hatamian S, Hadavandsiri F, Momenimovahed Z, Salehiniya H. Barriers and facilitators of colorectal cancer screening in Asia. Ecancermedicalscience. 2021; 15: 1285. https://doi.org/10.3332/ecancer.2021.1285
17. Sekhon HK, Singh I, Lal N, Majeed A, Pawa N. A systematic review of ethnic disparities in the uptake of colorectal cancer screening. Perspect Public Health. 2023;143(2):105-120. https://doi.org/10.1177/17579139221093153
18. Brück CC, Mwangi LW, van Wifferen F, Hsu L, Thomas M, Peters U. Risk-based screening for early detection of colorectal cancer: an overview. Best Pract Res Clin Gastroenterol. 2026; 80: 102014. https://doi.org/10.1016/j.bpg.2025.102014
19. Zheng S, Schrijvers JJA, Greuter MJW, Kats-Ugurlu G, Lu W, de Bock GH. Effectiveness of colorectal cancer (CRC) screening on all-cause and CRC-specific mortality reduction: a systematic review and meta-analysis. Cancers (Basel). 2023; 15(7): 1948. https://doi.org/10.3390/cancers15071948
20. Siegel RL, Kratzer TB, Giaquinto AN, Sung H, Jemal A. Cancer statistics, 2025. CA Cancer J Clin. 2025; 75(1): 10-45. https://doi.org/10.3322/caac.21871
21. Atkin W, Wooldrage K, Parkin DM, Kralj-Hans I, MacRae E, Shah U, Duffy S, Cross AJ. Long term effects of once-only flexible sigmoidoscopy screening after 17 years of follow-up: the UK Flexible Sigmoidoscopy Screening randomised controlled trial. Lancet. 2017; 389(10076): 1299-1311. https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(17)30396-3/fulltext

22. Wagener R, Brandes D, Jung M, Huetzen MA, Bergmann AK, Panier S, Picard D, Fischer U, Jachimowicz RD, Borkhardt A, Brozou T. Optical genome mapping identifies structural variants in potentially new cancer predisposition candidate genes in pediatric cancer patients. Int J Cancer. 2024; 154(4): 607-614. https://doi.org/10.1002/ijc.34721
23. United Nations. The Sustainable Development Goals Report 2024. New York: United Nations; [cited 2026 Feb 27]. Available from: https://unstats.un.org/sdgs/report/2024
24. Cooper JA, Parsons N, Stinton C, Mathews C, Smith S, Halloran SP, et al. Risk-adjusted colorectal cancer screening using the FIT and routine screening data: development of a risk prediction model. Br J Cancer. 2018; 118(2): 285-293. https://www.nature.com/articles/bjc2017375
25. Ladabaum U, Dominitz JA, Kahi C, Schoen RE. Strategies for colorectal cancer screening. Gastroenterology. 2020; 158(2): 418-432. https://www.gastrojournal.org/article/S0016-5085(19)41185-2/fulltext
26. Naber SK, Kundu S, Kuntz KM, Dotson WD, Williams MS, Zauber AG, Calonge N, Zallen DT, Ganiats TG, Webber EM, Goddard KAB, Henrikson NB, van Ballegooijen M, Janssens ACJW, Lansdorp-Vogelaar I. Cost-Effectiveness of Risk-Stratified Colorectal Cancer Screening Based on Polygenic Risk: Current Status and Future Potential. JNCI Cancer Spectr. 2020; 4(1): pkz086. https://doi.org/10.1093/jncics/pkz086
27. Wu S, Zhang Y, Lin Z, Wei M, et al. Global burden of colorectal cancer in 2022 and projections to 2050: incidence and mortality estimates from GLOBOCAN. BMC Cancer. 2025; 25: 1770. https://link.springer.com/article/10.1186/s12885-025-15138-0
28. Bray F, Laversanne M, Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Soerjomataram I, Jemal A. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. CA Cancer J Clin. 2024; 74(3): 229-263. https://doi.org/10.3322/caac.21834
29. World Health Organization. Global health estimates 2024: cancer mortality and burden of disease [Internet]. Geneva: World Health Organization; [cited 2026 Feb 27]. Available from: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death

บทความวิจัย (Research Article)

การประเมินสมรรถนะระบบอบแห้งวัตถุดิบผลิตเครื่องดนตรีอีสานด้วยพลังงานความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ กรณีศึกษา บ้านท่าเรือ อำเภอนาหว้า จังหวัดนครพนม

Performance Evaluation of a Drying System for Isan Musical Instrument Raw Materials Using Waste Heat from Air Conditioners: A Case Study of Ban Tha Ruea, Na Wa District, Nakhon Phanom Province.

อาทิตย์ ศิริสวัสดิ์[1*] และ เอนก นรสาร[2]
Artit Sirisawad[1*] and Anek Norrasarn[2]
[1]สาขาวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม
[1]Automotive Technology Si Songkhram College of Industrial Technology Nakhon Phanom University
[2]สาขาวิชาช่างไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม
[2]Electrical Technician Si Songkhram College of Industrial Technology Nakhon Phanom University
*Corresponding author; email: artit@npu.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
6 มีนาคม 2569	24 เมษายน 2569	25 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคในการประเมินสมรรถนะระบบอบแห้งวัตถุดิบผลิตเครื่องดนตรีอีสานด้วยพลังงานความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ กรณีศึกษา บ้านท่าเรือ อำเภอนาหว้า จังหวัดนครพนม ที่ใช้สารทำความเย็น R-32 ซึ่งเป็นสารทำความเย็น โดยชุดตู้อบแห้งประกอบไปด้วยระบบทำความเย็นแบบอัดไอขนาด 36,000 บีทียูต่อชั่วโมง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและเปลือก และแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ การทดลองใช้น้ำอัตราการไหล 15, 20 และ 25 ลิตรต่อนาที และอากาศอัตราการไหล 1.10 กิโลกรัมต่อวินาที ในการทดลองเพื่อหาสมรรถนะของตู้อบแห้ง โดยจะใช้ไม้ในการผลิตเครื่องดนตรีอีสาน จำนวน 10 กิโลกรัม มาทำการอบแห้ง ให้ได้ไม้ในการผลิตเครื่องดนตรีอีสาน จำนวน 4.45 กิโลกรัม มีความชื้นลดลง ร้อยละ 15 มาตรฐานแห้ง การเปิด/ปิดอุปกรณ์ตามอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ในระบบระบายความร้อนด้วยน้ำใช้เวลาในการอบแห้ง 76 ชั่วโมง ที่อัตราการไหล 15 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิภายในตู้อบเฉลี่ย 40.70 องศาเซลเซียส และระบบระบายความร้อนด้วยอากาศใช้เวลาในการอบแห้ง 49 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในตู้อบเฉลี่ย 48.20 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเท่ากับ 2.33 ที่อัตราการไหล 15 ลิตรต่อนาที ส่วนระบบระบายร้อนด้วยอากาศเท่ากับ 2.16 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยที่กำลังงานสำหรับคอมเพรสเซอร์ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเท่ากับ 2.99 กิโลวัตต์ ที่อัตราการไหล 15 ลิตรต่อนาที ส่วนระบบระบายร้อนด้วยอากาศเท่ากับ 3.43 ลิตรต่อนาที

คำสำคัญ: ระบบความร้อนความร้อนทิ้ง, ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ, เครื่องดนตรีอีสาน, สมรรถนะการอบแห้ง, สารทำความเย็น R-32

Abstract

This research investigates the technical feasibility and evaluates the performance of a drying system for raw materials used in Isan musical instrument production, utilizing waste heat from an air conditioning system. The case study was conducted at Ban Tha Ruea, Na Wa District, Nakhon Phanom Province. The system employed R-32 refrigerant in a vapor-compression refrigeration system with a cooling capacity of 36,000 BTU/h. The drying unit consisted of a shell-and-tube heat exchanger and an air-cooled heat rejection unit. Experiments were conducted using water flow rates of 15, 20, and 25 L/min, and an air flow rate of 1.10 kg/s to evaluate the drying system performance. In the experiments, 10 kg of wood for Isan musical instrument production was dried to a final weight of 4.45 kg, corresponding to a moisture content reduction of 15% on a dry basis. The system operation was controlled based on dry-bulb temperature.

The results indicated that the water-cooled system, at a flow rate of 15 L/min, required 76 hours for drying, with an average drying chamber temperature of 40.70°C. In comparison, the air-cooled system required 49 hours, with an average temperature of 48.20°C. The coefficient of performance (COP) of the water-cooled system was 2.33 at a flow rate of 15 L/min, while the air-cooled system showed a COP of 2.16. The compressor power consumption of the water-cooled system was 2.99 kW, whereas that of the air-cooled system was 3.43 kW.

Keywords: Waste Heat Recovery System, Vapor Compression Refrigeration System, Isan Musical Instruments, Drying Performance, R-32 Refrigerant.

บทนำ

เครื่องดนตรีพื้นบ้านอีสาน เช่น พิณ แคน และโหวด ถือเป็นเอกลักษณ์ทางวัฒนธรรมที่สำคัญและเป็นผลิตภัณฑ์สร้างรายได้หลักให้แก่ชุมชนบ้านท่าเรือ อำเภอนาหว้า จังหวัดนครพนม ในกระบวนการผลิตเครื่องดนตรีเหล่านี้ ขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งคือการเตรียมวัตถุดิบไม้ ซึ่งจำเป็นต้องผ่านการอบแห้งเพื่อลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการบิดตัวและการแตกร้าวของเนื้อไม้ [1] โดยทั่วไปกลุ่มผู้ผลิตมักใช้วิธีการผึ่งแดดตามธรรมชาติ ซึ่งต้องใช้ระยะเวลานานและไม่สามารถควบคุมสภาวะความชื้นได้ตามมาตรฐาน โดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนที่ความชื้นในอากาศสูง ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเสียงและอายุการใช้งานของเครื่องดนตรีอย่างมีนัยสำคัญ

ในปัจจุบัน การใช้งานระบบปรับอากาศ (Air Conditioning System) มีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามสภาพภูมิอากาศและสภาวะเศรษฐกิจ โดยระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression Refrigeration System) จะมีการระบายพลังงานความร้อนทิ้ง (Waste Heat) ออกสู่บรรยากาศผ่านชุดคอนเดนเซอร์ในปริมาณมหาศาล ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนความร้อนที่สูญเปล่ามากกว่าร้อยละ 70 ของพลังงานที่ใช้ในระบบ [2] พลังงานความร้อนส่วนนี้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 40–60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมและเพียงพอสำหรับกระบวนการอบแห้งไม้เบื้องต้นและการลดความชื้นในวัสดุทางการเกษตร [3] การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ (Waste Heat Recovery) จึงเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มดัชนีการใช้พลังงาน และลดการปลดปล่อยความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม

จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคเพื่อประเมินสมรรถนะของระบบอบแห้งวัตถุดิบผลิตเครื่องดนตรีอีสานด้วยพลังงานความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ โดยการดัดแปลงระบบทำความเย็นแบบอัดไอ

ขนาด 36,000 บีทียูต่อชั่วโมง ที่ใช้สารทำความเย็น R-32 ซึ่งเป็นสารที่มีค่าศักยภาพในการทำลายชั้นบรรยากาศต่ำ (Low GWP) สอดคล้องกับแนวทางการลดก๊าซเรือนกระจกในระดับสากล [4] โดยการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มเติมเพื่อฟื้นฟูความร้อนจากสารทำความเย็นมาใช้ในตู้อบแห้ง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างระบบระบายความร้อนด้วยน้ำผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและเปลือก กับระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ เพื่อหาความสัมพันธ์ของอัตราการไหล อุณหภูมิ และระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการอบแห้ง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างตู้อบแห้งไม้ที่ใช้ในการผลิตเครื่องดนตรีอีสานด้วยระบบอบแห้งโดยใช้ความร้อนทิ้งคืนกลับจากระบบปรับอากาศ
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของน้ำและอากาศที่มีต่อสมรรถนะการอบแห้งและค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (COP) ของระบบ
3. เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบอบแห้งไม้ที่ใช้ในการผลิตเครื่องดนตรีอีสานด้วยระบบอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ขอบเขตด้านระบบและอุปกรณ์ (Hardware Scope)

1.1 ระบบทำความเย็น ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression Refrigeration System) ขนาดพิกัด 36,000 บีทียูต่อชั่วโมง (3 TR)

1.2 สารทำความเย็น ใช้สารทำความเย็นชนิด R-32

1.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

- ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและเปลือก (Shell and Tube Heat Exchanger) สำหรับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ
- ชุดระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air-Cooled Condenser)

2. ขอบเขตด้านตัวแปรและการทดลอง (Experimental Scope)

2.1 การระบายความร้อนด้วยน้ำ ทดสอบที่อัตราการไหลของน้ำ 15, 20 และ 25 ลิตรต่อนาที

2.2 การระบายความร้อนด้วยอากาศ ทดสอบที่อัตราการไหลของอากาศ 1.10 กิโลกรัมต่อวินาที

2.3 ตัวแปรที่วัดผล ระยะเวลาการอบแห้ง (ชั่วโมง), อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบ (°C), ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (COP) และกำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ (kW)

3. ขอบเขตด้านวัสดุที่ใช้ทดสอบ (Material Scope)

3.1 ประเภทวัสดุ ไม้สำหรับผลิตเครื่องดนตรีอีสาน 2 ชนิด คือ ไม้ต้นรักใหญ่ และไผ่ลูกแคน

3.2 ปริมาณ น้ำหนักเริ่มต้นในการทดสอบ 10 กิโลกรัม ต่อการทดลอง

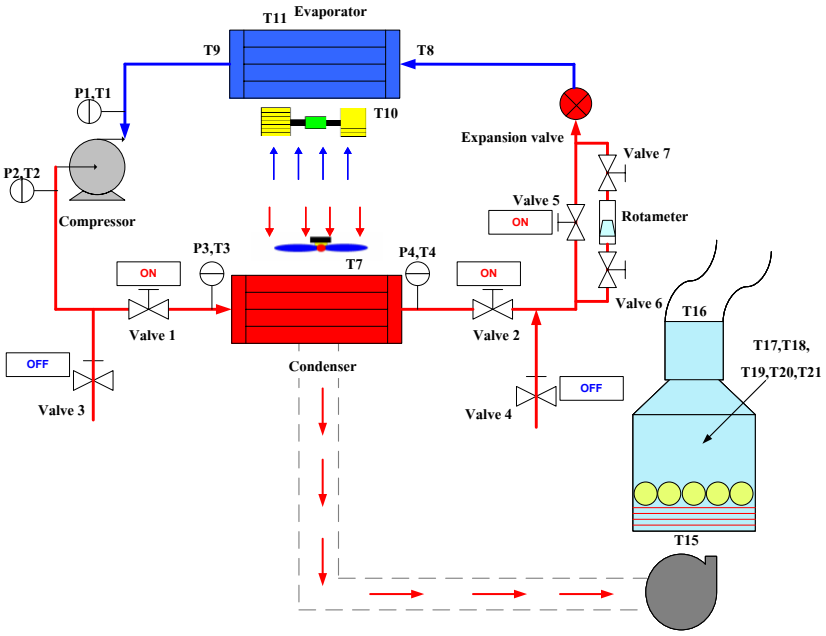
3.3 เป้าหมายการอบแห้ง ลดระดับความชื้นของไม้ลงจนเหลือ ร้อยละ 15 มาตรฐานแห้ง (% db.)

4. ขอบเขตด้านสถานที่ (Area Scope)

4.1 ดำเนินการเก็บข้อมูลและทดสอบกรณีศึกษา ณ บ้านท่าเรือ อำเภอนาหว้า จังหวัดนครพนม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การออกแบบสร้างเครื่องและแสดงการทำงาน



ภาพที่ 1 แสดงแผนผังแสดงการทำงานของระบบปั๊มความร้อน (Heat Pump System) ที่นำความร้อนทิ้งจากส่วนคอยล์ร้อน (Condenser) มาใช้ประโยชน์ในการอบแห้งหรือทำความร้อน

จากภาพที่ 1 แสดงแผนผังแสดงการทำงานของระบบปั๊มความร้อน (Heat Pump System) ที่นำความร้อนทิ้งจากส่วนคอยล์ร้อน (Condenser) มาใช้ประโยชน์ในการอบแห้งหรือทำความร้อน โดยสามารถแบ่งการทำงานออกเป็นส่วนหลัก ๆ ได้ดังนี้

1. วัฏจักรการทำความเย็น (Refrigeration Cycle) เป็นส่วนที่หมุนเวียนสารทำความเย็นเพื่อเคลื่อนย้ายความร้อน
    1.1 Compressor (คอมเพรสเซอร์): ทำหน้าที่อัดสารทำความเย็นให้มีความดันสูงและอุณหภูมิสูง (จุด T2, P2)
    1.2 Condenser (คอยล์ร้อน - สีแดง): สารทำความเย็นที่มีอุณหภูมิสูงจะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่ไหลผ่าน ทำให้สารทำความเย็นกลั่นตัวเป็นของเหลว
    1.3 Expansion Valve (วาล์วลดความดัน): ลดความดันของสารทำความเย็นลงอย่างรวดเร็ว ทำให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิต่ำมาก
    1.4 Evaporator (คอยล์เย็น - สีฟ้า): สารทำความเย็นจะดูดซับความร้อนจากสิ่งแวดล้อม (จุด T10, T11) เพื่อระเหยกลายเป็นไอ แล้วไหลกลับเข้าคอมเพรสเซอร์อีกครั้ง
2. ระบบทางเดินอากาศและการอบแห้ง จากแผนผังจะเห็นว่ามีการนำลมร้อนจากคอยล์ร้อนไปใช้งาน
    2.1 Fan/Blower: พัดลมด้านล่างจะเป่าอากาศผ่าน Condenser เพื่อรับความร้อน
    2.2 Drying Chamber: ลมที่ร้อนแล้วจะถูกส่งเข้าไปยังห้องอบที่มีวัสดุ (วงกลมสีเหลือง) วางอยู่ อากาศร้อนจะช่วยดึงความชื้นออกจากวัสดุเหล่านั้น

2.3 เซนเซอร์วัดผล: มีการติดตั้งเซนเซอร์อุณหภูมิหลายจุด (T15 - T21) เพื่อวัดการกระจายตัวของความร้อนภายในห้องอบ

3. ส่วนควบคุมและวัดผลเพิ่มเติม

3.1 Rotameter: ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของสารทำความเย็นในระบบ

3.2 Valves (1-7): วาล์วต่าง ๆ ใช้สำหรับควบคุมทิศทางการไหล หรือเลือกเส้นทาง Bypass ในกรณีที่ต้องการทดสอบสภาวะที่แตกต่างกัน

3.3 P (Pressure) & T (Temperature): เป็นจุดวัดความดันและอุณหภูมิเพื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ (COP)

2. การคำนวณหาขนาดของตู้อบแห้ง

การคำนวณหาปริมาตรของตู้อบแห้ง [5] สามารถคำนวณได้จากปริมาตรของไม้สำหรับผลิตเครื่องดนตรีอีสานจำนวน 10 กิโลกรัม ดังนั้น ปริมาตรของตู้อบจะสามารถคำนวณหาได้ ดังนี้

ไม้สำหรับผลิตเครื่องดนตรีอีสานที่ต้องการอบแห้งมีความชื้น (มาตรฐานแห้ง) ดังนั้น สามารถหาปริมาณได้จากความหนาแน่นของไม้ที่ความชื้นดังกล่าวดังนี้ [6]

$$\rho = 1060 - 0.1017MC$$

เมื่อ

ρ	คือ	ความหนาแน่นของไม้ (kg/m³)
MC	คือ	ความชื้นของไม้ (%db.)

3. สถิติที่ใช้ในการศึกษา

3.1 การคำนวณค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง [7, 8]

ใช้เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในเนื้อไม้เทียบกับน้ำหนักไม้แห้งสนิท

$$MC_{db} = \frac{W_w - W_d}{W_d} \, x \, 100$$

เมื่อ MC_{db} คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%)

W_w คือ น้ำหนักไม้ขณะทดสอบ (kg.)

W_d คือ น้ำหนักไม้แห้งสนิท (kg.)

3.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ[9,10]

ใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพพลังงานของระบบทำความเย็นขนาด 36,000 บีทียูต่อชั่วโมง

$$COP = \frac{Q_c}{p}$$

เมื่อ COP คือ ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ

Q_c คือ ความสามารถในการทำความเย็น (Cooling Capacity) ของระบบ 36,000 บีทียูต่อชั่วโมง

p คือ กำลังไฟฟ้าที่คอมเพรสเซอร์ใช้ (kW)

3.3 การหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ [11]

ใช้ยืนยันค่า 1.10 kg/s ในขอบเขตงานวิจัย

$$\dot{m}_{air} = p \; x \; V \; x \; A$$

เมื่อ $\dot{m}_{air}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

p คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m³)

V คือ ความเร็วลมที่วัดได้ (m/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องทางลม (m²)

3.4 การหาพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง [12]

ใช้พิจารณาความร้อนที่อากาศได้รับจากคอนเดนเซอร์

$$Q_{drying} = \dot{m}_{air} \; x \; C_p \; X \left(T_{avg} - T_{amb} \right)$$

เมื่อ Q_{drying} คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (kW)

$\dot{m}_{air}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (1.006 kJ/kg·K)

T_{avg} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยในตู้อบ (℃)

T_{amb} คือ อุณหภูมิอากาศภายนอกหรืออุณหภูมิเริ่มต้น (℃)

4. การออกแบบตู้อบแห้ง

ตู้อบแห้งถูกออกแบบให้มีขนาดกว้าง 0.80 เมตร ลึก 0.60 เมตร และสูง 1.20 เมตร โครงสร้างผลิตจากสแตนเลสหุ้มฉนวนกันความร้อน ภายในติดตั้งชั้นวางไม้แบบตะแกรงจำนวน 5 ชั้น เพื่อรองรับวัตถุดิบไม้หนัก 10 กิโลกรัม โดยมีพื้นที่หน้าตัดช่องลมสอดคล้องกับอัตราการไหลเชิงมวล 1.10 กิโลกรัมต่อวินาที



ภาพที่ 2 แสดงแบบตู้อบแห้งวัตถุดิบผลิตเครื่องดนตรีอีสานด้วยพลังงานความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ

วิธีการทดลอง

การทดลองโดยไม้ในการผลิตเครื่องดนตรีอีสาน (ไม้ต้นรักใหญ่)

1) คัดเลือกไม้ต้นรักใหญ่

2) ชั่งน้ำหนักไม้ต้นรักใหญ่ก่อนอบแห้ง ด้วยเครื่องชั่งละเอียด ลำเลียงเข้าตู้เพื่อทำการอบแห้ง

3) ทำการปรับวาล์วควบคุมทิศทางการไหลของสารทำความเย็น

4) ทำการเปิดระบบปรับอากาศขณะทำการอบแห้ง ทำการบันทึกค่าต่าง ๆ ตามที่ต้องการ

5) เก็บไม้ต้นรักใหญ่มาชั่งน้ำหนักหลังทำการอบแห้งทุก ๆ 1 ชั่วโมง บันทึกข้อมูลแล้วนำไม้ต้นรักใหญ่ ไปทำการอบแห้งต่อ

6) ทดลองไปจนกระทั่งได้ปริมาณความชื้นของไม้ต้นรักใหญ่ตรงกับค่าที่ต้องการ (15% มาตรฐานแห้ง) [13]

การทดลองโดยใช้ไม้ในการผลิตเครื่องดนตรีอีสาน (ไผ่ลูกแคน)

1) คัดเลือกไผ่ลูกแคน

2) ชั่งน้ำหนักไผ่ลูกแคนก่อนอบแห้งด้วยเครื่องชั่งละเอียด ลำเลียงเข้าตู้เพื่อทำการอบแห้ง

3) ทำการปรับวาล์วควบคุมทิศทางการไหลของสารทำความเย็น

4) ทำการเปิดระบบปรับอากาศ

5) ขณะทำการอบแห้ง ทำการบันทึกค่าตามที่ต้องการ

6) เก็บไผ่ลูกแคนมาชั่งน้ำหนักหลังทำการอบแห้งทุก 1 ชั่วโมง บันทึกข้อมูลแล้วนำไผ่ลูกแคนไปทำการอบแห้งต่อ

7) ทดลองไปจนกระทั่งได้ปริมาณความชื้นของไผ่ลูกแคนตรงกับค่าที่ต้องการ (15% เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง) [13]



ภาพที่ 3 แสดงไม้ในการผลิตเครื่องดนตรีอีสาน (ไม้ต้นรักใหญ่) ที่ใช้ในการทดลองอบแห้ง



ภาพที่ 4 แสดงไม้ในการผลิตเครื่องดนตรีอีสาน (ไผ่ลูกแคน) ที่ใช้ในการทดลองอบแห้ง

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลการทดสอบสมรรถนะด้านอุณหภูมิและระยะเวลาการอบแห้ง

จากการศึกษาเปรียบเทียบระบบอบแห้งวัตถุดิบผลิตเครื่องดนตรีอีสานน้ำหนัก 10 กิโลกรัม พบว่า ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ มีประสิทธิภาพในการสร้างความร้อนภายในตู้อบได้สูงกว่า โดยทำอุณหภูมิเฉลี่ยได้ถึง 48.20 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าเพียง 49 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับ ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (ที่อัตราการไหล 15 ลิตรต่อนาที) ซึ่งทำอุณหภูมิเฉลี่ยได้ 40.70 องศาเซลเซียส และต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานถึง 76 ชั่วโมง

อุณหภูมิภายในตู้อบที่สูงกว่าของระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ เกิดจากการระบายความร้อนผ่านคอนเดนเซอร์เข้าสู่กระแสอากาศโดยตรงในปริมาณมวล 1.10 กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการระเหยของน้ำออกจากเนื้อไม้ได้เร็วกว่าระบบระบายความร้อนด้วยน้ำถึง ร้อยละ 35.5 ทำให้ไม้สูญเสียน้ำหนักจาก 10 กิโลกรัม เหลือเพียง 4.45 กิโลกรัม สอดคล้องกับระดับความชื้นเป้าหมายที่ ร้อยละ 15 มาตรฐานแห้ง (% db.)

2. ผลการวิเคราะห์ด้านพลังงานและสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (COP)

ในด้านการใช้พลังงานของคอมเพรสเซอร์ขนาด 36,000 บีทียูต่อชั่วโมง พบว่า ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ มีความประหยัดพลังงานสูงกว่า โดยกินไฟเพียง 2.99 กิโลวัตต์ และให้ค่า สัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (COP) เท่ากับ 2.33 ในขณะที่ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ กินไฟสูงกว่าที่ 3.43 กิโลวัตต์ และมีค่า COP เท่ากับ 2.16

แม้ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศจะช่วยประหยัดเวลาในการอบแห้งได้มากกว่า แต่การระบายความร้อนด้วยน้ำผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและเปลือกช่วยลดอุณหภูมิและความดันด้านส่ง (Discharge Pressure) ของสารทำความเย็น R-32 ได้ดีกว่า ส่งผลให้คอมเพรสเซอร์ทำงานเบาลงและมีค่าประสิทธิภาพทางพลังงานสูงกว่าระบบอากาศอย่างมีนัยสำคัญ

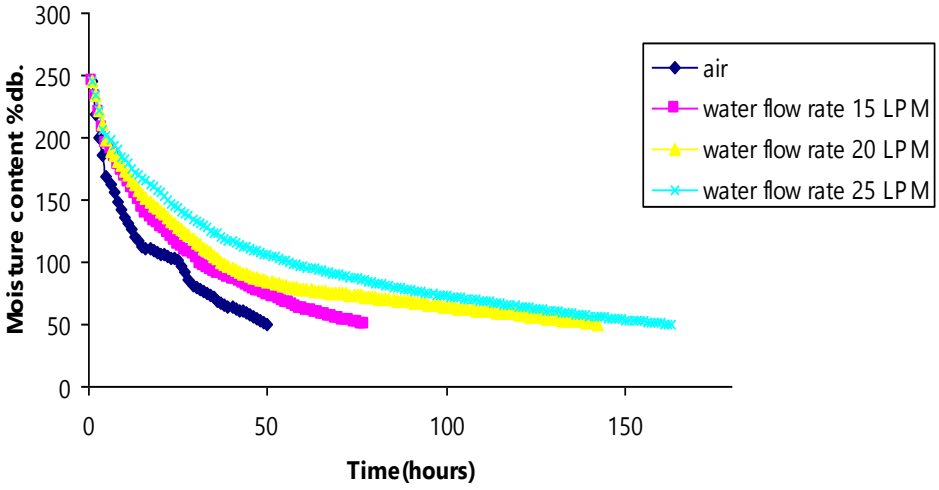
3. การประเมินเพื่อเข้าสู่มาตรฐานร้อยละ 15 ฐานแห้ง

จากการวิเคราะห์จลนศาสตร์การอบแห้ง (Drying Kinetics) หากต้องการลดระดับความชื้นลงสู่ มาตรฐานร้อยละ 15 มาตรฐานแห้ง ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศจะมีความเหมาะสมมากกว่าในแง่ของคุณภาพไม้ เนื่องจากอุณหภูมิที่ระดับเกือบ 50 องศาเซลเซียส มีพลังงานเพียงพอที่จะดึงน้ำที่จับตัวแน่นในผนังเซลล์ไม้ (Bound Water) ออกมาได้ดีกว่าอุณหภูมิระดับ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจส่งผลต่อความเสถียรเชิงมิติของเครื่องดนตรีอีสานในระยะยาว

ตารางที่ 1 แสดงสรุปผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการอบแห้งด้วยระบบระบายความร้อนด้วยน้ำและอากาศ

ตัวแปรที่วัดผล	ระบายความร้อนด้วยน้ำ (15 LPM)	ระบายความร้อนด้วยอากาศ
อุณหภูมิเฉลี่ยในตู้อบ (°C)	40.70	48.20
ระยะเวลาอบแห้ง (ชั่วโมง)	76	49
กำลังไฟฟ้าคอมเพรสเซอร์ (kW)	2.99	3.43
สัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (COP)	2.33	2.16

จากตารางที่ 1 เปรียบเทียบสมรรถนะ พบว่า ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ มีประสิทธิภาพในการดึงความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ได้สูงสุด โดยทำอุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบได้ 48.20 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงเหลือเพียง 49 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในด้านการใช้พลังงาน พบว่า ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ที่อัตราการไหล 15 ลิตรต่อนาที มีความคุ้มค่าเชิงพลังงานมากกว่า โดยคอมเพรสเซอร์ใช้กำลังไฟฟ้าเพียง 2.99 กิโลวัตต์ และให้ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (COP) สูงถึง 2.33 ซึ่งสูงกว่าระบบระบายความร้อนด้วยอากาศร้อยละ 7.87 เนื่องจากการระบายความร้อนด้วยน้ำสามารถลดอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าวาล์วลดความดันได้ดีกว่า ส่งผลให้วัฏจักรการทำความเย็นมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

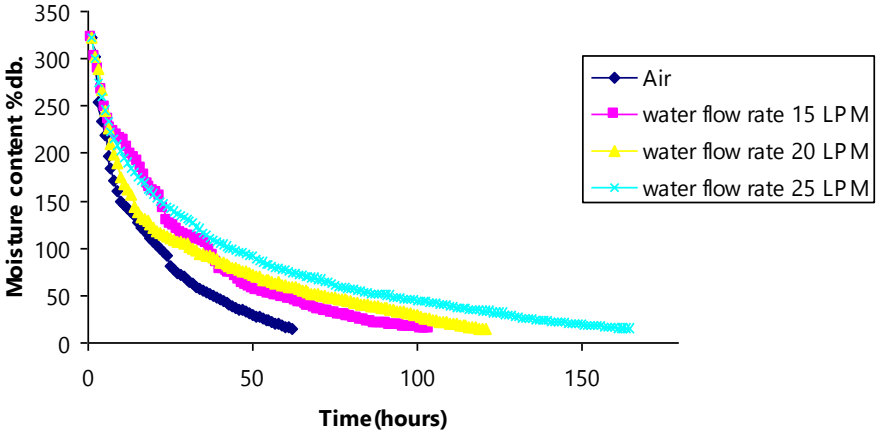


ภาพที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นมาตรฐานแห้งในไม้ในการผลิตเครื่องดนตรีอีสาน (ไม้ต้นรักใหญ่) เทียบกับเวลา

จากภาพที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นมาตรฐานแห้งไม้ในการผลิตเครื่องดนตรีอีสาน (ไม้ต้นรักใหญ่) เทียบกับเวลา ในระบบปรับอากาศแบบคอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำและอากาศสังเกตได้ว่าในช่วงแรกความชื้นในไม้ต้นรักใหญ่ลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นความชื้นในไม้ต้นรักใหญ่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย ซึ่งจากการทดลองเวลาที่ใช้ในการอบไม้ต้นรักใหญ่ในระบบระบายความร้อนด้วยอากาศใช้เวลาประมาณ 49 ชั่วโมง ส่วนระบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่อัตราการไหลที่ 15, 20 และ 25 ลิตรต่อนาที ใช้เวลาประมาณ 76, 141 และ 162 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อให้ได้ความชื้นร้อยละ 15 มาตรฐานแห้ง เนื่องจากระบบปรับอากาศแบบคอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยอากาศ เมื่อมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับอากาศแล้ว อากาศที่แลกเปลี่ยนความร้อนออกมาจะมีอุณหภูมิสูง จึงทำให้ความชื้นของไม้ต้นรักใหญ่ลดลงเร็ว ดังนั้นถ้าจะนำเอาความร้อนทิ้งคืนกลับจากระบบปรับอากาศมาใช้ไม้ต้นรักใหญ่ควรใช้ความร้อนที่ได้จากระบบปรับอากาศแบบคอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยอากาศ



ภาพที่ 6 แสดงไม้ในการผลิตเครื่องดนตรีอีสาน (ไม้ต้นรักใหญ่) หลังจากอบแห้ง



ภาพที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นมาตรฐานแห้งในไม้ในการผลิตเครื่องดนตรีอีสาน (ไผ่ลูกแคน) เทียบกับเวลา

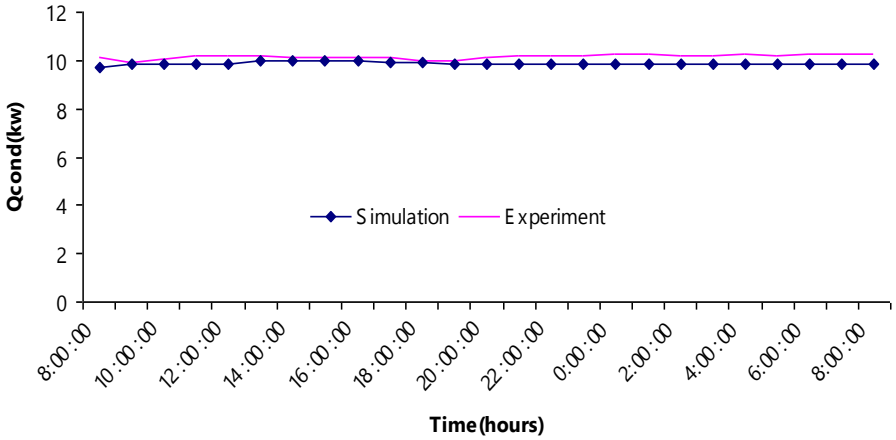
จากภาพที่ 7 เป็นการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นมาตรฐานแห้งในไม้ในการผลิตเครื่องดนตรีอีสาน (ไผ่ลูกแคน) เทียบกับเวลา ในระบบปรับอากาศแบบคอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำและอากาศสังเกตได้ว่าในช่วงแรกความชื้นในวัตถุดิบลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นความชื้นในวัตถุดิบมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ซึ่งจากการทดลองเวลาที่ใช้ในการอบไผ่ลูกแคนในระบบระบายความร้อนด้วยอากาศใช้เวลาประมาณ 61 ชั่วโมง ส่วนระบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่อัตราการไหลที่ 15, 20 และ 25 ลิตรต่อนาที ใช้เวลาประมาณ 103, 120 และ 164 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อให้ได้ความชื้นตามต้องการร้อยละ 15 มาตรฐานแห้ง เนื่องจากระบบปรับอากาศแบบคอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยอากาศเมื่อมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับอากาศแล้ว อากาศที่แลกเปลี่ยนความร้อนออกมาจะมีอุณหภูมิสูง จึงทำให้ความชื้นของไผ่ลูกแคนลดลงเร็ว ดังนั้นถ้าจะนำเอาความร้อนทิ้งคืนกลับจากระบบปรับอากาศมาใช้อบไผ่ลูกแคนควรใช้ความร้อนที่ได้จากระบบปรับอากาศแบบคอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยอากาศ



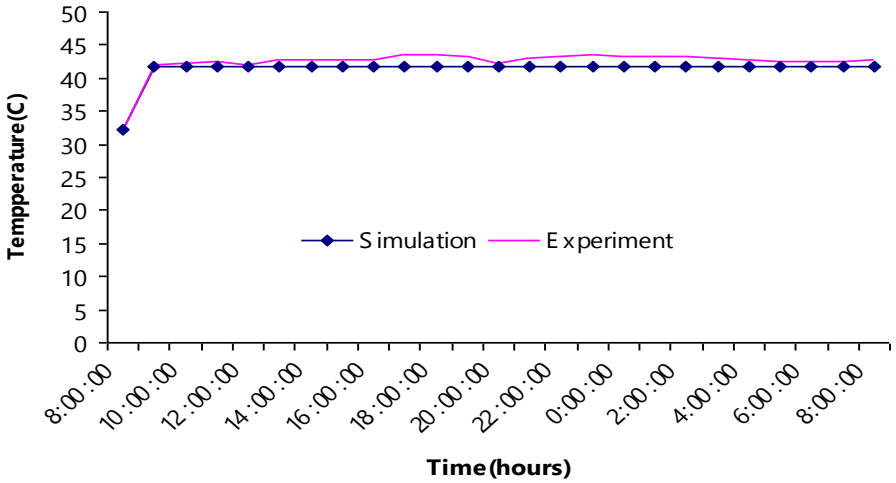
ภาพที่ 8 แสดงไม้ในการผลิตเครื่องดนตรีอีสาน (ไผ่ลูกแคน) หลังจากอบแห้ง

3.2 ผลการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง

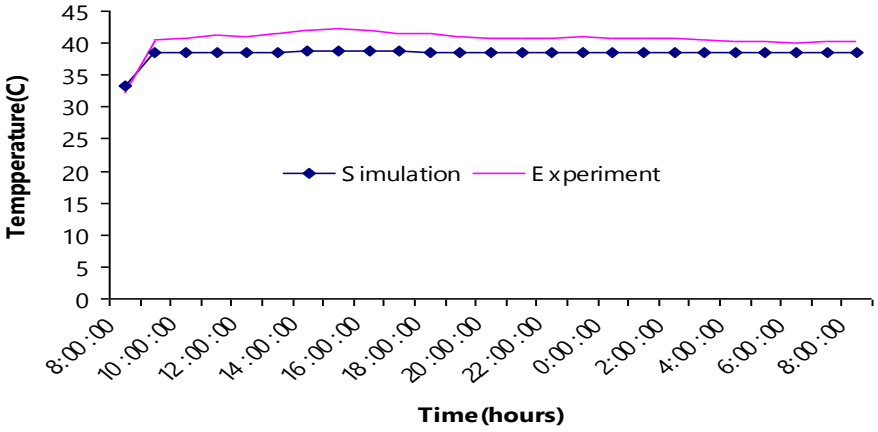
จากผลการทดลองการประเมินสมรรถนะระบบอบแห้งวัตถุดิบผลิตเครื่องดนตรีอีสานด้วยพลังงานความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศสามารถเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสถิติที่ใช้ในการศึกษา ดังนี้ [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]



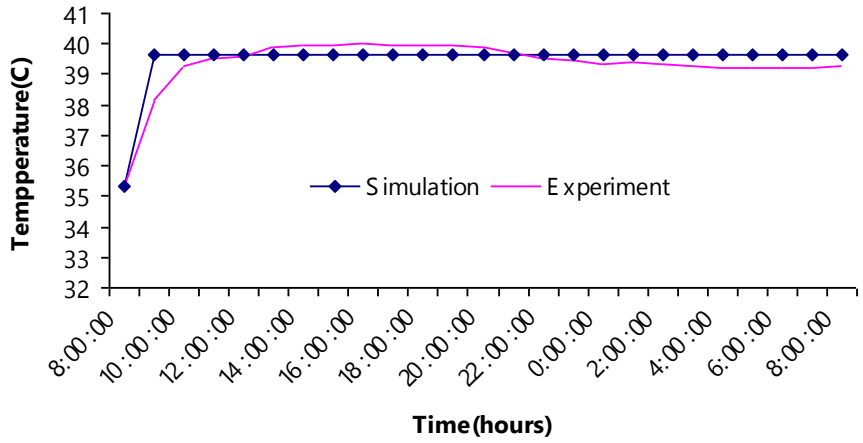
ภาพที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำที่ทางออกของคอนเดนเซอร์ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อนาที

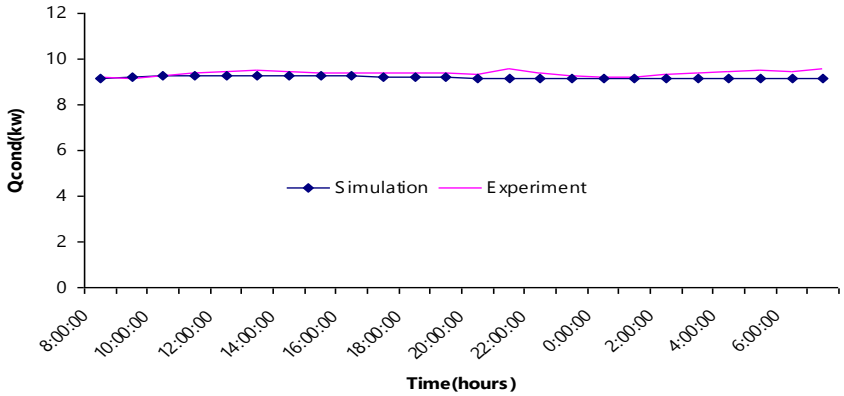


ภาพที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำที่ทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในตู้อบแห้ง อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อนาที

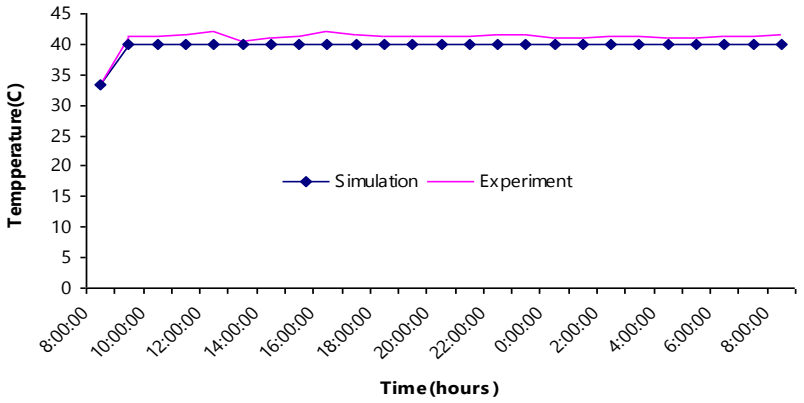


ภาพที่ 12 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในตู้อบแห้งอัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศ 2.13 กิโลกรัมต่อวินาที

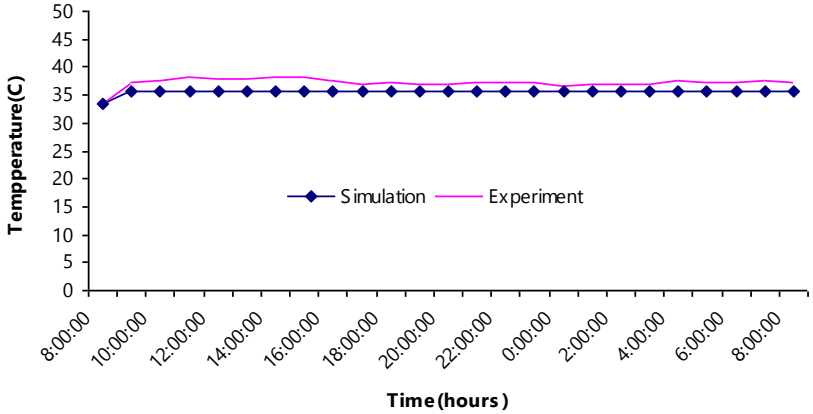
จากการศึกษาผลการเปรียบเทียบที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สถิติในการศึกษากับผลที่ได้จากการทดลองอัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศ 2.13 กิโลกรัมต่อวินาที โดยนำไปเขียนกราฟดังภาพที่ 9-12 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน และมีค่าใกล้เคียงกัน



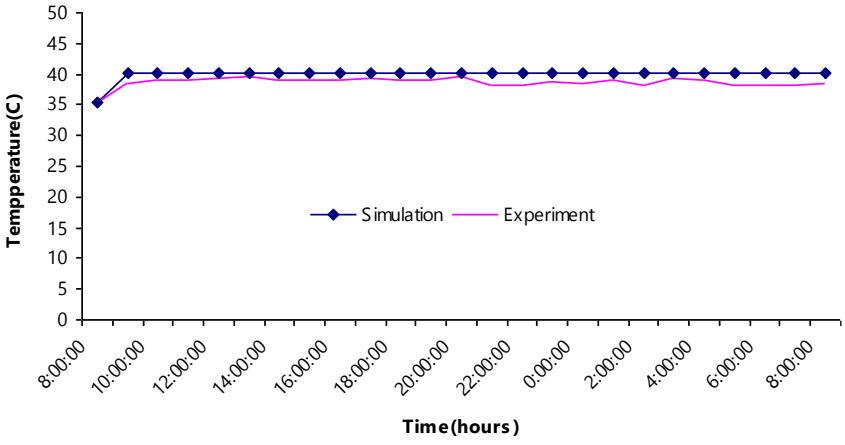
ภาพที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ อัตราการไหลของน้ำ 20 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำที่ทางออกของคอนเดนเซอร์ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ อัตราการไหลของน้ำ 20 ลิตรต่อนาที

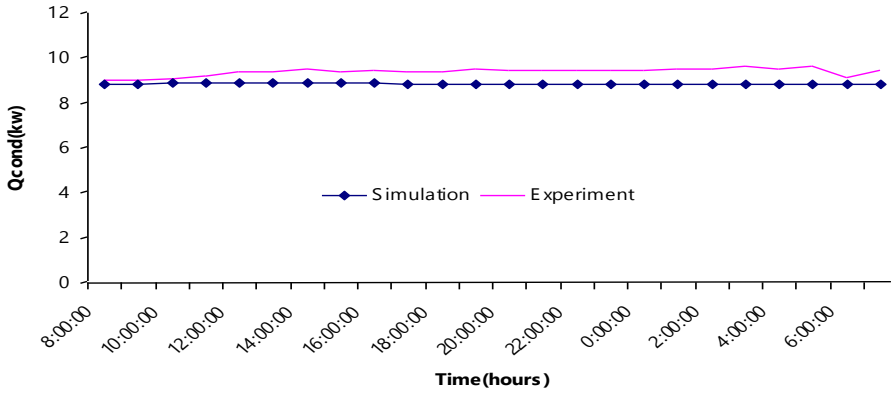


ภาพที่ 15 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำที่ทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในตู้อบแห้ง อัตราการไหลของน้ำ 20 ลิตรต่อนาที

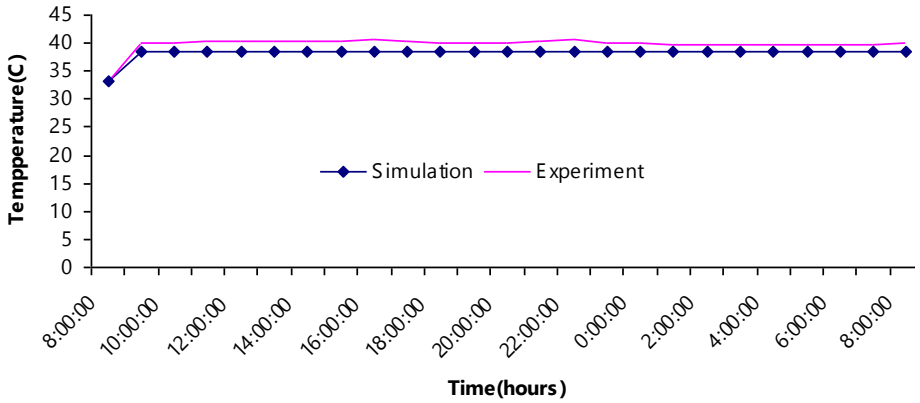


ภาพที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในตู้อบแห้งอัตราการไหลของน้ำ 20 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศ 2.13 กิโลกรัมต่อวินาที

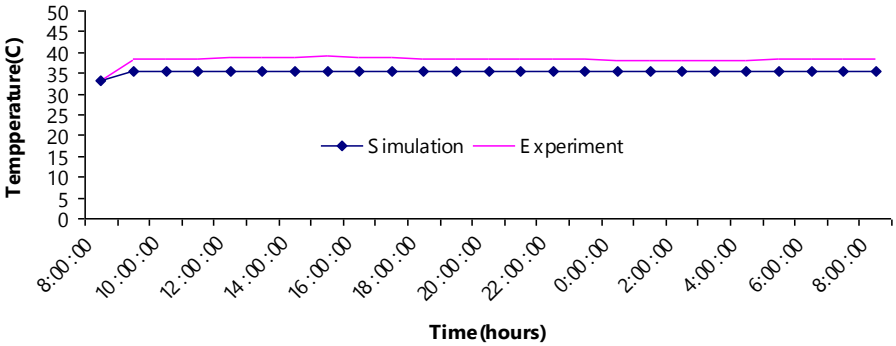
จากการศึกษาผลการเปรียบเทียบที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลที่ได้จากการทดลอง อัตราการไหลของน้ำ 20 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศ 2.13 กิโลกรัมต่อวินาที โดยนำไปเขียนกราฟดังภาพที่ 13 -16 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน และมีค่าใกล้เคียงกัน



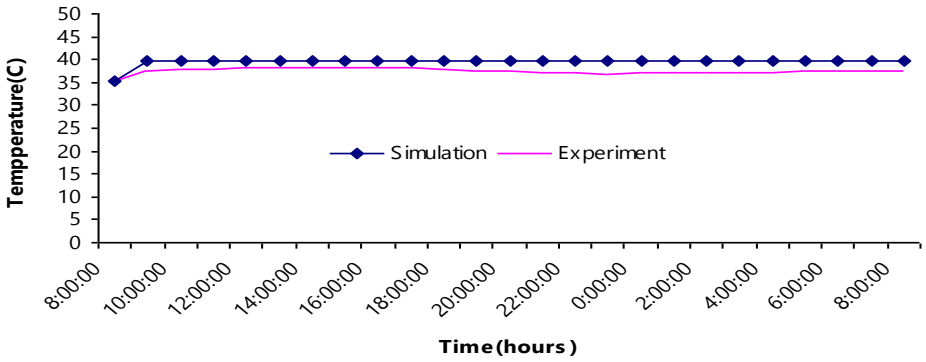
ภาพที่ 17 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อยของคอนเดนเซอร์ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำอัตราการไหลของน้ำ 25 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำที่ทางออกของคอนเดนเซอร์ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำอัตราการไหลของน้ำ 25 ลิตรต่อนาที



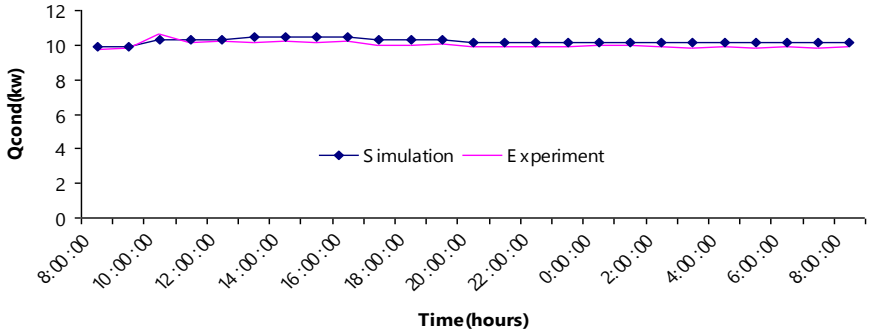
ภาพที่ 19 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำที่ทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในตู้อบแห้งอัตราการไหลของน้ำ 25 ลิตรต่อนาที



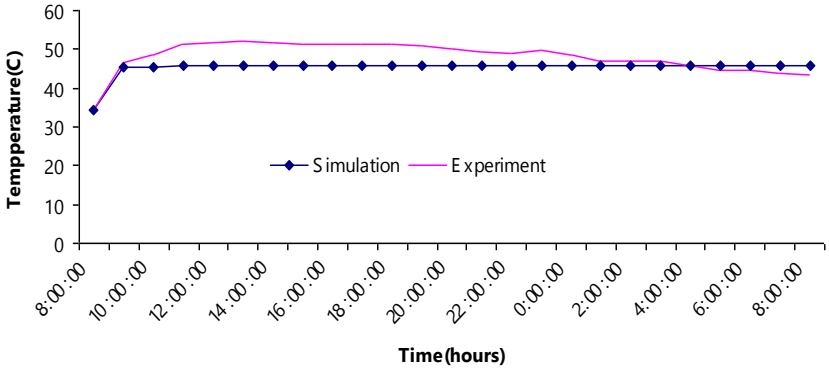
ภาพที่ 20 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในตู้อบแห้งอัตราการไหลของน้ำ 25 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศ 2.13 กิโลกรัมต่อวินาที

จากการศึกษาผลการเปรียบเทียบที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลที่ได้จากการทดลองอัตราการไหลของน้ำ 25 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศ 2.13 กิโลกรัมต่อวินาที โดยนำไปเขียนกราฟดังภาพที่ 17-20 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน และมีค่าใกล้เคียงกัน

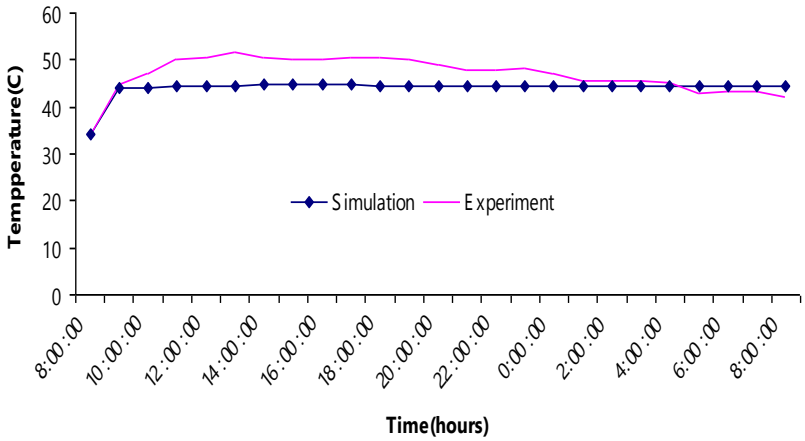
3.3 การอบแห้งวัตถุดิบผลิตเครื่องดนตรีอีสานด้วยพลังงานความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ



ภาพที่ 21 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์ที่ระบายความร้อนด้วยอากาศอัตราการไหลของอากาศ 0.90 กิโลกรัมต่อวินาที

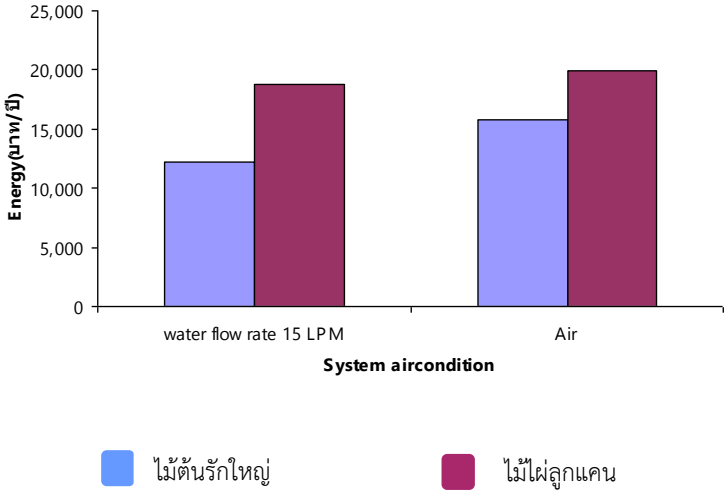


ภาพที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ทางออกของคอนเดนเซอร์อัตราการไหลของอากาศ 0.90 กิโลกรัมต่อวินาที



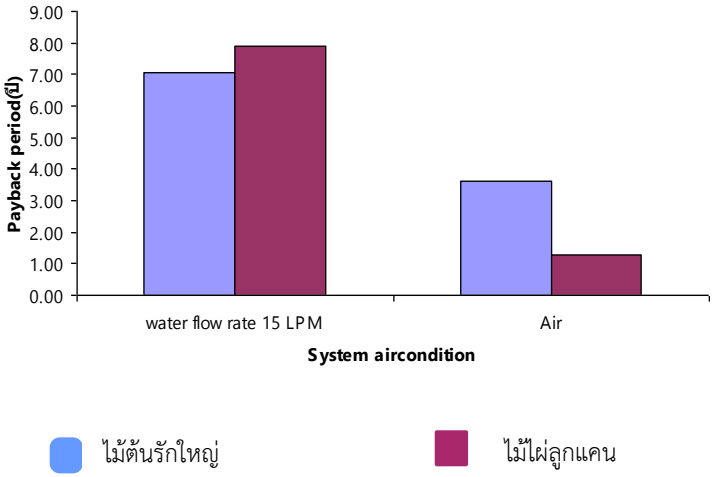
ภาพที่ 23 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ทางออกตู้อบแห้งอัตราการไหลของอากาศ 2.13 กิโลกรัมต่อวินาที

จากการศึกษาผลการเปรียบเทียบที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สถิติในการศึกษากับผลที่ได้จากการทดลอง อัตราการไหลของอากาศของคอนเดนเซอร์ 0.90 กิโลกรัมต่อวินาที และอัตราการไหลของอากาศในตู้อบ 2.13 กิโลกรัมต่อวินาที โดยนำไปเขียนกราฟดังภาพที่ 21-23 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน



ภาพที่ 24 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งในระบบปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยน้ำและระบายความร้อนด้วยอากาศ

จากภาพที่ 24 เป็นการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งอบแห้งวัตถุดิบผลิตเครื่องดนตรีอีสานด้วยพลังงานความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำอัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศในตู้อบ 2.13 กิโลกรัมต่อวินาที ใช้พลังงาน 12,212.48 บาท/ปี ในการอบไม้ต้นรักใหญ่ และในการอบไผ่ลูกแคน 18,831.97 บาท/ปี ส่วนระบบระบายความร้อนด้วยอากาศอัตราการไหลของอากาศของคอนเดนเซอร์ 0.90 กิโลกรัมต่อวินาที และอัตราการไหลของอากาศในตู้อบ 2.13 กิโลกรัมต่อวินาที ใช้พลังงาน 15,747.67 บาท/ปี ในการอบไม้ต้นรักใหญ่ และในการอบไผ่ลูกแคน 19,925.62 บาท/ปี



ภาพที่ 25 เปรียบเทียบระยะเวลาในการคืนทุนของการอบแห้งในระบบปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยน้ำและระบายความร้อนด้วยอากาศ

จากภาพที่ 25 เป็นการเปรียบเทียบระยะเวลาในการคืนทุนของการอบแห้งอบแห้งวัตถุดิบผลิตเครื่องดนตรีอีสานด้วยพลังงานความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำอัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศในตู้อบ 2.13 กิโลกรัมต่อวินาที มีระยะเวลาในการคืนทุน 7.07 ปี ในการอบไม้ต้นรักใหญ่และในการอบไผ่ลูกแคน 7.9 ปี ส่วนระบบระบายความร้อนด้วยอากาศอัตราการไหลของอากาศของคอนเดนเซอร์ 0.90 กิโลกรัมต่อวินาที และอัตราการไหลของอากาศในตู้อบ 2.13 กิโลกรัมต่อวินาที มีระยะเวลาในการคืนทุน 3.6 ปี ในการอบไม้ต้นรักใหญ่ และในการอบไผ่ลูกแคน 1.3 ปี

สรุปผล

จากผลการทดลองการวิเคราะห์การประเมินสมรรถนะระบบอบแห้งวัตถุดิบผลิตเครื่องดนตรีอีสานด้วยพลังงานความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ ที่ใช้คอนเดนเซอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำใช้น้ำอัตราการไหล 15, 20 และ 25 ลิตรต่อนาที พบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์ในระบบที่ระบายความร้อนด้วยน้ำเท่ากับ 10.15, 10.36, 10.41 ตามลำดับ ส่วนระบบที่ระบายความร้อนด้วยอากาศเท่ากับ 9.84

จากผลการทดลองเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของระบบที่ระบายความร้อนด้วยน้ำที่อัตราการไหล 15, 20 และ 25 ลิตรต่อนาที โดยที่ภาระการปรับอากาศเท่ากัน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของระบบที่ระบายความร้อนด้วยน้ำเท่ากับ 2.33, 2.40, 2.57 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ส่วนระบบระบายความร้อนด้วยอากาศอัตราการไหล 0.90 กิโลกรัมต่อวินาที มีค่าค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพเท่ากับ 2.16 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

จากผลการทดลองเปรียบเทียบกำลังงานที่ขับคอมเพรสเซอร์ในระบบที่มีการระบายความร้อนด้วยน้ำที่อัตราการไหล 15, 20 และ 25 ลิตรต่อนาที ที่ภาระการทำงานคงที่พบว่ากำลังงานที่ขับคอมเพรสเซอร์ในระบบที่ระบายความร้อนด้วยน้ำเท่ากับ 3.00, 2.93, 2.88 ตามลำดับ ส่วนระบบที่ระบายความร้อนด้วยอากาศเท่ากับ 3.47 เปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนของอิวาพอเรเตอร์ที่ใช้ในระบบปรับอากาศที่มีคอนเดนเซอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่อัตราการไหล 15, 20 และ 25 ลิตรต่อนาที ที่ภาระการทำงานคงที่ พบว่า อิวาพอเรเตอร์ในคอนเดนเซอร์ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำเท่ากับ 7.06, 7.19, 7.37 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ส่วนอิวาพอเรเตอร์ในคอนเดนเซอร์ที่ระบายความร้อนด้วยอากาศเท่ากับ 6.98

เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นมาตรฐานแห้งในไม้ต้นรักใหญ่เทียบกับเวลา ในระบบปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยน้ำและอากาศ สังเกตได้ว่าในช่วงแรกความชื้นในวัตถุดิบลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นความชื้นในวัตถุดิบมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ซึ่งจากการทดลองเวลาที่ใช้ในการอบไม้ต้นรักใหญ่ในระบบระบายความร้อนด้วยอากาศใช้เวลาประมาณ 49 ชั่วโมง ส่วนระบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่อัตราการไหลที่ 15, 20 และ 25 ลิตรต่อนาที ใช้เวลาประมาณ 76, 141 และ 162 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อให้ได้ความชื้นร้อยละ 15 มาตรฐานแห้ง ดังนั้น ถ้าจะนำเอาความร้อนทิ้งคืนกลับจากระบบปรับอากาศมาใช้อบควรใช้ความร้อนที่ได้จากระบบปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นมาตรฐานแห้งในไผ่ลูกแคนเทียบกับเวลา ในระบบปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยน้ำและอากาศ สังเกตได้ว่าในช่วงแรกความชื้นในวัตถุดิบลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นความชื้นในวัตถุดิบมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ซึ่งจากการทดลองเวลาที่ใช้ในการอบไผ่ลูกแคนในระบบระบายความร้อนด้วยอากาศใช้เวลาประมาณ 61 ชั่วโมง ส่วนระบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่อัตราการไหลที่ 15, 20 และ 25 ลิตรต่อนาที ใช้เวลาประมาณ 103, 120 และ 164 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อให้ได้ความชื้นร้อยละ 15 มาตรฐานแห้ง ดังนั้น ถ้าจะนำเอาความร้อนทิ้งคืนกลับจากระบบปรับอากาศมาใช้อบควรใช้ความร้อนที่ได้จากระบบปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

จากการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งวัตถุดิบผลิตเครื่องดนตรีอีสานที่ใช้ความร้อนทิ้งคืนกลับจากระบบปรับอากาศ

- ระบบปรับอากาศแบบคอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำใช้ไม้ต้นรักใหญ่เป็นวัตถุดิบอบได้ 48 ครั้ง/ปีใช้พลังงาน 12,212.48 บาท/ปี และสามารถคืนทุนเครื่องอบแห้งได้ในระยะเวลา 7.07 ปี
- ใช้ไผ่ลูกแคนเป็นวัตถุดิบอบได้ 48 ครั้ง/ปี ใช้พลังงาน 18,831.97 บาท/ปี สามารถคืนทุนเครื่องอบแห้งได้ในระยะเวลา 7.9 ปี
- ระบบปรับอากาศแบบคอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยอากาศ
- ใช้ไม้ต้นรักใหญ่เป็นวัตถุดิบอบได้ 96 ครั้ง/ปี ใช้พลังงาน 15,747.67 บาท/ปี สามารถคืนทุนเครื่องอบแห้งได้ในระยะเวลา 3.6 ปี

เอกสารอ้างอิง

1. ดุษฎี บุญธรรม, ธนกฤษ ธามี. การพัฒนาเตาอบไม้สักและการวิเคราะห์ความเหมาะสมของสภาพการอบแห้งผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์. วารสารเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ. 2567; 3(1), 47-56. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jMMT/article/view/256147/172448
2. สิริสวัสดิ์ จึงเจริญนิรชร, ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์, วิทูรย์ ชิงถ้วยทอง, ทวีวัฒน์ สุภารส. การศึกษาการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยความร้อนทิ้งคืนกลับจากระบบปรับอากาศ. ในการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2559. น.1085-1090. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น. https://itech.tru.ac.th/2022/storage/research/629ae51e5a192.pdf
3. เสริมศักดิ์ ทิพย์วงศ์, ศักดิ์ศิริชัย ศรีสวัสดิ์, สุชาติ เขียวนอก. การพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งแบบป้องกันรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ต้นทุนต่ำ สำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกลุ่มดวงทอง จังหวัดเพชรบูรณ์. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์. 2565; 17(2), 167-180. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/uruj/article/view/248034

4. ประพันธ์พงษ์ สมศิลา, ทรงสุภา พุ่มชุมพล, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา, อภินันต์ นามเขต. การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R32. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม. 2566; 5(2), 207-222. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/psru-jite/article/view/249587
5. ธีรพงศ์ บริรักษ์, พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ, วรลักษณ์ เสถียรรังสฤษฎ์, ณรงค์ ภู่อยู่. ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน.วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2564; 15(1), 163-174. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/EAUHJSci/article/view/247285
6. กรมป่าไม้. ยุทธศาสตร์กรมป่าไม้ พ.ศ. 2560-2579: การอบแห้งไม้เพื่อความเสถียรเชิงมิติ. กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2560. https://forestinfo.forest.go.th/Content/file/stategic_20year_2560-2579.pdf
7. วสันต์ จีนธาดา, บัญญัติ นิยมวาส, อเนก ไทยกุล. การทดลองศึกษาสภาวะการอบแห้งปลาของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบควบคุมอุณหภูมิด้วยการเปิด-ปิดช่องระบายอากาศ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2561; 28(3), 613-623. https://riss.rmutsv.ac.th/upload/doc/202103/5UglCvGyU7Bp5hyL1l0Q/5UglCvGyU7Bp5hyL1l0Q.pdf
8. Mujumdar, A. S.Handbook of Industrial Drying (4th ed.). CRC Press. 2014. https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b17208/handbook-industrial-drying-arun-mujumdar
9. วรวรรธน์ นกน้อย, สิรินาฏ น้อยพิทักษ์, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. การตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 2561; 24(2), 1-8. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/TSAEJ/article/view/117516
10. Cengel, Y. and Boles, M. Design of Fruits Solar Energy Dryer under Climatic Condition in Jordan. Journal of Power and Energy Engineering. 2017; 5(2), 123-137. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1985563
11. Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H. Fundamentals of Fluid Mechanics. Wiley. 2013; https://madar-ju.com/storage/images/files/file_1738964502J91C4.pdf
12. ธิติ วานิชดิลกรัตน์, ศิริลักษณ์ สุขเจริญ, อิสรีย์ ฮาวปินใจ, อานนท์ เพิ่มพูล, นทีธรณ์ สิงห์สุวรรณ, ต่อลาภ คำโย. ประสิทธิภาพของเตาอบไม้แบบให้ความร้อนโดยตรง กรณีศึกษาการอบถาดพิซซ่าที่ผลิตจากไม้จามจุรี. วารสารวนศาสตร์. 2566; 42(1), 23-32. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/tjf/article/view/256796
13. ฐิปกรณ์ อุตรนคร, วราวิทย์ เอกอินทุมาศ, ทวิช พูลเงิน. ผลของปริมาณความชื้นในไม้ยางพาราที่ผ่านการอบด้วยความร้อนสูงที่มีต่อประสิทธิภาพของคานไม้ประสานด้วยกาวภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบคงค้างและแบบสลับทิศ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2567; 34(3), 1-14. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/kmutnb-journal/article/view/257658

บทความวิจัย (Research Article)

ผลของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยียกระถาง

Effects of Growing Media on the Growth of Potted Hydrangea (*Hydrangea macrophylla*)

สิงหนาถ โถทอง[1*] และ เอกรินทร์ สารีพัว[1]
Singhanart Thothong[1*] and Eakrin Sareepua[1]
[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
[1]Department of Plant Production Technology, Faculty of Agricultural Technology, Kalasin University
*Corresponding author; email: singhanart@rcat.ac.th

วันที่รับบทความ (Received) 13 กุมภาพันธ์ 2569
วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised) 22 เมษายน 2569
วันที่ตอบรับบทความ (Accepted) 27 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวัสดุปลูกชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยีย (*Hydrangea macrophylla*) และเพื่อเป็นแนวทางในการคัดเลือกวัสดุปลูกที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮเดรนเยียกระถางให้มีคุณภาพในระบบการปลูกในกระถาง วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) ใช้วัสดุปลูกจำนวน 12 กรรมวิธี จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 4 ต้น ปลูกในกระถางพลาสติกขนาด 8 นิ้ว วัสดุปลูกประกอบด้วยดินร่วนเป็นวัสดุหลักผสมร่วมกับอินทรียวัตถุคือ ปุ๋ยหมักแห้ง ถ่านบดหยาบ แกลบดิบ ขุยมะพร้าว ถ่านแกลบ และอนินทรียวัตถุคือ ทรายหยาบในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน จัดเรียงกระถางทดลองภายในโรงเรือนที่คลุมด้วยตาข่ายพรางแสงร้อยละ 70 โดยให้น้ำด้วยระบบน้ำหยดวันละ 2 ครั้ง (เช้า–เย็น) ครั้งละ 15 นาที และให้ปุ๋ย NPK สูตร 15-15-15 อัตรา 5 กรัมต่อกระถาง จำนวน 3 ครั้ง ได้แก่ ครั้งที่ 1 พร้อมปลูก ครั้งที่ 2 หลังการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 และครั้งที่ 3 หลังการเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 ตลอดระยะเวลาการทดลอง 3 เดือน ทำการบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต ได้แก่ ความสูงของลำต้น จำนวนกิ่ง และจำนวนใบ หลังการย้ายปลูกเป็นเวลา 30, 60 และ 90 วัน แล้วนำข้อมูลวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ผลการทดลองพบว่า วัสดุปลูกมีผลต่อการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยียอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยดินร่วนผสมปุ๋ยหมักแห้งให้ค่าความสูงของต้น จำนวนกิ่ง และจำนวนใบเฉลี่ยสูงที่สุดในทุกช่วงอายุของการเจริญเติบโต รองลงมาคือ ดินร่วนผสมถ่านบดหยาบและปุ๋ยหมักแห้ง ขณะที่การใช้ดินร่วนเพียงอย่างเดียวให้ค่าการเจริญเติบโตต่ำที่สุดในหลายช่วงของการศึกษา ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าวัสดุปลูกที่มีการผสมอินทรียวัตถุร่วมกับวัสดุที่มีความพรุนสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยียกระถางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การเจริญเติบโต, วัสดุปลูก, ไฮเดรนเยีย

Abstract

This study aimed to investigate the effects of different growing media on the growth of potted hydrangea (*Hydrangea macrophylla*) and to provide guidelines for selecting suitable growing media for high-quality potted hydrangea production. The experiment was conducted under a containerized cultivation system using a Completely Randomized Design (CRD) with 12 treatments, 5 replications, and 4 plants per replication. Plants were grown in 8-inch plastic pots. The growing media consisted of loam soil as the base material, mixed with organic materials including dry compost, coarse charcoal, raw rice husk, coconut coir, and rice husk charcoal, as well as an inorganic material, coarse sand, in different proportions. Pots were arranged in a greenhouse covered with 70% shading net. Irrigation was applied using a drip system twice daily (morning and evening) for 15 minutes per session. A compound fertilizer (NPK 15-15-15) was applied at a rate of 5 g per pot in three applications: at transplanting, after the first data collection, and after the second data collection, over a total experimental period of 3 months. Growth parameters, including plant height, number of branches, and number of leaves, were recorded at 30, 60, and 90 days after transplanting. Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA), and mean comparisons were performed using Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) at a 95% confidence level. The results showed that growing media significantly affected the growth of hydrangea ($p < 0.05$). The medium consisting of loam soil mixed with dry compost resulted in the highest plant height, number of branches, and number of leaves at all growth stages, followed by the medium containing loam soil mixed with coarse charcoal and dry compost. In contrast, the use of loam soil alone resulted in the lowest growth performance in several observation periods. These findings indicate that growing media containing organic matter combined with porous materials can effectively enhance the growth of potted hydrangea and can be used as a guideline for improving commercial production.

Keywords: growth, growing media, hydrangeas

บทนำ

การปลูกของไฮเดรนเยียได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในระบบการผลิตเชิงการค้า โดยเฉพาะการปลูกในโรงเรือนและการผลิตในภาชนะ ซึ่งเอื้อต่อการควบคุมคุณภาพและระยะเวลาออกดอกให้ตรงตามความต้องการของตลาดในระดับภูมิภาคเอเชีย ตลาดไม้ดอกไม้ประดับมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยตลาดไม้ตัดดอกในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก มีอัตราการเติบโตเฉลี่ยประมาณร้อยละ 5.9 ต่อปี ขณะที่ตลาดไม้ดอกไม้ประดับโดยรวมมีอัตราการเติบโตเฉลี่ยสูงถึงร้อยละ 8.43 ต่อปี ซึ่งสะท้อนถึงความต้องการของผู้บริโภคที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [1, 2] ไฮเดรนเยีย *(Hydrangea macrophylla* (Thunb.) Ser.) เป็นไม้ดอกไม้ประดับที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจในอุตสาหกรรมไม้ดอกไม้ประดับระดับโลก จัดเป็นไม้พุ่มผลัดใบที่มีถิ่นกำเนิดในทวีปเอเชีย นิยมปลูกทั้งในรูปแบบไม้ดอกกระถางและใช้ประดับภูมิทัศน์ เนื่องจากมีลักษณะเด่นคือช่อดอกขนาดใหญ่ สีสันสวยงาม และสามารถเปลี่ยนแปลงสีดอกได้ตามสภาพความเป็นกรด–ด่างของวัสดุปลูก [3] สำหรับประเทศไทย ตลาดไม้ตัดดอกมีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่องในทิศทางเดียวกับระดับภูมิภาค โดยมีอัตราการเติบโตเฉลี่ยประมาณร้อยละ 6.3 ต่อปี นอกจากนี้ยังพบว่าการนำเข้าไม้ดอกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสะท้อนถึงความต้องการของตลาดภายในประเทศที่ยังคงอยู่ในระดับสูงและมีศักยภาพในการพัฒนาเชิงพาณิชย์ [4] ไฮเดรนเยียจึงนับเป็นหนึ่งในไม้ดอกที่มีความต้องการของตลาดสูง ทั้งในกลุ่มไม้ตัดดอกและไม้ประดับ เนื่องจากมีการใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลาย และมีแนวโน้มความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [5]

ในประเทศไทยมีการผลิตไฮเดรนเยียกระถางเชิงพาณิชย์ เนื่องจากเป็นไม้ดอกที่มีลักษณะช่อดอกขนาดใหญ่ สีสันสวยงาม และเป็นที่ต้องการของตลาด [6] ไฮเดรนเยียเป็นพืชที่เหมาะสำหรับการปลูกในสภาพแวดล้อมแบบควบคุม โดยปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโต ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสง และการให้น้ำ [7] นอกจากนี้ ความสำเร็จของการผลิตไฮเดรนเยียกระถางยังขึ้นอยู่กับการเลือกใช้วัสดุปลูกที่เหมาะสม ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาระบบราก ความสามารถในการอุ้มน้ำ การถ่ายเทอากาศ และการดูดซึมธาตุอาหารของพืช ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโต การออกดอก และคุณภาพทางสัณฐานวิทยาของพืชโดยทั่วไป พีทมอสเป็นวัสดุปลูกที่นิยมใช้สำหรับการเพาะปลูกไฮเดรนเยีย เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสม โดยเฉพาะความสามารถในการอุ้มน้ำ การระบายอากาศ ความพรุน และความเหมาะสม ของค่าความเป็นกรด–ด่าง (pH) [8] อย่างไรก็ตาม พีทมอสเป็นวัสดุที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้มีราคาค่อนข้างสูงในประเทศไทย โดยมีราคาประมาณ 20–35 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งถือเป็นต้นทุนสำคัญในระบบการผลิตพืชกระถางเชิงพาณิชย์ [9,10] นอกจากนี้ การผลิตไฮเดรนเยียกระถางยังประสบปัญหาการใช้วัสดุปลูกที่มีน้ำหนักมาก เนื่องจากนิยมใช้ดินร่วนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีความหนาแน่นสูงและความพรุนต่ำ ส่งผลกระทบต่อการพัฒนาระบบรากและการถ่ายเทอากาศของพืช [11] อีกทั้งยังเพิ่มภาระด้านต้นทุนการขนส่งในระบบการจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตและการจัดการโดยรวมลดลง [12] ในบริบทของประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม มีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจำนวนมาก เช่น แกลบข้าวที่มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 20–22 ของน้ำหนักเมล็ดข้าว [13] วัสดุเหล่านี้จึงมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของวัสดุปลูกทดแทน งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่าแกลบข้าวและถ่านแกลบสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของวัสดุปลูก โดยเพิ่มการระบายน้ำ การถ่ายเทอากาศ และความสามารถในการยึดจับธาตุอาหาร [14, 15] ขณะที่ขุยมะพร้าวซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมมะพร้าวในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นวัสดุปลูกที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง มีความพรุนดี และเป็นทรัพยากรหมุนเวียน [16] นอกจากนี้ วัสดุปลูกอื่น เช่น ทรายหยาบช่วยเพิ่มการระบายน้ำและลดความหนาแน่นของวัสดุปลูก [11] ขณะที่ถ่านชีวภาพมีโครงสร้างพรุนช่วยเพิ่มการถ่ายเทอากาศและพื้นที่ผิวสำหรับการยึดจับธาตุอาหาร [17] และปุ๋ยหมักแห้งช่วยเพิ่มอินทรียวัตถุและความอุดมสมบูรณ์ของวัสดุปลูก รวมทั้งส่งเสริมกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน [18] การใช้วัสดุปลูกหลายชนิดร่วมกันจึงเป็นแนวทางที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุปลูกให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าจะมีการศึกษาวัสดุปลูกทางเลือกสำหรับไม้ดอกไม้ประดับชนิดต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง แต่ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบเกี่ยวกับการใช้วัสดุปลูกที่หาได้ในท้องถิ่นสำหรับการผลิตไฮเดรนเยียกระถางเชิงพาณิชย์ภายใต้สภาพโรงเรือนในเขตร้อนยังมีอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะการศึกษาที่ประเมินผลทั้งด้านการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยียซึ่งเป็นพืชที่มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุปลูกอย่างชัดเจน

ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวัสดุปลูกชนิดต่าง ๆ ที่ประกอบด้วยวัสดุที่หาได้ในท้องถิ่น ได้แก่ ดินร่วน ถ่านบดหยาบ ปุ๋ยหมักแห้ง แกลบดิบ ขุยมะพร้าว ถ่านแกลบ และทรายหยาบ ภายใต้สภาพโรงเรือน ต่อการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยียกระถาง โดยผลการศึกษาที่ได้จะเป็นแนวทางในการใช้วัสดุปลูกที่เหมาะสมต่อการผลิตไฮเดรนเยียกระถางที่มีคุณภาพ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของวัสดุปลูกชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยียกระถาง
2. เพื่อเป็นแนวทางในการใช้วัสดุปลูกที่เหมาะสมต่อการผลิตไฮเดรนเยียกระถางที่มีคุณภาพ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การวางแผนการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ มุ่งเน้นการศึกษาผลของวัสดุปลูกที่มีต่อการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยียกระถาง โดยดำเนินการทดลองภายใต้โรงเรือนทดลอง ณ แผนกวิชาพืชศาสตร์ วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีร้อยเอ็ด ในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2568 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2569 วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) โดยประกอบด้วยกรรมวิธีทดลองจำนวน 12 กรรมวิธี ได้แก่

กรรมวิธีที่ 1 ดินร่วน (T1) (กรรมวิธีควบคุม)
กรรมวิธีที่ 2 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ อัตราส่วน 1:1 (T2)
กรรมวิธีที่ 3 ดินร่วน : ปุ๋ยหมักแห้ง อัตราส่วน 1:1 (T3)
กรรมวิธีที่ 4 ดินร่วน : แกลบดิบ อัตราส่วน 1:1 (T4)
กรรมวิธีที่ 5 ดินร่วน : ขุยมะพร้าว อัตราส่วน 1:1 (T5)
กรรมวิธีที่ 6 ดินร่วน : ถ่านแกลบ อัตราส่วน 1:1 (T6)
กรรมวิธีที่ 7 ดินร่วน : ทรายหยาบ อัตราส่วน 1:1 (T7)
กรรมวิธีที่ 8 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ปุ๋ยหมักแห้ง อัตราส่วน 1:1:1 (T8)
กรรมวิธีที่ 9 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : แกลบดิบ อัตราส่วน 1:1:1 (T9)
กรรมวิธีที่ 10 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ขุยมะพร้าว อัตราส่วน 1:1:1 (T10)
กรรมวิธีที่ 11 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ถ่านแกลบ อัตราส่วน 1:1:1 (T11)
กรรมวิธีที่ 12 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ทรายหยาบ อัตราส่วน 1:1:1 (T12)

โดยในแต่ละกรรมวิธีมีการทดลองซ้ำจำนวน 5 ซ้ำ แต่ละซ้ำมีจำนวน 4 ต้น ปลูกในกระถางพลาสติกขนาด 8 นิ้ว โดยมีการกำหนดอัตราส่วน 1:1 และ 1:1:1 (v/v) ดัดแปลงจากวิธีของ Teppala (2018) [19]

2. ขั้นตอนการทดลอง

1) การเตรียมดินร่วน

เก็บตัวอย่างดินร่วนในชั้นความลึก 0–20 เซนติเมตร จากหลายจุดในพื้นที่ศึกษามาผสมรวมกัน ผึ่งในที่ร่มให้แห้งพอเหมาะแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 5 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปตากแดดจนแห้งสนิทเพื่อลดความชื้นและกำจัดศัตรูพืช เมล็ดวัชพืชและเชื้อโรคก่อนนำไปใช้งาน

2) การเตรียมถ่านบดหยาบ

ใช้ถ่านไบโอชาร์จากศูนย์การเรียนรู้เพื่อการพัฒนาตามหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงไร่มาลีรักษ์ จังหวัดเลย โดยคัดเลือกชิ้นที่ปราศจากสิ่งเจือปน ตากแดดให้แห้ง และบดให้มีขนาดประมาณ 0.5–1.0 เซนติเมตร เพื่อให้เหมาะสมต่อการผสมวัสดุปลูก

3) การเตรียมปุ๋ยหมักแห้ง

ผสมมูลวัวแห้ง แกลบดิบ และใบไม้แห้งสับ ในอัตราส่วน 1:1:1 โดยปริมาตร หมักด้วยสารละลายจุลินทรีย์อีเอ็ม (EM) 50 มิลลิลิตร ผสมกากน้ำตาล 50 มิลลิลิตร ในน้ำสะอาด 10 ลิตร คลุกเคล้าให้มีความชื้นสม่ำเสมอแล้วบรรจุลงกระสอบ (3/4 ของความจุ) มัดปากกระสอบให้แน่นและพลิกกลับกระสอบวันละ 1 ครั้ง เพื่อระบายอากาศ โดยใช้ระยะเวลาหมักรวม 15 วัน

4) การเตรียมแกลบดิบ

คัดเลือกแกลบดิบที่สะอาด ปราศจากสิ่งเจือปน นำไปลดความชื้นด้วยการตากแดดจนแห้งสนิทเพื่อป้องกันเชื้อรา จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงเพื่อคัดแยกเศษวัสดุแปลกปลอมและควบคุมขนาดของเมล็ดแกลบให้มีความสม่ำเสมอ ก่อนจัดเก็บในภาชนะปิดมิดชิดเพื่อรักษาคุณภาพวัสดุและป้องกันการปนเปื้อนก่อนนำไปใช้งาน

5) การเตรียมขุยมะพร้าว

เลือกใช้ขุยมะพร้าวเก่า (Aged coco peat) ที่ผ่านการย่อยสลายเพื่อให้มีเนื้อสัมผัสละเอียดและลดความเป็นพิษต่อรากพืชนำมาตากแดดเพื่อลดความชื้นและฆ่าเชื้อโรค จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงเพื่อคัดเส้นใยขนาดใหญ่และสิ่งปนเปื้อนออก ให้เหลือเฉพาะวัสดุที่มีความละเอียดสม่ำเสมอสำหรับใช้เป็นส่วนผสมวัสดุปลูก

6) การเตรียมถ่านแกลบ

ใช้ถ่านแกลบที่ผ่านกระบวนการเผาแบบควบคุมอากาศ (Controlled carbonization) มีสีดำสม่ำเสมอและปราศจากขี้เถ้า ตากแดดให้แห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรงเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอม เพื่อให้ได้วัสดุที่มีโครงสร้างพรุน ช่วยเพิ่มการถ่ายเทอากาศและการอุ้มน้ำในวัสดุปลูก

7) การเตรียมทรายหยาบ

คัดเลือกทรายหยาบที่ปราศจากดินเลนและอินทรียวัตถุ ล้างด้วยน้ำสะอาดจนน้ำใสเพื่อกำจัดฝุ่นแร่และสารแขวนลอยที่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด–ด่าง ผึ่งแดดจนแห้งสนิทแล้วร่อนผ่านตะแกรงเพื่อคัดขนาดเม็ดทรายให้สม่ำเสมอ

8) การเตรียมต้นพันธุ์

การเตรียมต้นพันธุ์ไฮเดรนเยียดำเนินการโดยใช้ต้นพันธุ์จากกิ่งปักชำอายุ 2 เดือน ซึ่งจัดหามาจากเกษตรกรผู้ปลูกไม้ดอกไม้ประดับ ณ ไร่มาลีรักษ์ อำเภอภูเรือ จังหวัดเลย ทำการคัดเลือกต้นพันธุ์ที่มีลักษณะสม่ำเสมอ ได้แก่ ความสูง ลำต้น และสีใบที่ใกล้เคียงกัน ตลอดจนปราศจากโรคและแมลง เพื่อให้ได้ต้นพันธุ์ที่มีคุณภาพและความสม่ำเสมอสำหรับใช้ในการทดลอง ทั้งนี้ใช้ต้นพันธุ์จำนวนทั้งสิ้น 240 ต้น ปลูกลงในกระถางจำนวน 60 กระถาง โดยปลูกกระถางละ 4 ต้น (พัฒนาตามความต้องการของเกษตรกร)

9) การปลูกลงกระถางและการดูแลรักษา

การเตรียมต้นไฮเดรนเยียเพื่อการปลูกในโรงเรือนเริ่มจากการเตรียมดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ระหว่าง 5–7 โดยผสมกับปุ๋ยหมักแห้ง ถ่านบดหยาบ และวัสดุอื่น ๆ ตามการวางแผนการทดลอง จากนั้นย้ายต้นกล้าไฮเดรนเยียที่เพาะชำไว้แล้วเป็นระยะเวลา 2 เดือน ลงปลูกในกระถางตามแผนการทดลอง 12 กรรมวิธี ๆ ละ 5 ซ้ำ เมื่อปลูกเรียบร้อยแล้ว จึงทำการจัดเรียงกระถางภายใต้โรงเรือนโดยวิธีการสุ่มด้วยการจับฉลากหมายเลข เพื่อให้กระถางได้รับสภาพแวดล้อมอย่างสม่ำเสมอ โดยโรงเรือนมีการคลุมตาข่ายพรางแสง 70 เปอร์เซ็นต์ ให้น้ำโดยระบบน้ำหยดวันละ 2 ครั้ง เช้าและเย็น โดยใช้เวลาในการเปิดน้ำครั้งละ 15 นาที และให้ปุ๋ย NPK สูตร 15-15-15 ในอัตรา 5 กรัมต่อกระถาง โดยให้ครั้งแรกพร้อมปลูก ครั้งที่สองหลังจากเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 และครั้งที่สามหลังจากเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 จนครบระยะเวลา 3 เดือน

3. วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลในการศึกษานี้เป็นการบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยีย โดยเริ่มดำเนินการบันทึกเมื่อ อายุ 30, 60 และ 90 วัน หลังย้ายปลูกลงกระถาง ซึ่งในแต่ละช่วงอายุได้ทำการบันทึกข้อมูลตามรายการดังต่อไปนี้

การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุปลูกก่อนปลูก

ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างวัสดุปลูกจากแต่ละกรรมวิธีก่อนเริ่มการทดลองโดยทำการสุ่มเก็บตัวอย่างวัสดุปลูกจากแต่ละกรรมวิธี โดยใช้วิธี การสุ่มเก็บตัวอย่างแบบผสม (composite sampling) ซึ่งดำเนินการโดยสุ่มเก็บวัสดุปลูก ได้แก่ บริเวณด้านบน ด้านกลาง ด้านล่าง และด้านข้างของกองวัสดุปลูก จำนวน 5 จุดแล้วนำมารวมกันจากนั้นคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียว

ทั้ง 12 กรรมวิธี แล้วลดปริมาณตัวอย่างแต่ละกรรมวิธีด้วยวิธีแบ่ง 4 ส่วนเท่า ๆ กัน โดยเลือกเก็บ 2 ส่วนที่อยู่ตรงข้ามกันให้ได้ตัวอย่าง 1 กิโลกรัม ใส่ถุงพลาสติกสะอาด ปิดผนึก [20] นำไปวิเคราะห์ค่าความอุดมสมบูรณ์ของดิน ได้แก่ อินทรียวัตถุ (Organic matter; OM) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5) ไนโตรเจน (N) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) (dS/m) โดยการวิเคราะห์ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการกลุ่มวิเคราะห์ดิน สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 5 จังหวัดขอนแก่น

ข้อมูลลักษณะการเจริญเติบโต ได้แก่

1) วัดความสูงทรงพุ่ม (เซนติเมตร) ทำการวัดความสูงของต้นไฮเดรนเยียจากโคนต้นถึงปลายยอด โดยใช้ไม้บรรทัดเป็นเครื่องมือวัดที่มีความละเอียดเป็นเซนติเมตร เก็บข้อมูลในช่วงอายุ 30, 60 และ 90 วันหลังการย้ายปลูกลงกระถาง

2) จำนวนกิ่งต่อต้น (กิ่งต่อต้น) ทำการนับจำนวนกิ่งที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อต้นในแต่ละช่วงเวลา คือ 30, 60 และ 90 วัน หลังการย้ายปลูกลงกระถาง

3) จำนวนใบต่อต้น (ใบต่อต้น) ทำการนับจำนวนใบทั้งหมดที่เกิดขึ้นต่อต้นในช่วงเวลาเดียวกันคือ 30, 60 และ 90 วันหลังการย้ายปลูกลงกระถาง

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติด้วย Analysis of Variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการวิจัย

1. สมบัติของวัสดุปลูกก่อนการทดลอง

จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของวัสดุปลูกจำนวน 12 ตัวอย่าง พบว่า วัสดุปลูกมีความแปรปรวนของค่าทางเคมีในแต่ละตัวอย่าง โดยค่าปริมาณอินทรียวัตถุ (Organic matter; OM) อยู่ในช่วง 4.49–16.57% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุปลูกมีอินทรียวัตถุในระดับปานกลางถึงค่อนข้างสูงในหลายตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่มีค่าอินทรียวัตถุสูงที่สุดเท่ากับ 16.57% และต่ำที่สุดเท่ากับ 4.49% ในส่วนของธาตุอาหารหลัก พบว่า ปริมาณไนโตรเจน (N) อยู่ในช่วง 0.237–0.517% ฟอสฟอรัส (P_2O_5) อยู่ในช่วง 0.17–0.43% และโพแทสเซียม (K_2O) อยู่ในช่วง 0.09–0.37% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าธาตุอาหารในวัสดุปลูกมีความแตกต่างกันในแต่ละตัวอย่าง ขณะที่ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) อยู่ในช่วง 0.25–1.13 dS/m โดยอยู่ในระดับต่ำ ถึงปานกลาง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางเคมีของวัสดุปลูกก่อนการทดลอง

กรรมวิธี	อินทรียวัตถุ(%)	ไนโตรเจน (%)	ฟอสฟอรัส (%)	โพแทสเซียม (%)	pH	ค่าการนำไฟฟ้า (dS/m)
T1	15.92	0.432	0.34	0.21	7.4	0.46
T2	12.38	0.517	0.27	0.26	7.8	0.53
T3	11.23	0.394	0.31	0.21	7.5	0.66
T4	16.57	0.481	0.43	0.42	7.6	1.13
T5	16.15	0.386	0.33	0.29	7.6	0.46
T6	11.95	0.368	0.34	0.27	7.8	0.45
T7	16.2	0.494	0.34	0.31	7.3	0.73
T8	15.57	0.378	0.3	0.28	7.6	0.76
T9	4.49	0.329	0.43	0.37	8	1.47
T10	12.07	0.408	0.36	0.28	7.8	0.56
T11	8.08	0.237	0.19	0.09	7.7	0.31
T12	6.9	0.391	0.17	0.11	7.9	0.25

2. อัตราการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยีย

ความสูงของลำต้น

ในด้านความสูงต้น พบว่า กรรมวิธีที่ 3 (ดินร่วน 1 ส่วน : ปุ๋ยหมักแห้ง 1 ส่วน) ให้ค่าความสูงเฉลี่ยสูงที่สุดในทุกช่วงอายุ โดยมีค่า 33.80, 35.20 และ 42.00 เซนติเมตร ที่อายุ 30, 60 และ 90 วันหลังย้ายปลูก ตามลำดับ โดยในช่วงอายุ 30 และ 60 วัน ไม่แตกต่างทางสถิติกับกรรมวิธีที่ 8 (ดินร่วน 1 ส่วน : ถ่านบดหยาบ 1 ส่วน : ปุ๋ยหมักแห้ง 1 ส่วน) อย่างไรก็ตาม เมื่ออายุ 90 วันหลังย้ายปลูก พบว่ากรรมวิธีที่ 3 มีความสูงเฉลี่ยของต้นสูงที่สุดและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีอื่น ๆ ขณะที่กรรมวิธีที่ 1 (ดินร่วนเพียงอย่างเดียว) ให้ค่าความสูงเฉลี่ยต่ำที่สุดอย่างสม่ำเสมอในทุกช่วงอายุ

ตารางที่ 2 อัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงลำต้นของไฮเดรนเยียที่ปลูกลงในวัสดุปลูกต่างกัน 12 สูตร หลังย้ายปลูก 30 60 และ 90 วัน

กรรมวิธี	ความสูงลำต้นของต้นไฮเดรนเยีย (เซนติเมตร)		
	30 วัน	60 วัน	90 วัน
กรรมวิธีที่ 1 ดินร่วน (T1) (กรรมวิธีควบคุม)	22.00^{d}	24.20^{e}	30.20^{h}
กรรมวิธีที่ 2 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ อัตราส่วน 1:1 (T2)	27.80^{c}	29.40^{d}	33.80^{fg}
กรรมวิธีที่ 3 ดินร่วน : ปุ๋ยหมักแห้ง อัตราส่วน 1:1 (T3)	33.80^{a}	35.20^{a}	42.00^{a}
กรรมวิธีที่ 4 ดินร่วน : แกลบดิบ อัตราส่วน 1:1 (T4)	30.20^{b}	32.20^{bc}	34.60^{efg}
กรรมวิธีที่ 5 ดินร่วน : ขุยมะพร้าว อัตราส่วน 1:1 (T5)	31.20^{b}	32.80^{bc}	35.60^{ef}
กรรมวิธีที่ 6 ดินร่วน : ถ่านแกลบ อัตราส่วน 1:1 (T6)	24.20^{d}	26.20^{e}	32.60^{gh}

ตารางที่ 2 อัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงลำต้นของไฮเดรนเยียที่ปลูกลงในวัสดุปลูกต่างกัน 12 สูตร หลังย้ายปลูก 30 60 และ 90 วัน (ต่อ)

กรรมวิธีที่ 7 ดินร่วน : ทรายหยาบ อัตราส่วน 1:1 (T7)	30.60^{b}	32.60^{bc}	36.60^{cde}
กรรมวิธีที่ 8 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ปุ๋ยหมักแห้ง อัตราส่วน 1:1:1 (T8)	31.80^{ab}	34.20^{ab}	39.40^{b}
กรรมวิธีที่ 9 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : แกลบดิบ อัตราส่วน 1:1:1 (T9)	31.40^{b}	33.80^{abc}	38.40^{bc}
กรรมวิธีที่ 10 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ขุยมะพร้าว อัตราส่วน 1:1:1 (T10)	30.20^{b}	32.40^{bc}	38.80^{bc}
กรรมวิธีที่ 11 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ถ่านแกลบ อัตราส่วน 1:1:1 (T11)	30.20^{b}	32.20^{bc}	35.80^{def}
กรรมวิธีที่ 12 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ทรายหยาบ อัตราส่วน 1:1:1 (T12)	29.80^{bc}	32.00^{c}	38.20^{bcd}
Mean	29.43	31.43	36.33
F-test	*	*	*
CV (%)	6.27	5.35	5.58

หมายเหตุ

* หมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$)

ตารางที่ 3 อัตราการเจริญเติบโตด้านจำนวนกิ่งของไฮเดรนเยียที่ปลูกลงในวัสดุปลูกต่างกัน 12 สูตร หลังย้ายปลูก 30 60 และ 90 วัน

กรรมวิธี	จำนวนกิ่งของต้นไฮเดรนเยีย (กิ่งต่อต้น)		
	30 วัน	60 วัน	90 วัน
กรรมวิธีที่ 1 ดินร่วน (T1) (กรรมวิธีควบคุม)	4.60^{e}	4.80^{d}	5.20^{f}
กรรมวิธีที่ 2 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ อัตราส่วน 1:1 (T2)	7.00^{bc}	7.40^{abc}	7.80^{ab}
กรรมวิธีที่ 3 ดินร่วน : ปุ๋ยหมักแห้ง อัตราส่วน 1:1 (T3)	7.80^{a}	8.20^{a}	8.20^{a}
กรรมวิธีที่ 4 ดินร่วน : แกลบดิบ อัตราส่วน 1:1 (T4)	6.20^{d}	5.60^{d}	6.20^{de}
กรรมวิธีที่ 5 ดินร่วน : ขุยมะพร้าว อัตราส่วน 1:1 (T5)	5.00^{e}	5.20^{d}	5.40^{f}
กรรมวิธีที่ 6 ดินร่วน : ถ่านแกลบ อัตราส่วน 1:1 (T6)	4.80^{e}	5.40^{d}	5.60^{ef}
กรรมวิธีที่ 7 ดินร่วน : ทรายหยาบ อัตราส่วน 1:1 (T7)	6.40^{cd}	6.80^{bc}	7.20^{bc}
กรรมวิธีที่ 8 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ปุ๋ยหมักแห้ง อัตราส่วน 1:1:1 (T8)	7.40^{ab}	7.60^{ab}	8.00^{a}
กรรมวิธีที่ 9 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : แกลบดิบ อัตราส่วน 1:1:1 (T9)	6.80^{bcd}	7.00^{bc}	7.60 ^{ab}
กรรมวิธีที่ 10 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ขุยมะพร้าว อัตราส่วน 1:1:1 (T10)	6.20^{d}	6.60^{c}	6.60^{cd}
กรรมวิธีที่ 11 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ถ่านแกลบ อัตราส่วน 1:1:1 (T11)	7.00^{bc}	7.40^{abc}	7.60^{ab}
กรรมวิธีที่ 12 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ทรายหยาบ อัตราส่วน 1:1:1 (T12)	6.20^{d}	6.80^{bc}	7.80^{ab}
Mean	6.28	6.56	6.93
F-test	*	*	*
CV (%)	9.30	11.88	8.01

หมายเหตุ

* หมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$)

จำนวนใบ

จากการศึกษาผลของวัสดุปลูกชนิดต่าง ๆ ต่อการเจริญเติบโตด้านจำนวนใบของไฮเดรนเยีย พบว่า เมื่ออายุ 30 วันหลังย้ายปลูก กรรมวิธีที่ 3 การใช้ดินร่วน 1 ส่วน : ปุ๋ยหมักแห้ง 1 ส่วน ให้จำนวนใบเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 108.80 ใบ ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากกรรมวิธีอื่นทั้งหมดที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$) รองลงมาคือกรรมวิธีที่ 8 การใช้ดินร่วน 1 ส่วน : ถ่านบดหยาบ 1 ส่วน : ปุ๋ยหมักแห้ง 1 ส่วน และกรรมวิธีที่ 9 การใช้ดินร่วน 1 ส่วน : ถ่านบดหยาบ 1 ส่วน : แกลบดิบ 1 ส่วน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 84.80 และ 83.00 ใบ ตามลำดับ ขณะที่กรรมวิธีที่ 1 การใช้ดินร่วนเพียงอย่างเดียว ให้จำนวนใบเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 71.80 ใบ เมื่อพิจารณาที่อายุ 60 วันหลังย้ายปลูก พบว่า กรรมวิธีที่ 3 ยังคงให้จำนวนใบเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 117.80 ใบ และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากกรรมวิธีอื่นทั้งหมด ($P < 0.05$) รองลงมาคือกรรมวิธีที่ 8 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 87.20 ใบ และกรรมวิธีที่ 10 การใช้ดินร่วน 1 ส่วน : ถ่านบดหยาบ 1 ส่วน : ขุยมะพร้าว 1 ส่วน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 83.00 ใบ ขณะที่กรรมวิธีที่ 1 ให้จำนวนใบเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 71.80 ใบ สำหรับอายุ 90 วันหลังย้ายปลูก พบว่า กรรมวิธีที่ 3 ยังคงให้จำนวนใบเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 121.40 ใบ ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากกรรมวิธีอื่นทั้งหมด ($P < 0.05$) รองลงมาคือกรรมวิธีที่ 8 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 93.00 ใบ และกรรมวิธีที่ 10 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 88.80 ใบ ขณะที่กรรมวิธีที่ 1 ให้จำนวนใบเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 76.80 ใบ ดังแสดงในตารางที่ 3 และภาพที่ 1

ตารางที่ 4 อัตราการเจริญเติบโตด้านจำนวนใบของไฮเดรนเยียที่ปลูกลงในวัสดุปลูกต่างกัน 12 สูตร หลังย้ายปลูก 30 60 และ 90 วัน

กรรมวิธี	จำนวนใบของต้นไฮเดรนเยีย (ใบต่อต้น)		
	30 วัน	60 วัน	90 วัน
กรรมวิธีที่ 1 ดินร่วน (T1) (กรรมวิธีควบคุม)	71.80^{c}	71.80^{d}	76.80^{d}
กรรมวิธีที่ 2 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ อัตราส่วน 1:1 (T2)	72.60^{c}	76.20^{cd}	81.00^{cd}
กรรมวิธีที่ 3 ดินร่วน : ปุ๋ยหมักแห้ง อัตราส่วน 1:1 (T3)	108.80^{a}	117.80^{a}	121.40^{a}
กรรมวิธีที่ 4 ดินร่วน : แกลบดิบ อัตราส่วน 1:1 (T4)	76.80^{bc}	79.40^{bcd}	84.20^{cd}
กรรมวิธีที่ 5 ดินร่วน : ขุยมะพร้าว อัตราส่วน 1:1 (T5)	75.20^{bc}	80.40^{bcd}	87.60^{bc}
กรรมวิธีที่ 6 ดินร่วน : ถ่านแกลบ อัตราส่วน 1:1 (T6)	78.80^{bc}	81.60^{bc}	87.20^{bc}
กรรมวิธีที่ 7 ดินร่วน : ทรายหยาบ อัตราส่วน 1:1 (T7)	78.20^{bc}	81.80^{bc}	86.80^{bc}
กรรมวิธีที่ 8 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ปุ๋ยหมักแห้ง อัตราส่วน 1:1:1 (T8)	84.80^{b}	87.20^{b}	93.00^{b}
กรรมวิธีที่ 9 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : แกลบดิบ อัตราส่วน 1:1:1 (T9)	83.00^{b}	83.20^{bc}	88.00^{bc}
กรรมวิธีที่ 10 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ขุยมะพร้าว อัตราส่วน 1:1:1 (T10)	78.80^{bc}	83.00^{bc}	88.80^{bc}
กรรมวิธีที่ 11 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ถ่านแกลบ อัตราส่วน 1:1:1 (T11)	79.20^{bc}	82.40^{bc}	87.20^{bc}
กรรมวิธีที่ 12 ดินร่วน : ถ่านบดหยาบ : ทรายหยาบ อัตราส่วน 1:1:1 (T12)	77.00^{bc}	81.20^{bc}	86.60^{bc}
Mean	80.41	83.83	89.05
F-test	*	*	*
CV (%)	9.93	8.52	7.64

หมายเหตุ

* หมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$)



ภาพที่ 1 ลักษณะการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยีย (*Hydrangea macrophylla*) ที่ปลูกในวัสดุปลูกสูตรต่าง ๆ จำนวน 12 กรรมวิธี (T1–T12) ที่อายุ 90 วันหลังย้ายปลูก โดยประเมินจากความสูงต้น จำนวนกิ่ง และจำนวนใบ แสดงความแตกต่างของการเจริญเติบโตภายใต้สภาพโรงเรือน

อภิปรายผล

จากผลการศึกษาผลของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยียกระถางพบว่า องค์ประกอบของวัสดุปลูกมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ต่อการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยียกระถางในทุกตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความสูงต้น จำนวนกิ่ง และจำนวนใบ โดยเฉพาะกรรมวิธีที่ 3 ซึ่งใช้ดินร่วนร่วมกับปุ๋ยหมักแห้งในอัตราส่วน 1:1 ให้ผลการเจริญเติบโตดีที่สุดอย่างสม่ำเสมอในทุกช่วงอายุ ขณะที่กรรมวิธีที่ใช้ดินร่วนเพียงอย่างเดียวให้ค่าการเจริญเติบโตต่ำที่สุด แสดงให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของอินทรียวัตถุในการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุปลูกและส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช เมื่อพิจารณาความแตกต่างของผลการเจริญเติบโตสามารถอธิบายได้จากลักษณะของวัสดุปลูกที่มีส่วนผสมของปุ๋ยหมักแห้ง ซึ่งมีปริมาณอินทรียวัตถุส่งผลต่อการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยีย สอดคล้องกับรายงานของ Widiasri et al. (2022) [21] ที่รายงานว่าวัสดุปลูกที่มีอินทรียวัตถุสูงช่วยเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ เพิ่มช่องว่างอากาศภายในวัสดุ และเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity; CEC) ส่งผลให้ธาตุอาหารถูกปลดปล่อยอย่างต่อเนื่องและอยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงทำให้พืชมีการเจริญเติบโตสูงขึ้น ด้านความสูงลำต้นพบว่า กรรมวิธีที่ 3 มีค่าความสูงมากที่สุดในทุกช่วงอายุการทดลอง และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในระยะ 90 วัน แสดงให้เห็นว่าวัสดุปลูกที่มีอินทรียวัตถุสามารถส่งเสริมการเจริญของลำต้นได้ดีกว่าวัสดุปลูกที่มีโครงสร้างแน่นหรือมีธาตุอาหารจำกัด เนื่องจากบริเวณรากมีสภาพเหมาะสม ทำให้พืชดูดน้ำได้ดีและมีอากาศเพียงพอ จึงส่งผลให้พืชเจริญเติบโตได้ดี [22] ในส่วนของจำนวนกิ่งและจำนวนใบพบว่ากรรมวิธีที่มีปุ๋ยหมักเป็นองค์ประกอบ โดยเฉพาะกรรมวิธีที่ 3 และ 8 ให้ค่ามากที่สุด แสดงให้เห็นว่าอินทรียวัตถุมีบทบาทสำคัญต่อการกระตุ้นการแตกยอดและการสร้างใบ สอดคล้องกับรายงานของ Dorji et al. (2023) [23] ที่รายงานว่าอินทรียวัตถุช่วยเพิ่มความพร้อมของไนโตรเจนและธาตุอาหารที่เกี่ยวข้องกับการสร้างคลอโรฟิลล์และการแบ่งเซลล์ ส่งผลให้พืชมีพื้นที่ใบเพิ่มขึ้นและสามารถสังเคราะห์แสงได้มากขึ้น นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรรมวิธีที่ 3 (ดินร่วนผสมกับปุ๋ยหมักแห้ง) และกรรมวิธีที่ 8 (ดินร่วนผสมกับถ่านบดหยาบและปุ๋ยหมักแห้ง) แม้ว่าทั้งสองกรรมวิธีจะให้ผลการเจริญเติบโตในระดับสูง แต่กรรมวิธีที่ 3 ให้ผลดีกว่าเล็กน้อยในทุกตัวแปร สะท้อนให้เห็นว่าสัดส่วนของวัสดุปลูกมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของพืช ทั้งนี้แม้ว่าวัสดุที่มีความพรุนสูง เช่น ถ่านบดหยาบ จะช่วยเพิ่มความโปร่งและการระบายอากาศของวัสดุปลูก แต่หากใช้ในสัดส่วนที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้ความเข้มข้นของธาตุอาหารในวัสดุปลูกลดลง ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชลดลงได้ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Huang and Gu (2019) [22] ที่ระบุว่าการปรับสัดส่วนของวัสดุปลูกมีผลต่อสมบัติทางกายภาพ

และเคมีของวัสดุปลูก รวมถึงความสามารถในการดูดใช้ธาตุอาหารของพืช ในทางตรงกันข้าม กรรมวิธีที่ 1 (ดินร่วนเพียงอย่างเดียว) ให้ผลการเจริญเติบโตต่ำที่สุดในทุกตัวแปร แสดงให้เห็นว่าการใช้ดินร่วนเพียงอย่างเดียวไม่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืชในภาชนะ เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านความพรุน การระบายอากาศ และการปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ระบบรากพัฒนาได้ ไม่เต็มที่และลดประสิทธิภาพในการดูดใช้ธาตุอาหารของพืช ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Dorji et al. (2023) [23] ที่พบว่าวัสดุปลูกที่มีองค์ประกอบของอินทรียวัตถุและโครงสร้างโปร่งสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ดีกว่าวัสดุปลูกที่มีดินเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อพิจารณาร่วมกับค่าความเป็นกรด–ด่าง (pH) ของวัสดุปลูก ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 7.3–8.0 แสดงให้เห็นว่าวัสดุปลูกมีลักษณะเป็นกลางถึงด่างเล็กน้อย ซึ่งอาจส่งผลต่อความสามารถในการละลายของธาตุอาหาร เช่น เหล็ก แมงกานีส และสังกะสี อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้พบว่าพืชยังสามารถเจริญเติบโตได้ดี โดยเฉพาะในกรรมวิธีที่มีปุ๋ยหมักเป็นองค์ประกอบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอินทรียวัตถุช่วยปรับสภาพแวดล้อมบริเวณรากให้มีความเหมาะสมต่อการดูดใช้ธาตุอาหาร [23, 24] ในส่วนของค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) ของวัสดุปลูกที่อยู่ในช่วง 0.25–1.13 dS/m ซึ่งจัดอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง แสดงให้เห็นว่าวัสดุปลูกยังอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อพืช จึงส่งผลให้การเจริญเติบโตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับรายงานของ Widiasri et al. (2022) และรายงานของ Dorji et al. (2023) [21, 23] ที่รายงานว่าค่า EC ที่เหมาะสมในวัสดุปลูกถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ในขณะที่ค่า EC ที่สูงเกินไปอาจทำให้พืชเกิดความเครียดจากความเค็มและยับยั้งการเจริญเติบโตได้

สรุปผล

จากการศึกษาผลของวัสดุปลูกชนิดต่าง ๆ ต่อการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยียกระถางเชิงพาณิชย์ พบว่า วัสดุปลูกมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในทุกตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความสูงต้น จำนวนกิ่ง และจำนวนใบ โดยวัสดุปลูกที่มีส่วนผสมของอินทรียวัตถุ โดยเฉพาะปุ๋ยหมักแห้ง สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ดีกว่าวัสดุปลูกที่ไม่มีอินทรียวัตถุอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าวัสดุปลูกที่มีคุณสมบัติด้านการอุ้มน้ำ การระบายอากาศ และการให้ธาตุอาหารที่เหมาะสม มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของไฮเดรนเยียกระถาง ในด้านการคัดเลือกวัสดุปลูกที่เหมาะสม พบว่ากรรมวิธีที่ 3 ซึ่งใช้ดินร่วนผสมปุ๋ยหมักแห้งในอัตราส่วน 1:1 เป็นวัสดุปลูกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไฮเดรนเยียกระถาง เนื่องจากให้ผลการเจริญเติบโตสูงที่สุดในทุกตัวแปรอย่างสม่ำเสมอ รองลงมาคือกรรมวิธีที่มีการผสมปุ๋ยหมักร่วมกับวัสดุที่มีความพรุน เช่น ถ่านบดหยาบ ซึ่งแม้จะช่วยเพิ่มการระบายอากาศของวัสดุปลูก แต่หากใช้ในสัดส่วนที่ไม่เหมาะสมอาจส่งผลให้การเจริญเติบโตลดลง

วัสดุปลูกที่มีการผสมอินทรียวัตถุในสัดส่วนที่เหมาะสม โดยเฉพาะดินร่วนผสมปุ๋ยหมักแห้ง อัตราส่วน 1:1 เป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮเดรนเยียกระถาง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณไร่มาลีรักษ์ อำเภอภูเรือ จังหวัดเลย ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนต้นพันธุ์ไฮเดรนเยียสำหรับใช้ในการดำเนินการทดลองในครั้งนี้ ตลอดจนขอขอบคุณวิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีร้อยเอ็ด ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์เครื่องมือ และสถานที่สำหรับการดำเนินการทดลองจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. Market Data Forecast. Asia Pacific floriculture market size, share & trends (2025–2033) [Internet]. Hyderabad: Market Data Forecast; 2024 [23 Mar 2026]. Available from: https://www.marketdataforecast.com/market-reports/apac-floriculture-market
2. Grand View Research. Asia Pacific cut flowers market size & outlook, 2025–2030 [Internet]. San Francisco (CA): Grand View Research; 2024 [23 Mar 2026]. Available from: https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/cut-flowers-market/asia-pacific
3. Morel P. Growth control of Hydrangea macrophylla through water restriction. Acta Hortic. 2001; 548: 51-58. doi:10.17660/ActaHortic.2001.548.3
4. 6Wresearch. Thailand floriculture market (2025–2029): Industry analysis, size, share, growth, trends and forecast [Internet]. New Delhi: 6Wresearch; 2022 [23 Mar 2026]. Available from: https://www.6wresearch.com/industry-report/thailand-floriculture-market
5. Sutrisno, Skutnik E, Rabiza-Świder J. Optimising the vase life of cut hydrangeas: A review of the impact of various treatments. Agronomy. 2025; 15(5): 1124. doi:10.3390/agronomy15051124
6. ณัฐฐา โพธาภรณ์, ยงยุทธ คำแปง, ประสานศาสน์ มูลแก้ว, ธัญวรัชน์ ยาธิ, นิพนธ์ กิติดี. ปัจจัยที่มีผลต่อการออกดอกของไฮเดรนเยีย: รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปี 2561 โครงการวิจัยที่ 3040-A073. เชียงใหม่: มูลนิธิโครงการหลวง; 2562.
7. Taiz L, Zeiger E, Møller IM, Murphy A. Plant physiology and development. 6th ed. Sunderland (MA): Sinauer Associates; 2015.
8. Schmilewski G. The role of peat in assuring the quality of growing media. Mires Peat. 2008; 3:02. https://doi.org/10.19189/001c.128252
9. Chaiyo Farm. พีทมอสและวัสดุปลูกสำหรับเพาะเมล็ดและต้นกล้า [อินเตอร์เน็ต]. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 23 มีนาคม 2569]. เข้าถึงได้จาก: https://www.chaiyofarm.co.th/product/category/4/peat-moss-growing-media
10. ThaiGrowth. พีทมอส (peat moss) วัสดุปลูก [อินเตอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 23 มีนาคม 2569]. เข้าถึงได้จาก: https://www.thaigrowth.com
11. Raviv M, Lieth JH, Bar-Tal A. Significance of soilless culture in agriculture. In: Raviv M, Lieth JH, editors. Soilless culture: theory and practice. Amsterdam: Elsevier; 2008. p. 3-14. https://scholar.google.com/scholar?hl=th&as_sdt=0%2C5&q=Significance+of+soilless+culture+in+agriculture.&btnG=
12. Mariyappillai A, Arumugam G. Physico-chemical and hydrological properties of soilless substrates. J Environ Biol. 2021; 42(3): 700-704. http://doi.org/10.22438/jeb/42/3/MRN-1504
13. Koyama S, Hayashi H. Rice yield and soil carbon dynamics over three years of applying rice husk charcoal to an Andosol paddy field. Plant Prod Sci. 2017; 20(2): 176-182. doi:10.3390/agronomy15051124.10.1080/1343943X.2017.1290506
14. Evans MR. Efficacy of ground fresh rice hulls as a substrate component for greenhouse crops production using overhead and ebb-and-flood irrigation systems. Acta Hortic. 2014; 1034: 241-247. doi:10.17660/ActaHortic.2014.1034.29

15. Liu S, Liu M, Chen S, Ni X, Zhang K, Yue L, Zhou Y. Rice husks and leaf mold used as peat substitutes to improve the morphological, photosynthetic, and biochemical properties of chrysanthemum (Chrysanthemum × morifolium). Sustainability. 2023; 15(23): 16137. doi:10.3390/su152316137
16. Abad M, Noguera P, Puchades R, Maquieira A, Noguera V. Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerised ornamental plants. Bioresour Technol. 2002; 82(3): 241-245. doi:10.1016/S0960-8524(01)00189-4
17. Li Z, Zheng Z, Li H, Xu D, Li X; Xiang L, Tu S. Review on rice husk biochar as an adsorbent for soil and water remediation. Plants. 2023; 12(7): 1524. doi:10.3390/plants12071524
18. Burnett SE, Mattson NS, Williams KA. Substrates and fertilizers for organic container production of herbs, vegetables, and herbaceous ornamental plants grown in greenhouses in the United States. Sci Hortic. 2016; 208: 111-119. doi:10.1016/j.scienta.2016.01.001
19. Teppala P. Effect of media and nutrients on the growth and flowering of hydrangea (Hydrangea macrophylla Thunb. Ser.) [thesis]. Orissa: Orissa University of Agriculture and Technology; 2018. Available from: https://krishikosh.egranth.ac.in/items/da6580fb-9c9e-4674-b609-e63221954271
20. กรมพัฒนาที่ดิน. คู่มือการปฏิบัติงาน กระบวนการวิเคราะห์พืช ปุ๋ย และสิ่งปรับปรุงดิน [อินเตอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน; 2553 [เข้าถึงเมื่อ 23 มีนาคม 2569]. เข้าถึงได้จาก: https://www.ldd.go.th/PMQA/2553/Manual/OSD-07.pdf
21. Widiasri E; Maulani RR; Nofitasari D; Lambangsari K; Manurung R; Abduh MY. Enrichment of growing media using biochar, compost, and nanosilica for the cultivation of Oryza sativa L. Agron Res. 2022; 20(S1): 1175-1186. doi:10.15159/ar.22.061
22. Huang L, Gu M. Effects of biochar on container substrate properties and growth of plants—A review. Horticulturae. 2019; 5(1): 14. doi:10.3390/horticulturae5010014
23. Dorji P, Gurung T, Tshomo U. Effect of different organic potting media on the growth, yield and quality of strawberry (Fragaria × ananassa) under greenhouse condition. NU Sci J. 2023; 31(3): 1-12. Doi:10.14456/nujst.2023.21
24. Gruda N. Current and future perspective of growing media in Europe. Acta Hortic. 2012; 960: 37-43. doi:10.17660/ActaHortic.2012.960.3

บทความวิจัย (Research Article)

อิทธิพลของสายพันธุ์และพื้นที่ปลูกต่อผลผลิตและสมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลัง

Effects of cultivar and growing area on yield and selected starch properties of cassava

สิทธิชัย ไชยลังกา[1*] และ เอกรินทร์ สารีพัว[2]
Sittichai Chailangka[1*]and Eakrin Sareepua[2]
[1]หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
[1]Master of Science Program in Agricultural Technology, Faculty of Agricultural Technology, Kalasin University
[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
[2]Department of Plant Production Technology, Faculty of Agricultural Technology, Kalasin University
*Corresponding author; email: bassjesstar@gmail.com

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
12 มีนาคม 2569	27 พฤษภาคม 2569	27 พฤษภาคม 2569

บทคัดย่อ

การศึกษาอิทธิพลของสายพันธุ์และพื้นที่ปลูกต่อคุณสมบัติแป้งมันสำปะหลัง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสายพันธุ์ พื้นที่ปลูก และปฏิสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัยต่อผลผลิตและคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้มันสำปะหลัง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ห้วยบง 60 พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 พันธุ์ระยอง 3 และพันธุ์พิรุณ 1 ปลูกในพื้นที่ 4 จังหวัด ได้แก่ ยโสธร กาฬสินธุ์ มุกดาหาร และสกลนคร ดำเนินการทดลองระหว่างวันที่ 15 มกราคม–25 ธันวาคม พ.ศ. 2567 วางแผนการทดลองแบบ Factorial in Randomized Complete Block Design (RCBD) 4×4 จำนวน 3 ซ้ำ และวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล สายพันธุ์และพื้นที่ปลูกมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อผลผลิตและคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังหลายลักษณะ โดยพันธุ์ห้วยบง 60 ให้จำนวนหัวต่อต้นสูงที่สุด (16.33 หัวต่อต้น) มีเปอร์เซ็นต์แป้งเฉลี่ยสูงที่สุด (26.5 %) และให้ผลผลิตแป้งต่อไร่สูงที่สุด (1,955.6 กิโลกรัมต่อไร่) ขณะที่พันธุ์พิรุณ 1 ให้ผลผลิตและเปอร์เซ็นต์แป้งต่ำที่สุด ส่วนผลของพื้นที่ปลูก พบว่า จังหวัดยโสธรให้ผลผลิตหัวมันสดเฉลี่ยสูงที่สุด (7,100 กิโลกรัมต่อไร่) ในขณะที่จังหวัดสกลนครให้เปอร์เซ็นต์แป้งสูงที่สุด (25.0 %) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสายพันธุ์และพื้นที่ปลูกมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลผลิตและคุณภาพแป้ง โดยพันธุ์ห้วยบง 60 ที่ปลูกในจังหวัดสกลนครให้จำนวนหัวและเปอร์เซ็นต์แป้งสูงที่สุด (17 หัวต่อต้น และ 27.5 % ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่าสายพันธุ์มันสำปะหลังตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมแตกต่างกันตามพื้นที่ปลูก สรุปได้ว่า การเลือกสายพันธุ์ให้เหมาะสมกับพื้นที่ปลูกเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มผลผลิตและคุณภาพแป้งมันสำปะหลัง โดยพันธุ์ห้วยบง 60 มีศักยภาพสูง เหมาะสำหรับการผลิตเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรมแปรรูปแป้งมันสำปะหลังในประเทศไทย

คำสำคัญ: มันสำปะหลัง, สายพันธุ์, พื้นที่ปลูก, คุณสมบัติแป้ง, ผลผลิต

Abstract

This study aimed to investigate the effects of cassava varieties, planting locations, and their interactions on cassava yield and starch properties. Four cassava varieties, namely Huay Bong 60, Kasetsart 50, Rayong 3, and Piroon 1, were cultivated in four provinces of Thailand: Yasothon, Kalasin, Mukdahan, and Sakon Nakhon. The experiment was conducted from January 15 to December 25, 2024, using a 4 × 4 Factorial Randomized Complete Block Design (RCBD) with three replications. Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA). The results revealed that cassava varieties and planting locations had significant effects on several yield and starch quality characteristics. Huay Bong 60 produced the highest number of roots per plant (16.33 roots/plant), the highest average starch content (26.5%), and the highest starch yield (1,955.6 kg/rai), whereas Piroon 1 showed the lowest yield and starch content. Regarding planting locations, Yasothon province produced the highest fresh root yield (7,100 kg/rai), while Sakon Nakhon province showed the highest starch content (25.0%). In addition, the interaction between cassava varieties and planting locations significantly affected yield and starch quality. Huay Bong 60 grown in Sakon Nakhon produced the highest number of roots and starch content (17 roots/plant and 27.5%, respectively). These findings indicate that cassava varieties respond differently to environmental conditions in different planting areas. In conclusion, selecting appropriate cassava varieties for suitable planting locations is an important factor in improving cassava yield and starch quality. Huay Bong 60 demonstrated the greatest potential for commercial production and starch-processing industries in Thailand.

Keywords: Cassava, Variety, Planting location, Starch properties, Yield

บทนำ

มันสำปะหลัง (*Manihot esculenta Crantz*) เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญในระดับโลก โดยเฉพาะในประเทศเขตร้อนที่มีทรัพยากรดินจำกัด เนื่องจากมีความสามารถในการเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมที่เป็นดินเสื่อมโทรม ให้ผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่ค่อนข้างสูง และมีต้นทุนการผลิตต่ำ [1] สำหรับประเทศไทย มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่มีบทบาทสำคัญทั้งในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมแปรรูป โดยเฉพาะอุตสาหกรรมแป้งซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตเอทานอล พลาสติกชีวภาพ และแป้งดัดแปร ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพอย่างยั่งยืนทั้งในระดับประเทศและระดับนานาชาติ [2] คุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ ความหนืด อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน ความคงตัวของเพสต์ ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความขาว และความโปร่งแสงของเจล เป็นปัจจัยกำหนดความเหมาะสมของแป้งสำหรับการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท คุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบโครงสร้างของแป้ง โดยเฉพาะสัดส่วนและโครงสร้างโมเลกุลของแป้ง ซึ่งได้รับอิทธิพลโดยตรงจากทั้งพันธุกรรมของสายพันธุ์และสภาพแวดล้อมในการปลูก [3]

อย่างไรก็ตาม เกษตรกรในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยส่วนใหญ่ประสบปัญหาผลผลิตและคุณภาพแป้งมันสำปะหลังลดลงอย่างต่อเนื่อง อันเป็นผลมาจากการปลูกซ้ำในพื้นที่ดินทรายหรือดินร่วนปนทรายที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำและขาดการปรับปรุงบำรุงดินอย่างเหมาะสม สภาพดินเสื่อมโทรมที่มีค่าความเป็นกรดสูง ปริมาณอินทรียวัตถุต่ำ และการขาดแคลนธาตุอาหารหลัก ทำให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงและการลำเลียงคาร์โบไฮเดรตไปสะสมในหัวลดลง ส่งผลให้ปริมาณแป้งและคุณสมบัติของแป้งที่ได้เสื่อมลง ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการแปรรูปในอุตสาหกรรมชีวภาพ [4] ทั้งนี้ คุณภาพแป้งและผลผลิตของมันสำปะหลังไม่ได้ถูกกำหนดโดยพันธุกรรมของสายพันธุ์เพียงปัจจัยเดียว แต่เกิดจากอิทธิพลร่วมระหว่างสาย

พันธุ์และสภาพแวดล้อมของพื้นที่ปลูก (genotype × environment interaction: G×E) ซึ่งสายพันธุ์เดียวกันอาจแสดงศักยภาพและคุณสมบัติแป้งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปลูกในสภาพดินและภูมิอากาศที่ต่างกัน [5] และ [6] การทำความเข้าใจปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวางแผนการผลิตมันสำปะหลังเชิงพาณิชย์ที่มีประสิทธิภาพ แม้จะมีการศึกษาคุณสมบัติแป้งมันสำปะหลังในสายพันธุ์ต่างๆ มาบ้างแล้ว [7] และ [3] แต่ยังขาดข้อมูลเชิงระบบเกี่ยวกับผลร่วมของสายพันธุ์และพื้นที่ปลูกในภูมิภาคภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย ซึ่งมีความหลากหลายของสภาพดินและภูมิอากาศเฉพาะพื้นที่สูง การขาดข้อมูลดังกล่าวทำให้เกษตรกรและผู้ประกอบการอุตสาหกรรมไม่สามารถตัดสินใจเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสมกับพื้นที่ปลูกได้อย่างเหมาะสม

ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินอิทธิพลของสายพันธุ์ พื้นที่ปลูก และปฏิสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัย (G×E interaction) ต่อผลผลิตและคุณสมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลัง 4 สายพันธุ์ที่ปลูกใน 4 จังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ผลที่ได้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสมกับพื้นที่ปลูกเฉพาะ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของสายพันธุ์ทั้ง 4 สายพันธุ์ต่อคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง
2. เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของพื้นที่ปลูกทั้ง 4 พื้นที่ต่อคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง
3. เพื่อทราบถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างสายพันธุ์และพื้นที่ปลูกที่มีต่อคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การวางแผนการทดลอง

การศึกษาในครั้งนี้ ทำทดลองโดยจะทำการเพราะปลูก 1 ไร่ต่อสายพันธุ์ ตัดท่อนพันธุ์ยาว 25 เซนติเมตร ระยะการปลูกอยู่ที่ 90 เซนติเมตร ปักลึกประมาณ 8 เซนติเมตร ที่มาของต้นพันธุ์ทั้ง 4 สายพันธุ์ได้มาจากกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกมันสำปะหลังในพื้นที่ ตำบลโคกเครือ อำเภอหนองกุงศรี จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยจะทำการศึกษาแบบ 4x4 Analysis of variance Factorial Randomized Complete Block Design (RCBD) จำนวน 3 ซ้ำ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องมี 2 ปัจจัย ได้แก่

ปัจจัยที่ 1 พันธุ์ของมันสำปะหลัง จำนวน 4 สายพันธุ์

1) พันธุ์ห้วยบง 60
2) พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50
3) พันธุ์ระยอง 3
4) พันธุ์พิรุณ 1

ปัจจัยที่ 2 พื้นที่ปลูก จำนวน 4 พื้นที่

1) พื้นที่ ตำบลสามแยก อำเภอเลิงนกทา จังหวัดยโสธร
2) พื้นที่ ตำบลโคกเครือ อำเภอหนองกุงศรี จังหวัดกาฬสินธุ์
3) พื้นที่ ตำบลกกตูม อำเภอดงหลวง จังหวัดมุกดาหาร
4) พื้นที่ ตำบลเต่างอย อำเภอเต่างอย จังหวัดสกลนคร

2. ขั้นตอนการทดลอง

1) การเลือกท่อนพันธุ์ จะดูที่ความสมบูรณ์โดยสังเกตจากท่อนพันธุ์ที่ปลายแห้งและมีตาถี่ เพราะจะมีโอกาสงอกสูง โดยคัดเลือกท่อนพันธุ์ที่สะอาดปราศจากเพลี้ยแป้ง และถ้าหากไม่แน่ใจว่าปราศจากแมลงศัตรูพืช ให้ทำการแช่ท่อนพันธุ์ เพื่อไม่ให้เกินโรคใบด่างมันสำปะหลัง โดยหลังจากที่ยกร่องแล้วจะลงปลูกทันที

2) การเตรียมดิน โดยการไถดัดเพื่อกลบเศษซากวัชพืชและตากดินประมาณ 2 สัปดาห์เพื่อให้เศษซากพืชแห้งตาย หลังจากนั้นไถแปรเพื่อพรวนดินให้ร่วนซุย และไถยก ร่องปลูกเมื่อดินมีความชื้นเพียงพอ

3) การปลูกมันสำปะหลัง โดยจะใช้ต้นพันธุ์ที่มีอายุ 9 เดือน ใช้ท่อนพันธุ์ความยาวประมาณ 25 เซนติเมตร ระยะปลูก 90 เซนติเมตร ปักท่อนพันธุ์ลึก 10 เซนติเมตร เพราะทำให้ต้นมันสำปะหลังโตง่าย และลงหัวได้ดี ปักลึกไม่เกิน 10 เซนติเมตร จะช่วยให้มีอัตราการงอกที่ดี หากปักท่อนพันธุ์ลึกลงไปมากกว่านี้ จะทำให้รากของต้นไปเจอดินที่แน่นเกินไป ส่งผลให้หัวมันสำปะหลังเล็ก

4) การดูแลหลังการปลูก หลังปลูกนาน 3 เดือน กำจัดวัชพืชด้วยวิธีใช้จอบถากหญ้าที่ขึ้นตามสันร่อง เพื่อกำจัดวัชพืชที่จะมาแย่งอาหารต้นมัน และใส่ปุ๋ยสูตร 7.5–7.5–7.5 อัตรา 30 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อมันสำปะหลังมีอายุ 5 เดือน ใส่โพแทสเซียมในอัตรา 12 กิโลกรัม โดยใช้ปุ๋ยสูตร 0-0-60 อัตรา 20 กิโลกรัมต่อไร่ ใส่ทั้ง 2 ข้างลำต้น โดยช่วยให้มันหัวใหญ่และเพิ่มเปอร์เซ็นต์แป้งสูง จากนั้นรอจนมันสำปะหลังได้อายุ 12 เดือน จึงทำการเก็บเกี่ยว

5) การเก็บเกี่ยว ตัดลำต้น ใช้มีดหรือเคียวตัดลำต้นเหนือพื้นดินประมาณ 20–30 เซนติเมตร ลำต้นส่วนบนสามารถเก็บไว้เป็นท่อนพันธุ์สำหรับปลูกครั้งต่อไป ยกหัวมันสำปะหลัง ใช้จอบหรือเสียมขุดรอบ ๆ โคนต้นอย่างระมัดระวัง ไม่ให้หัวขาด หากมีรถไถติดอุปกรณ์ยกหัว (Cassava Uprooter) จะช่วยประหยัดแรงงานและเวลา จับโคนต้นดึงหัวขึ้นพร้อมกันเพื่อลดการหักหรือช้ำ ทำความสะอาดหัวมัน เขย่าหรือเคาะดินออกเบื้องต้น หลีกเลี่ยงการกระแทกแรง เพราะหัวที่ช้ำจะเน่าเสียง่าย เลือกหัวที่สมบูรณ์ ขนาดสม่ำเสมอ ไม่มีรอยช้ำหรือเน่า บรรจุ: ใส่กระสอบหรือเข่งโปร่ง เพื่อให้อากาศถ่ายเทได้ดี การขนส่ง: ควรรีบส่งเข้าโรงงานหรือแปรรูปภายใน 24–48 ชั่วโมงหลังเก็บเกี่ยว เพื่อป้องกันการเสื่อมคุณภาพของแป้งในหัว

3. วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

การทำบันทึกผลการทดลองและวิเคราะห์ ความแตกต่างของ 2 ปัจจัย คือ 1) พันธุ์ของมันสำปะหลังจำนวน 4 สายพันธุ์ 2) ดินในพื้นที่ปลูกจำนวน 4 พื้นที่ จึงทำการเก็บข้อมูลผลผลิต โดยทำการบันทึก ดังนี้

ข้อมูลลักษณะผลผลิต ได้แก่

1) ปริมาณหัวต่อต้น (หัว)

2) เปอร์เซ็นต์แป้งในหัวสด (% starch content)

3) จำนวนน้ำหนักต่อไร่ (กิโลกรัมต่อไร่)

4) ปริมาณผลผลิตแป้งที่ได้ (กิโลกรัม)

ข้อมูลคุณสมบัติของแป้ง ได้แก่

1) ปริมาณความชื้น (Moisture) (%) (AOAC)

2) ความขาว (Whiteness) (%) (Whiteness Tester)

3) ค่าความหนืดสูงสุด (Viscosity) (BU) (Brabender Viscograph-E)

4) ไซยาไนด์ (ppm)

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากเก็บข้อมูลลักษณะที่ศึกษาแล้ว นำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้โปรแกรม SPSS เพื่อประเมินผลของสายพันธุ์มันสำปะหลัง พื้นที่ปลูก และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสายพันธุ์กับพื้นที่ปลูก ที่มีต่อผลผลิต ปริมาณแป้ง และคุณสมบัติแป้งเชิงอุตสาหกรรม ในการวิเคราะห์ กำหนดให้สายพันธุ์มันสำปะหลังเป็นปัจจัยหลัก และพื้นที่ปลูกเป็นปัจจัยรอง โดยใช้การวิเคราะห์แบบสองปัจจัย Factorial in RCBD เพื่อทดสอบทั้งผลหลัก และผลปฏิสัมพันธ์ หากพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จะนำค่าเฉลี่ยมาเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี Duncan’s Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการวิจัย

1. ข้อมูลลักษณะผลผลิต

จากผลการศึกษาปริมาณผลผลิตและปริมาณแป้งของมันสำปะหลังที่ปลูกในพื้นที่ที่แตกต่างกัน 4 จังหวัด จากผลการศึกษา พบว่า พื้นที่ปลูกมีผลต่อปริมาณหัวต่อต้น ปริมาณผลผลิตหัวมันสด และปริมาณแป้งที่ผลิตได้ของมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ขณะที่ปริมาณแป้ง (%) ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยจังหวัดยโสธร (A1) ให้จำนวนหัวต่อต้นสูงที่สุด เท่ากับ 15.50 หัวต่อต้น และให้ผลผลิตหัวมันสดสูงที่สุด เท่ากับ 7,100 กิโลกรัมต่อไร่ แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ดังกล่าวมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการสร้างหัวของมันสำปะหลัง อาจเนื่องมาจากความอุดมสมบูรณ์ของดิน สภาพภูมิอากาศ และการจัดการแปลงปลูกที่เหมาะสม ในขณะที่จังหวัดสกลนคร (A4) ให้จำนวนหัวต่อต้นต่ำกว่า คือ 14.16 หัวต่อต้น และผลผลิตหัวมันสดต่ำกว่า คือ 4,400 กิโลกรัมต่อไร่ แต่กลับมีเปอร์เซ็นต์แป้งสูงที่สุด เท่ากับ 25.00 เปอร์เซ็นต์ และให้ปริมาณแป้งรวมสูงที่สุด เท่ากับ 1,515.7 กิโลกรัม สะท้อนให้เห็นว่าพื้นที่ปลูกมีผลต่อทั้งการสร้างผลผลิตและการสะสมแป้งในหัวมันสำปะหลังแตกต่างกัน สายพันธุ์มันสำปะหลังมีบทบาทสำคัญต่อการกำหนดศักยภาพการให้ผลผลิตและคุณภาพแป้ง เนื่องจากแต่ละพันธุ์มีลักษณะทางพันธุกรรมแตกต่างกัน ทั้งในด้านการสร้างหัว การสะสมแป้ง และความสามารถในการปรับตัวต่อสภาพแวดล้อม บางสายพันธุ์มีศักยภาพในการให้ผลผลิตหัวสดสูง ขณะที่บางสายพันธุ์มีเปอร์เซ็นต์แป้งสูงและเหมาะสมต่อการใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูป เช่น อุตสาหกรรมแป้ง เอทานอล และพลาสติกชีวภาพ การเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะเมื่อปลูกในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านดินและสภาพแวดล้อม เพราะสายพันธุ์ที่สามารถปรับตัวได้ดีจะช่วยรักษาระดับผลผลิตและคุณภาพแป้งให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ปลูกและสาย เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อผลผลิตและคุณสมบัติแป้งของมันสำปะหลัง โดยพบว่าสายพันธุ์เดียวกันอาจให้ผลผลิตแตกต่างกันเมื่อปลูกในพื้นที่ต่างกัน หรือในทางกลับกัน พื้นที่เดียวกันอาจทำให้แต่ละสายพันธุ์แสดงศักยภาพได้ไม่เท่ากัน ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การประเมินศักยภาพของมันสำปะหลังไม่สามารถพิจารณาจากสายพันธุ์หรือพื้นที่ปลูกเพียงปัจจัยเดียวได้ แต่ต้องพิจารณาผลร่วมกันของทั้งสองปัจจัย เนื่องจากบางสายพันธุ์อาจเหมาะสมกับพื้นที่หนึ่งแต่ไม่เหมาะกับอีกพื้นที่หนึ่ง

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณผลิตและปริมาณแป้งของมันสำปะหลังที่ปลูกในพื้นที่ที่แตกต่างกัน 4 จังหวัด

พื้นที่ปลูก	ปริมาณหัวต่อต้น (หัว)	ปริมาณแป้ง (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณผลผลิตหัวมันสด (กิโลกรัมต่อไร่)	ปริมาณแป้งที่ผลิตได้ (กิโลกรัม)
จังหวัดยโสธร (A1)	15.50a	24.16	7,100a	1,508.0ab
จังหวัดกาฬสินธุ์ (A2)	15.33ab	24.50	6,800b	1,421.6c
จังหวัดมุกดาหาร (A3)	14.12ab	23.00	5,500c	1,376.9d
จังหวัดสกลนคร (A4)	14.16b	25.00	4,400d	1,515.7a
Mean	14.85	24.16	5,962	1,455.5
F-test	*	ns	*	*
% CV	10.15	14.27	14.55	14.37

หมายเหตุ

ns และ * หมายถึง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และ มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น $P \leq 0.05$

ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรยกกำกับต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น $P \leq 0.05$

พันธุ์มันสำปะหลังที่แตกต่างกันมีผลต่อปริมาณหัวต่อต้น ปริมาณแป้ง ปริมาณผลผลิตหัวมันสด และปริมาณแป้งที่ผลิตได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพันธุ์ห้วยบง 60 (B1) ให้ค่าปริมาณหัวต่อต้นสูงที่สุดเท่ากับ 16.33 หัว ซึ่งแตกต่างจากพันธุ์อื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพันธุ์ห้วยบง 60 เป็นพันธุ์ที่มีศักยภาพในการแตกหัวได้ดี มีการเจริญเติบโตของระบบรากและการสะสมอาหารในหัวได้มาก จึงทำให้มีจำนวนหัวต่อต้นสูงกว่าพันธุ์อื่น ในด้านปริมาณแป้ง พบว่าพันธุ์ห้วยบง 60 (B1) มีเปอร์เซ็นต์แป้งสูงที่สุดเท่ากับ 26.51 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างจากพันธุ์พิรุณ 1 (B4) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่แตกต่างจากพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 (B2) และพันธุ์ระยอง 3 (B3) แสดงให้เห็นว่าลักษณะทางพันธุกรรมของแต่ละพันธุ์มีผลต่อความสามารถในการสะสมแป้งในหัวมันสำปะหลัง สำหรับปริมาณผลผลิตหัวมันสด พบว่า พันธุ์ห้วยบง 60 (B1) ให้ผลผลิตสูงที่สุดเท่ากับ 7,000 กิโลกรัมต่อไร่ รองลงมาคือพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 (B2) เท่ากับ 6,500 กิโลกรัมต่อไร่ ส่วนพันธุ์ระยอง 3 (B3) และพันธุ์พิรุณ 1 (B4) ให้ผลผลิตต่ำกว่า คือ 5,200 และ 5,000 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ ความแตกต่างดังกล่าวอาจเกิดจากศักยภาพของพันธุ์ในการเจริญเติบโต การปรับตัวต่อสภาพแวดล้อม และประสิทธิภาพในการใช้ธาตุอาหาร ในส่วนของปริมาณแป้งที่ผลิตได้ พบว่าพันธุ์ห้วยบง60 (B1) ให้ปริมาณแป้งสูงที่สุดเท่ากับ 1,955.6 กิโลกรัม รองลงมา คือ พันธุ์เกษตรศาสตร์50 (B2) เท่ากับ 1,517.7 กิโลกรัม และพันธุ์ระยอง 3 (B3) เท่ากับ 1,307.9 กิโลกรัม ส่วนพันธุ์พิรุณ 1 (B4) ให้ปริมาณแป้งต่ำที่สุดเท่ากับ 1,041.0 กิโลกรัม โดยความแตกต่างดังกล่าวมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณแป้งที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับทั้งผลผลิตหัวสดและเปอร์เซ็นต์แป้งของแต่ละพันธุ์

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณผลิตและปริมาณแป้งในพันธุ์มันสำปะหลังที่แตกต่างกัน จำนวน 4 สายพันธุ์

พันธุ์มันสำปะหลัง	ปริมาณหัวต่อต้น (หัว)	ปริมาณแป้ง (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณผลผลิตหัวมันสด (กิโลกรัมต่อไร่)	ปริมาณแป้งที่ผลิตได้ (กิโลกรัม)
พันธุ์ห้วยบง 60 (B1)	16.33a	26.51a	7,000a	1,955.6a
พันธุ์เกษตรศาสตร์50 (B2)	14.83b	23.94ab	6,500b	1,517.7b
พันธุ์ระยอง 3 (B3)	14.5b	23.70ab	5,200c	1,307.9c
พันธุ์ พิรุณ 1 (B4)	13.75b	22.49b	5,000c	1,041.0d
Mean	14.85	24.16	5,963	1455.5
F-test	*	*	*	**
% CV	10.15	14.27	14.55	14.37

หมายเหตุ

* และ ** หมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น $P \leq 0.05$ และ $P \leq 0.01$

ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรยกกำกับต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น $P \leq 0.05$

จากผลการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ปลูกและสายพันธุ์มันสำปะหลังต่อปริมาณหัวต่อต้น ปริมาณแป้ง ปริมาณผลผลิตหัวมันสด และปริมาณแป้งที่ผลิตได้ พบว่าการปลูกมันสำปะหลังในพื้นที่ที่แตกต่างกันร่วมกับสายพันธุ์ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่าดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะปริมาณผลผลิตหัวมันสดและปริมาณแป้งที่ผลิตได้ แสดงให้เห็นว่าศักยภาพการให้ผลผลิตของมันสำปะหลังขึ้นอยู่กับความเหมาะสมระหว่างสายพันธุ์และสภาพพื้นที่ปลูก ในด้านปริมาณหัวต่อต้น พบว่าการปลูกพันธุ์ห้วยบง 60 (B1) ในจังหวัดกาฬสินธุ์ (A2) ให้จำนวนหัวต่อต้นสูงที่สุดเท่ากับ 17.33 หัว ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามันสำปะหลังพันธุ์ห้วยบง 60 มีความสามารถในการสร้างหัวได้ดีในหลายสภาพพื้นที่ ขณะที่การปลูกพันธุ์พิรุณ 1 (B4) ในจังหวัด

กาฬสินธุ์ให้จำนวนหัวต่อต้นต่ำที่สุดเท่ากับ 12.67 หัว ซึ่งอาจเกิดจากความสามารถในการปรับตัวของพันธุ์ต่อสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน สำหรับปริมาณแป้ง พบว่า การปลูกพันธุ์ห้วยบง 60 (B1) ในจังหวัดสกลนคร (A4) ให้ค่าเปอร์เซ็นต์แป้งสูงที่สุดเท่ากับ 27.53 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าปัจจัยด้านพันธุกรรมของสายพันธุ์ร่วมกับสภาพแวดล้อมของพื้นที่มีผลต่อการสะสมแป้งในหัวมันสำปะหลัง ในด้านปริมาณผลผลิตหัวมันสด พบว่า การปลูกพันธุ์ห้วยบง 60 (B1) ในจังหวัดกาฬสินธุ์ (A2) ให้ผลผลิตสูงที่สุดเท่ากับ 7,600 กิโลกรัมต่อไร่ รองลงมา คือ การปลูกพันธุ์ห้วยบง 60 (B1) ในจังหวัดสกลนคร (A4) และจังหวัดมุกดาหาร (A3) ซึ่งให้ผลผลิตเท่ากับ 7,500 และ 7,300 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ ขณะที่การปลูกพันธุ์พิรุณ 1 (B4) ในจังหวัดสกลนคร (A4) ให้ผลผลิตต่ำที่สุดเท่ากับ 4,400 กิโลกรัมต่อไร่ ความแตกต่างดังกล่าวอาจเกิดจากความเหมาะสมของพันธุ์ต่อสภาพดิน สภาพภูมิอากาศ และการจัดการในแต่ละพื้นที่ สำหรับปริมาณแป้งที่ผลิตได้ พบว่า การปลูกพันธุ์ห้วยบง 60 (B1) ในจังหวัดสกลนคร (A4) ให้ปริมาณแป้งสูงที่สุดเท่ากับ 2,065.0 กิโลกรัม ขณะที่การปลูกพันธุ์พิรุณ 1 (B4) ในจังหวัดสกลนคร (A4) ให้ปริมาณแป้งต่ำที่สุดเท่ากับ 990.0 กิโลกรัม ทั้งนี้ปริมาณแป้งที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับทั้งผลผลิตหัวมันสดและเปอร์เซ็นต์แป้งของมันสำปะหลังในแต่ละสภาพพื้นที่

ตารางที่ 3 แสดงผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ปลูกและสายพันธุ์มันสำปะหลังต่อปริมาณหัว ปริมาณแป้ง และผลผลิตมันสำปะหลัง

พื้นที่ปลูก (ปัจจัยที่ A)	สายพันธ์มันสำปะหลัง (ปัจจัยที่ B)	ปริมาณหัวต่อต้น (หัว)	ปริมาณแป้ง (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณผลผลิตหัวมันสด (กิโลกรัมต่อไร่)	ปริมาณแป้งที่ผลิตได้ (กิโลกรัม)
จังหวัดยโสธร (A1)	พันธุ์ห้วยบง 60 (B1)	16.67ab	25.97ab	7,100b	1,843.6bc
จังหวัดยโสธร (A1)	พันธุ์เกษตรศาสตร์50 (B2)	15.00de	25.10ab	6,800c	1,706.8d
จังหวัดยโสธร (A1)	พันธุ์ระยอง 3 (B3)	15.33cd	22.57c	5,900d	1,331.4g
จังหวัดยโสธร (A1)	พันธุ์ พิรุณ 1 (B4)	15.00de	23.00c	5,000e	1,150.0gh
จังหวัดกาฬสินธุ์ (A2)	พันธุ์ห้วยบง 60 (B1)	17.33a	26.27ab	7,600a	1,996.3ab
จังหวัดกาฬสินธุ์ (A2)	พันธุ์เกษตรศาสตร์50 (B2)	15.00de	25.97ab	5,900d	1,532.0de
จังหวัดกาฬสินธุ์ (A2)	พันธุ์ระยอง 3 (B3)	16.33c	24.30ab	4,900e	1,190.7gh
จังหวัดกาฬสินธุ์ (A2)	พันธุ์ พิรุณ 1 (B4)	12.667ef	21.50c	4,500ef	967.5h
จังหวัดมุกดาหาร (A3)	พันธุ์ห้วยบง 60 (B1)	14.33de	26.27ab	7,300b	1,917.5ab
จังหวัดมุกดาหาร (A3)	พันธุ์เกษตรศาสตร์50 (B2)	15.00de	18.37c	6,100c	1,120.4gh
จังหวัดมุกดาหาร (A3)	พันธุ์ระยอง 3 (B3)	15.00de	24.37ab	5,800d	1,413.3ef
จังหวัดมุกดาหาร (A3)	พันธุ์ พิรุณ 1 (B4)	13.33ef	22.97c	4,600e	1,056.5h
จังหวัดสกลนคร (A4)	พันธุ์ห้วยบง 60 (B1)	17.00a	27.53a	7,500a	2,065.0a
จังหวัดสกลนคร (A4)	พันธุ์เกษตรศาสตร์50 (B2)	14.33df	26.33ab	6,500c	1,711.7d
จังหวัดสกลนคร (A4)	พันธุ์ระยอ ง3 (B3)	11.33f	23.57c	5,500d	1,296.2gh
จังหวัดสกลนคร (A4)	พันธุ์ พิรุณ 1 (B4)	14.00df	22.50c	4,400f	990.0h
Mean		14.85	24.16	5,963	1,455.5
F-test		*	*	**	**
% CV		10.15	14.27	14.55	14.37

หมายเหตุ

* และ ** หมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น $P \leq 0.05$ และ $P \leq 0.01$

ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรยกกำกับต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น $P \leq 0.05$

2. ข้อมูลคุณสมบัติของแป้ง

จากการศึกษาคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังที่ปลูกในพื้นที่แตกต่างกัน 4 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดยโสธร จังหวัดกาฬสินธุ์ จังหวัดมุกดาหาร และจังหวัดสกลนคร พบว่าคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังในด้านปริมาณความชื้น ของแป้งมันสำปะหลังจากทั้ง 4 พื้นที่มีค่าอยู่ระหว่าง 11.70–12.78% โดยจังหวัดยโสธรมีค่าความชื้นสูงที่สุด (12.78%) ขณะที่จังหวัดสกลนครมีค่าต่ำที่สุด (11.70%) อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบทางสถิติ พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ns) แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ปลูกที่แตกต่างกันไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณความชื้นของแป้งมันสำปะหลังอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระบวนการแปรรูปและการอบแห้งแป้งมีมาตรฐานใกล้เคียงกัน ทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ ค่าความขาวของแป้งมันสำปะหลังมีค่าอยู่ในช่วง 94.69–95.44% โดยจังหวัดยโสธรมีค่าความขาวสูงที่สุด (95.44%) และจังหวัดสกลนครมีค่าต่ำที่สุด (94.69%) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ns) แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ปลูกไม่มีผลต่อคุณลักษณะด้านความขาวของแป้งอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งความขาวของแป้งมักขึ้นอยู่กับพันธุ์มันสำปะหลัง กระบวนการสกัดแป้ง และการปนเปื้อนของเส้นใยหรือสิ่งเจือปนในระหว่างการผลิตมากกว่าปัจจัยด้านพื้นที่ปลูก ค่า pH ของแป้งมันสำปะหลังจากทั้ง 4 จังหวัดมีค่าอยู่ระหว่าง 5.61–5.72 โดยจังหวัดสกลนครมีค่า pH สูงที่สุด (5.72) และจังหวัดกาฬสินธุ์มีค่าต่ำที่สุด (5.61) อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบทางสถิติ พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ns) แสดงให้เห็นว่าสภาพพื้นที่ปลูกไม่มีผลต่อความเป็นกรด–ด่างของแป้งมันสำปะหลังอย่างเด่นชัด ทั้งนี้ค่า pH ของแป้งส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและการหมักตามธรรมชาติระหว่างการสกัดแป้ง ค่าการนำไฟฟ้าของแป้งมันสำปะหลังมีค่าอยู่ระหว่าง 46.89–55.27 โดยจังหวัดกาฬสินธุ์มีค่าสูงที่สุด (55.27) ซึ่งแตกต่างจากพื้นที่อื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ในขณะที่จังหวัดยโสธร มุกดาหาร และสกลนครมีค่าใกล้เคียงกัน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ปลูกมีผลต่อปริมาณแร่ธาตุหรือสารละลายไอออนที่ตกค้างในแป้ง ซึ่งอาจสัมพันธ์กับความอุดมสมบูรณ์ของดิน องค์ประกอบของธาตุอาหารในดิน หรือสภาพแวดล้อมของพื้นที่เพาะปลูก ค่าความหนืดของแป้งมันสำปะหลังมีค่าอยู่ระหว่าง 865.83–887.67 BU โดยจังหวัดมุกดาหารมีค่าสูงที่สุด (887.67 BU) และจังหวัดกาฬสินธุ์มีค่าต่ำที่สุด (865.83 BU) ผลการทดสอบทางสถิติ พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสภาพพื้นที่ปลูกอาจมีผลต่อโครงสร้างเม็ดแป้งหรือองค์ประกอบของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินในแป้ง ส่งผลต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้ง ปริมาณไซยาไนด์ในแป้งมันสำปะหลังมีค่าอยู่ในช่วง 0.540–0.598 ppm โดยจังหวัดยโสธร กาฬสินธุ์ และมุกดาหารมีค่าเท่ากัน (0.598 ppm) ขณะที่จังหวัดสกลนครมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย (0.540 ppm) แต่ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ns) แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ปลูกไม่ได้มีผลต่อปริมาณไซยาไนด์ในแป้งอย่างชัดเจน และค่าที่พบอยู่ในระดับต่ำซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการบริโภค

ตารางที่ 4 แสดงผลของคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังที่ปลูกในพื้นที่ที่แตกต่างกัน 4 จังหวัด

พื้นที่ปลูก	ปริมาณความชื้น (%)	ความขาว (%)	pH	ค่าการนำไฟฟ้า (EC)	ค่าความหนืด (BU)	ไซยาไนด์ (ppm)
จังหวัดยโสธร (A1)	12.78	95.44	5.71	47.35b	871.83ab	0.598
จังหวัดกาฬสินธุ์ (A2)	12.66	95.43	5.61	55.27a	865.83b	0.598
จังหวัดมุกดาหาร (A3)	12.59	95.02	5.65	47.05b	887.67a	0.598
จังหวัดสกลนคร (A4)	11.70	94.69	5.72	46.89b	872.25ab	0.540
Mean	12.42	95.15	5.67	49.14	874.40	0.60
F-test	ns	ns	ns	*	*	ns
% CV	13.55	0.80	4.39	10.52	2.51	31.82

หมายเหตุ

ns และ * หมายถึง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และ มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น $P \leq 0.05$

ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรยกกำกับต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น $P \leq 0.05$

ปริมาณความชื้นของแป้งมันสำปะหลังทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่าอยู่ในช่วง 11.67–12.76% โดยพันธุ์ห้วยบง 60 มีค่าความชื้นสูงที่สุด (12.76 %) รองลงมา คือ พันธุ์พิรุณ 1 (12.70 %) และพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 (12.55 %) ส่วนพันธุ์ระยอง 3 มีค่าต่ำที่สุด (11.67 %) อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ns) แสดงให้เห็นว่าสายพันธุ์ของมันสำปะหลังไม่มีผลต่อปริมาณความชื้นของแป้งอย่างเด่นชัด ทั้งนี้อาจเนื่องจากกระบวนการผลิตและการอบแห้งแป้งมีการควบคุมในระดับใกล้เคียงกัน ค่าความขาวของแป้งมันสำปะหลังมีค่าอยู่ระหว่าง 94.69–95.84% โดยพันธุ์ห้วยบง 60 มีค่าความขาวสูงที่สุด (95.84%) รองลงมา คือ พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 (95.10%) และพันธุ์ระยอง 3 (94.95%) ขณะที่พันธุ์พิรุณ 1 มีค่าความขาวต่ำที่สุด (94.69%) อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบทางสถิติ พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ns) แสดงให้เห็นว่าสายพันธุ์ไม่มีผลต่อค่าความขาวของแป้งมันสำปะหลังอย่างชัดเจน ค่า pH ของแป้งมันสำปะหลังจากทั้ง 4 สายพันธุ์มีค่าอยู่ในช่วง 5.56–5.90 โดยพันธุ์ห้วยบง 60 มีค่า pH สูงที่สุด (5.90) และพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 มีค่าต่ำที่สุด (5.56) อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ns) แสดงให้เห็นว่าสายพันธุ์ของมันสำปะหลังไม่มีผลต่อความเป็นกรด–ด่างของแป้งอย่างชัดเจน ค่าการนำไฟฟ้าของแป้งมันสำปะหลังมีค่าอยู่ระหว่าง 47.71–51.25 โดยพันธุ์พิรุณ 1 มีค่าสูงที่สุด (51.25) รองลงมา คือ พันธุ์ห้วยบง 60 (49.09) ขณะที่พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 และพันธุ์ระยอง 3 มีค่าต่ำกว่าและไม่แตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่าสายพันธุ์ของมันสำปะหลังมีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของแป้ง ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับปริมาณแร่ธาตุหรือองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันในแต่ละสายพันธุ์ ค่าความหนืดของแป้งมันสำปะหลังมีค่าอยู่ระหว่าง 858.67–899.17 BU โดยพันธุ์ห้วยบง 60 มีค่าความหนืดสูงที่สุด (899.17 BU) ซึ่งแตกต่างจากสายพันธุ์อื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ขณะที่พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 พันธุ์ระยอง 3 และพันธุ์พิรุณ 1 มีค่าความหนืดใกล้เคียงกัน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสายพันธุ์มีผลต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้ง ซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างของโครงสร้างเม็ดแป้งหรือสัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินในแต่ละสายพันธุ์ ปริมาณไซยาไนด์ของแป้งมันสำปะหลังมีค่าอยู่ในช่วง 0.500–0.675 ppm โดยพันธุ์ระยอง 3 มีค่าสูงที่สุด (0.675 ppm) ขณะที่พันธุ์พิรุณ 1 มีค่าต่ำที่สุด (0.500 ppm) อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่าง

มีนัยสำคัญ (ns) แสดงให้เห็นว่าสายพันธุ์ไม่มีผลต่อปริมาณไซยาไนด์ในแป้งมันสำปะหลังอย่างชัดเจน และค่าที่พบยังอยู่ในระดับต่ำที่ปลอดภัยต่อการบริโภค

ตารางที่ 5 แสดงผลของคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังที่แตกต่างกัน จำนวน 4 สายพันธุ์

พันธุ์มันสำปะหลัง	ปริมาณความชื้น (%)	ความขาว (%)	pH	ค่าการนำไฟฟ้า (EC)	ค่าความหนืด (BU)	ไซยาไนด์ (ppm)
พันธุ์ห้วยบง 60 (B1)	12.76	95.84	5.90	49.09a	899.17a	0.608
พันธุ์เกษตรศาสตร์50 (B2)	12.55	95.10	5.56	47.71b	876.83b	0.608
พันธุ์ระยอง 3 (B3)	11.67	94.95	5.66	48.51b	862.92b	0.675
พันธุ์ พิรุณ 1 (B4)	12.70	94.69	5.57	51.25a	858.67b	0.500
Mean	12.42	95.15	5.67	49.14	874.40	0.60
F-test	ns	ns	ns	*	*	ns
% CV	13.55	0.80	4.39	10.52	2.51	31.82

หมายเหตุ

ns และ * หมายถึง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และ มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น $P \leq 0.05$

ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรยกกำกับต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น $P \leq 0.05$

จากการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ปลูกและสายพันธุ์มันสำปะหลังต่อคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ ปริมาณความชื้น ความขาว ค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ค่าความหนืด และปริมาณไซยาไนด์ พบว่า ปริมาณความชื้นของแป้งมันสำปะหลังจากการปลูกในพื้นที่และสายพันธุ์ที่แตกต่างกันมีค่าอยู่ในช่วง 12.37–13.13 % โดยค่าความชื้นสูงที่สุดพบใน จังหวัดมุกดาหาร พันธุ์ห้วยบง 60 (13.13 %) ขณะที่ค่าต่ำที่สุดพบใน จังหวัดกาฬสินธุ์ พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 (12.37 %) อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ปลูกและสายพันธุ์ไม่มีผลต่อปริมาณความชื้นของแป้งมันสำปะหลังอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องจากขั้นตอนการผลิตและการอบแห้งแป้งมีมาตรฐานใกล้เคียงกัน ค่าความขาวของแป้งมันสำปะหลังมีค่าอยู่ระหว่าง 94.83–96.10 % โดยค่าความขาวสูงที่สุดพบใน จังหวัดยโสธร พันธุ์ห้วยบง 60 (96.10%) และต่ำที่สุดพบใน จังหวัดกาฬสินธุ์ พันธุ์พิรุณ 1 (94.83 %)

ตารางที่ 6 แสดงผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ปลูกและสายพันธุ์มันสำปะหลังต่อคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

พื้นที่ปลูก (ปัจจัยที่1)	พันธุ์มันสำปะหลัง (ปัจจัยที่2)	ปริมาณความชื้น (%)	ความขาว (%)	pH	ค่าการนำไฟฟ้า (EC)	ค่าความหนืด (BU)	ไซยาไนด์ (ppm)
จังหวัดยโสธร (A1)	พันธุ์ห้วยบง 60 (B1)	12.47	96.10	6.23	44.77bc	900.33a	0.675
จังหวัดยโสธร (A1)	พันธุ์เกษตรศาสตร์50 (B2)	12.47	95.00	5.35	40.80c	865.33ab	0.675
จังหวัดยโสธร (A1)	พันธุ์ระยอง 3 (B3)	12.55	95.60	5.58	51.71a	858.67bc	0.675
จังหวัดยโสธร (A1)	พันธุ์ พิรุณ 1 (B4)	12.87	95.07	5.67	52.12a	863.00bc	0.608
จังหวัดกาฬสินธุ์ (A2)	พันธุ์ห้วยบง 60 (B1)	12.90	96.00	5.84	55.33a	866.00ab	0.608
จังหวัดกาฬสินธุ์ (A2)	พันธุ์เกษตรศาสตร์50 (B2)	12.37	95.40	5.57	56.25a	870.00ab	0.608
จังหวัดกาฬสินธุ์ (A2)	พันธุ์ระยอง 3 (B3)	12.88	95.50	5.61	53.20a	857.67bc	0.608
จังหวัดกาฬสินธุ์ (A2)	พันธุ์ พิรุณ 1 (B4)	12.48	94.83	5.42	56.32a	869.67ab	0.608
จังหวัดมุกดาหาร (A3)	พันธุ์ห้วยบง 60 (B1)	13.13	95.90	5.7a	50.64b	926.33a	0.608
จังหวัดมุกดาหาร (A3)	พันธุ์เกษตรศาสตร์50 (B2)	12.73	95.13	5.81	44.37bc	890.67ab	0.500
จังหวัดมุกดาหาร (A3)	พันธุ์ระยอง 3 (B3)	12.46	95.83	5.57	46.05b	884.00ab	0.500
จังหวัดมุกดาหาร (A3)	พันธุ์ พิรุณ 1 (B4)	12.81	95.20	5.52	47.13b	849.67bc	0.500
จังหวัดสกลนคร (A4)	พันธุ์ห้วยบง 60 (B1)	12.53	95.37	5.82	45.63b	904.00a	0.195
จังหวัดสกลนคร (A4)	พันธุ์เกษตรศาสตร์50 (B2)	12.61	95.87	5.50	49.43ab	881.33ab	0.171
จังหวัดสกลนคร (A4)	พันธุ์ระยอง 3 (B3)	12.42	95.87	5.88	43.07b	851.33bc	0.142
จังหวัดสกลนคร (A4)	พันธุ์ พิรุณ 1 (B4)	12.65	95.67	5.67	49.42b	852.33bc	0.117
Mean		12.42	95.15	5.67	49.14	874.40	0.60
F-test		ns	ns	ns	*	*	ns
% CV		13.55	0.80	4.39	10.52	2.51	31.82

หมายเหตุ

ns และ * หมายถึง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และ มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น *P≤0.05*
ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรยกกำกับต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น *P≤ 0.05*

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความขาว และค่า pH ของแป้งมันสำปะหลัง พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ปลูกและสายพันธุ์ไม่มีผลต่อค่าความขาว และค่า pH ของแป้งมันสำปะหลัง ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้าและความหนืดของแป้ง พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ปลูกและสายพันธุ์มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าและความหนืดของแป้ง มีค่าการนำไฟฟ้าของแป้งมันสำปะหลังมีค่าอยู่ระหว่าง 40.80–56.32 โดยค่าที่สูงที่สุดพบใน จังหวัดกาฬสินธุ์ พันธุ์พิรุณ 1 (56.32) ขณะที่ค่าต่ำที่สุดพบใน จังหวัดยโสธร พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 (40.80) ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับปริมาณแร่ธาตุหรือองค์ประกอบทางเคมีในหัวมันสำปะหลังที่แตกต่างกันตามสภาพดินและศักยภาพของแต่ละสายพันธุ์ในการดูดใช้ธาตุอาหาร ค่าความหนืดของแป้งมันสำปะหลังมีค่าอยู่ระหว่าง 849.67–926.33 BU โดยค่าความหนืดสูงที่สุดพบใน จังหวัดมุกดาหาร พันธุ์ห้วยบง 60 (926.33 BU) ขณะที่ค่าต่ำที่สุดพบใน จังหวัดมุกดาหาร พันธุ์พิรุณ 1 (849.67 BU) ซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างของโครงสร้างเม็ดแป้ง รวมถึงสัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินที่ได้รับอิทธิพลจากทั้งพันธุกรรมของสายพันธุ์และสภาพแวดล้อมในการปลูก ส่วนปริมาณไซยาไนด์ของแป้งมันสำปะหลัง พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ปลูกและสายพันธุ์ไม่มีผลต่อปริมาณไซยาไนด์ในแป้งมันสำปะหลังอย่างชัดเจน และค่าที่พบยังอยู่ในระดับต่ำซึ่งปลอดภัยต่อการบริโภคมีค่าอยู่ในช่วง 0.117–

0.675 ppm โดยค่าที่สูงที่สุดพบใน จังหวัดยโสธร (หลายสายพันธุ์มีค่า 0.675 ppm) และค่าต่ำที่สุดพบใน จังหวัดสกลนคร พันธุ์พิรุณ 1 (0.117 ppm)

สมบัติดินของพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังในแต่ละจังหวัด

จากผลการวิเคราะห์สมบัติดินในพื้นที่ปลูกทั้ง 4 จังหวัด พบว่าค่าความเป็นกรดด่างของดินอยู่ในช่วง 5.10–7.90 ปริมาณอินทรียวัตถุอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง และปริมาณธาตุอาหารพืชแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ซึ่งอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความแตกต่างของผลผลิตมันสำปะหลังที่พบในการทดลอง

ตารางที่ 7 ค่าการวิเคราะห์สมบัติดินของพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังในแต่ละจังหวัด

ข้อมูลที่วิเคราะห์/สถานที่	จังหวัดยโสธร	จังหวัดกาฬสินธุ์	จังหวัดมุกดาหาร	จังหวัดสกลนคร
pH	7.90	5.10	7.40	7.80
Electrical Conductivity (dS/m)	0.19	0.01	0.14	0.17
Organic Matter (%)	1.88	0.54	1.11	1.59
Total Nitrogen (%)	<0.10	<0.10	<0.14	<0.10
Available Phosphate (P_2O_5) (%)	40.63	39.45	27.43	35.08
Exchangeable potassium (mg/kg)	508.1	259.40	335.30	459.90

หมายเหตุ: ตัวเลขแสดงค่าการวิเคราะห์สมบัติดินเฉลี่ยของพื้นที่ปลูกก่อนการทดลอง

อภิปรายผล

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า พื้นที่ปลูกมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณหัวต่อต้น ผลผลิตหัวมันสด และปริมาณแป้งที่ผลิตได้ ($P \leq 0.05$) แต่ไม่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์แป้งในหัวสดในทางสถิติ สะท้อนให้เห็นว่าสภาพแวดล้อมมีผลต่อการสร้างชีวมวล (Biomass) โดยรวมมากกว่าการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีภายในหัวมันสำปะหลังโดยตรง โดยจังหวัดยโสธรให้ผลผลิตหัวมันสดสูงที่สุด (7,100 กิโลกรัม/ไร่) เนื่องจากมีปริมาณอินทรียวัตถุ (1.88 %) และฟอสฟอรัสที่ละลายได้ (40.63 %) สูงกว่าพื้นที่อื่น ซึ่งเอื้อต่อการพัฒนาระบบรากและการสร้างหัวในระยะแรก ขณะที่จังหวัดสกลนครแม้ให้ผลผลิตหัวสดต่ำกว่า แต่กลับให้เปอร์เซ็นต์แป้งเฉลี่ยสูงที่สุด (25.00 %) และมีปริมาณแป้งรวมสูงที่สุด (1,515.7 กิโลกรัม) ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้จากสมบัติดินของจังหวัดสกลนครที่มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในระดับสูง (459.90 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) ซึ่งโพแทสเซียมมีบทบาทสำคัญในการควบคุมการเปิด-ปิดปากใบเพื่อการสังเคราะห์แสง ตลอดจนเร่งการเคลื่อนย้ายน้ำตาลจากใบไปสะสมในรูปของแป้งที่หัวใต้ดิน สอดคล้องกับรายงานของ [4] ที่ระบุว่าความอุดมสมบูรณ์ของดินและธาตุอาหารหลักมีผลโดยตรงต่อกิจกรรมทางสรีรวิทยาและการสร้างคุณภาพแป้งมันสำปะหลัง

ในด้านอิทธิพลของสายพันธุ์ มันสำปะหลังพันธุ์ห้วยบง 60 แสดงศักยภาพทางพันธุกรรมที่สูงสุดอย่างชัดเจน โดยให้ผลผลิตหัวมันสด (7,000 กิโลกรัมต่อไร่) เปอร์เซ็นต์แป้งเฉลี่ย (26.51 %) และปริมาณแป้งที่ผลิตได้ (1,955.6 กิโลกรัม) สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงถึงประสิทธิภาพที่สูงในการสังเคราะห์แสง การลำเลียงคาร์โบไฮเดรต และการเปลี่ยนรูปพลังงานไปสะสมในหัว ซึ่งเป็นลักษณะเด่นทางพันธุกรรมที่ปรับตัวได้ดีในสภาพดินทรายของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตรงตามรายงานของ [1] ที่อธิบายว่า ศักยภาพการให้ผลผลิตและการสะสมคาร์โบไฮเดรตในหัวมันสำปะหลังถูกควบคุมโดยลักษณะทางพันธุกรรมเฉพาะของแต่ละสายพันธุ์

ประเด็นสำคัญที่พบในการวิจัยนี้คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ปลูกและสายพันธุ์ (G x E interaction) มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณหัวต่อต้น เปอร์เซ็นต์แป้ง ผลผลิตหัวมันสด และปริมาณแป้งที่ผลิตได้ โดยเฉพาะพันธุ์ห้วยบง 60 ที่ปลูกในจังหวัดสกลนคร สามารถแสดงศักยภาพสูงสุดโดยให้เปอร์เซ็นต์แป้งสูงถึง 27.53 % และให้ปริมาณแป้งที่ผลิตได้สูงที่สุด (2,065.0 กิโลกรัม) ยืนยันว่าการแสดงออกทางพันธุกรรมของมันสำปะหลังมีความจำเพาะเจาะจงต่อสภาพแวดล้อมและสมบัติดินในแต่ละพื้นที่ สอดคล้องกับแนวคิดของ [5] ซึ่งระบุว่าการประเมินพันธุ์มันสำปะหลังเพื่อการส่งเสริมเชิงพาณิชย์ไม่สามารถพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของสายพันธุ์หรือพื้นที่เพียงอย่างเดียวได้ แต่ต้องอาศัยข้อมูลปฏิสัมพันธ์ร่วมเพื่อระบุความเหมาะสมเฉพาะพื้นที่ (Site-specific suitability) ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรสามารถบริหารจัดการความเสี่ยงและเพิ่มเสถียรภาพของผลผลิตได้อย่างแม่นยำ

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงหน้าที่ทางอุตสาหกรรม พบว่าพื้นที่ปลูก สายพันธุ์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัย ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าการนำไฟฟ้า (EC) และค่าความหนืดสูงสุด (BU) ค่าการนำไฟฟ้าที่ผันแปรตามพื้นที่ปลูก (โดยเฉพาะในจังหวัดกาฬสินธุ์ พันธุ์พิรุณ 1 ที่มีค่าสูงถึง 56.32) สัมพันธ์โดยตรงกับแร่ธาตุและไอออนที่ละลายได้ในดินที่รากดูดซึมเข้าไปตกค้างในเม็ดแป้ง สำหรับค่าความหนืดสูงสุด พันธุ์ห้วยบง 60 ที่ปลูกในจังหวัดมุกดาหารให้ค่าสูงสุด (926.33 BU) ซึ่งสมบัติด้านความหนืดนี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับสัดส่วนและโครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน โดยดินที่มีปริมาณโพแทสเซียมเด่นชัดจะช่วยส่งเสริมความสมบูรณ์ของโครงสร้างเม็ดแป้ง ทำให้แป้งมีโครงสร้างที่อุ้มน้ำและทนทานต่อแรงเฉือนได้ดีขึ้น เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปมูลค่าสูง เช่น แป้งดัดแปร เอทานอล และพลาสติกชีวภาพ ในขณะที่ปัจจัยทั้งหมดไม่ส่งผลกระทบต่อความชื้น ความขาว pH และปริมาณไซยาไนด์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความชื้นและความขาวถูกควบคุมด้วยมาตรฐานในกระบวนการผลิตและการอบแห้งแป้ง อีกทั้งปริมาณไซยาไนด์ที่พบมีค่าต่ำมาก (0.117 - 0.675 ppm) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการบริโภคตามมาตรฐานสากล

สรุปผล

ผลการศึกษาพบว่า สายพันธุ์มันสำปะหลังมีอิทธิพลต่อจำนวนหัวต่อต้น ปริมาณแป้ง และผลผลิตแป้งต่อไร่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพันธุ์ห้วยบง 60 ให้ผลดีที่สุด มีจำนวนหัวเฉลี่ย 16.33 หัวต่อต้น ปริมาณแป้งเฉลี่ย 26.51% และผลผลิตแป้งสูงสุด 1,955.60 กิโลกรัมต่อไร่ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพทางพันธุกรรมที่ดีในการสะสมแป้งและการให้ผลผลิตสูง จึงเหมาะสมต่อการปลูกเชิงพาณิชย์มากกว่าสายพันธุ์อื่น พื้นที่ปลูกมีผลต่อผลผลิตหัวมันสดและการสะสมแป้งของมันสำปะหลังอย่างชัดเจน โดยจังหวัดยโสธรให้ผลผลิตหัวมันสดเฉลี่ยสูงที่สุด เท่ากับ 7,100 กิโลกรัมต่อไร่ ขณะที่จังหวัดสกลนครให้เปอร์เซ็นต์แป้งสูงที่สุด เท่ากับ 25.00% แม้ว่าจะมีผลผลิตหัวสดต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าสภาพแวดล้อมของพื้นที่ เช่น ความอุดมสมบูรณ์ของดินและสภาพภูมิอากาศ มีผลต่อทั้งการสร้างผลผลิตและการสะสมแป้งในหัวมันสำปะหลัง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสายพันธุ์และพื้นที่ปลูกมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลผลิตและคุณภาพแป้ง โดยเฉพาะพันธุ์ห้วยบง 60 ที่ปลูกในจังหวัดสกลนคร ให้ผลผลิตแป้งต่อไร่สูงที่สุด เท่ากับ 2,065 กิโลกรัมต่อไร่ นอกจากนี้ยังพบว่าปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวมีผลต่อค่าการนำไฟฟ้า (EC) และค่าความหนืด (BU) ของแป้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สะท้อนให้เห็นว่าการเลือกสายพันธุ์ให้เหมาะสมกับพื้นที่ปลูกมีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพแป้ง สมบัติดินของพื้นที่ปลูกทั้ง 4 จังหวัดมีความแตกต่างกันในด้านค่า pH ปริมาณอินทรียวัตถุ และธาตุอาหารหลัก ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการสะสมแป้งของมันสำปะหลัง โดยเฉพาะจังหวัดยโสธรและสกลนครที่มีค่าฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมค่อนข้างสูง รวมถึงมีค่า pH ใกล้เคียงกลาง ทำให้เหมาะสมต่อการพัฒนาระบบรากและการสร้างหัวมากกว่าพื้นที่ที่มีความเป็นกรดสูง การเลือกสายพันธุ์ให้เหมาะสมกับสภาพดินและสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้พันธุ์ห้วยบง 60 ในพื้นที่จังหวัดสกลนครและยโสธร จะช่วยเพิ่มผลผลิต ยกระดับคุณภาพแป้ง และเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมมันสำปะหลังของประเทศไทยในระยะยาว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ และบริษัท แป้งมันกาฬสินธุ์ จำกัด ที่สนับสนุนการทำงาน งบประมาณและพื้นที่ในการทำงานวิจัย และช่วยดูแลเก็บข้อมูลงานวิจัยในครั้งนี้ จนทำให้งานวิจัยสำเร็จเรียบร้อยสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

1. El-Sharkawy, M. A. Cassava biology and physiology. Plant Molecular Biology, 2004; 56(4), 481-501. https://doi.org/10.1007/s11103-005-2270-7
2. Piyachomkwan, K., Tanticharoen, M. Cassava Industry in Thailand: Prospects., The Journal of the Royal Institute of Thailand. 2011; 111, 160-170. https://www.thaiscience.info/Journals/Article/TJRI/10990668.pdf
3. Moorthy, S. N. Physicochemical and functional properties of tropical tuber starches: A review. Starch-Stärke. 2002; 54(12), 559-592. https://doi.org/10.1002/1521-379X(200212)54:12%3C559::AID-STAR2222559%3E3.0.CO;2-F
4. Howeler, R. H. Cassava mineral nutrition and fertilization. In R. J. Hillocks, J. M. Thresh, A. C. Bellotti (Eds.), Cassava: Biology, production and utilization. CABI Publishing. 2002; 115-147. http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_CIAT/cabi_10ch7.pdf
5. Mbe, J. O., Dzidzienyo, D., Abah, S. P., Njoku, D. N., Aghogho, C. I., Onyeka, J., Tongoona, P., Egesi, C. Genotype by environment interaction effect and fresh root yield stability of cassava genotypes under contrasting nitrogen regimes. Scientific Reports. 2024; 14(1), Article 20718. https://doi.org/10.1038/s41598-024-71157-0
6. Nassar, N. M. A., Ortiz, R. Cassava improvement: Challenges and impacts. The Journal of Agricultural Science. 2007; 145(2), 163-171. https://doi.org/10.1017/S0021859606006575
7. Charles, A. L., Sriroth, K., Huang, T. C. Proximate composition, mineral contents, hydrogen cyanide and phytic acid of 5 cassava genotypes. Food Chemistry. 2005; 92(4), 615-620. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.08.024

บทความวิจัย (Research Article)

ความรอบรู้ด้านดิจิทัลและองค์กรแห่งการเรียนรู้ที่มีผลต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุข ในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี

Digital Literacy and Learning Organization Affecting the Development of Quality Standards in Primary Care Network of Health Personnel in Sub-District Health Promoting Hospitals, Udon Thani Province

นรากร สารีแหล้[1] และ จิระพรรณ สุปัญญา[2*]
Narakorn Sareelae[1] and Jirapun Supunya[2*]
[1]พยาบาลวิชาชีพ โรงพยาบาลธัญญารักษ์อุดรธานี
[1]Registered Nurse, Thanyarak Udonthani Hospital
[2]อาจารย์ วิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี อุดรธานี คณะพยาบาลศาสตร์ สถาบันพระบรมราชชนก
[2]Lecturer, Boromarajonani College of Nursing, Udon Thani, Faculty of Nursing, Praboromarajchanok Institute
*Corresponding author; email: jirapunsup@bcnu.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
16 พฤษภาคม 2569	27 พฤษภาคม 2569	1 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยเชิงพรรณนาแบบภาคตัดขวางนี้ เพื่อศึกษาความรอบรู้ด้านดิจิทัลและองค์กรแห่งการเรียนรู้ที่มีผลต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี ศึกษาจากประชากร 206 คน ทำการสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งชั้นภูมิเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง 134 คน เครื่องมือที่ใช้ได้แก่ แบบสอบถาม ซึ่งผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้เชี่ยวชาญ 3 คน ทุกข้อคำถามมีค่าดัชนีความสอดคล้องอยู่ระหว่าง 0.67-1.00 วิเคราะห์ค่าความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม ได้ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาช เท่ากับ 0.97 ดำเนินการเก็บข้อมูลระหว่างวันที่ 1-31 ธันวาคม 2568 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ สถิติเชิงพรรณนาและสถิติเชิงอนุมาน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05

ผลการศึกษาพบว่าภาพรวมระดับความรอบรู้ด้านดิจิทัล ระดับองค์กรแห่งการเรียนรู้ และระดับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิ อยู่ในระดับมากค่าเฉลี่ย 4.48 (S.D.=0.40), 4.05 (S.D.=0.51), และ 4.18 (S.D.=0.47) ตามลำดับ ภาพรวมความรอบรู้ด้านดิจิทัลและองค์กรแห่งการเรียนรู้ มีความสัมพันธ์ระดับปานกลางกับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (r=0.490, p-value<0.001), (r=0.695, p-value<0.001) ตามลำดับ และตัวแปรทั้ง 4 ตัวแปร ประกอบด้วย องค์กรแห่งการเรียนรู้ด้านการคิดอย่างเป็นระบบ ความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการเข้าใจดิจิทัล องค์กรแห่งการเรียนรู้ด้านการเรียนรู้ร่วมกันเป็นทีม และความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการใช้ดิจิทัล สามารถร่วมกันในการพยากรณ์และมีผลต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี ได้ร้อยละ 53.1 (R^2 = 0.531, p-value<0.001)

คำสำคัญ: ความรอบรู้ด้านดิจิทัล, องค์กรแห่งการเรียนรู้, การพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิ

Abstract

This cross-sectional descriptive research aimed to study the digital literacy and learning organization affecting the development of quality standards in primary care network. Udon Thani province, Thailand. The study employed stratified random sampling to obtain 206 participants from a total population of 134. The research instrument was a questionnaire, which was validated for content validity by three experts, with all items objective congruence (IOC) greater between 0.67-1.00. The questionnaire's reliability was assessed, yielding a Cronbach's alpha coefficient of 0.97. Data collection was conducted from December 1st, 2025 to December 31st, 2025. Statistical analyses included descriptive and inferential statistics, with a significance level of 0.05.

The study found that the overall levels of digital literacy, learning organization, and the development of quality standards in primary care network were at high, with mean scores of 4.48 (S.D.=0.40), 4.05 (S.D.=0.51), and 4.18 (S.D.=0.47), respectively. Both overall of digital literacy and learning organization showed a moderate and statistically significant relationship with the development of quality standards in primary care network (r=0.490, p-value<0.001) and (r=0.695, p-value <0.001), respectively. The four variables consisted of learning organization in system thinking, digital literacy in digital literacy, learning organization in collaborative team learning and digital literacy in digital skill affected and could jointly predict the development of quality standards in primary care network Udon Thani province at 53.1 percentage, (R^2 = 0.531, p-value < 0.001).

Keywords: Digital Literacy, Learning Organization, The Development of Quality Standards in Primary Care Network

บทนำ

การเปลี่ยนแปลงของระบบสุขภาพในศตวรรษที่ 21 ส่งผลให้หน่วยบริการสุขภาพปฐมภูมิต้องปรับตัวทั้งด้านการบริหารจัดการ การใช้เทคโนโลยีดิจิทัล และการพัฒนาคุณภาพบริการอย่างต่อเนื่อง ภายใต้นโยบายการพัฒนาระบบสุขภาพของประเทศไทยที่มุ่งสู่ระบบสุขภาพดิจิทัล (Digital Health) องค์การอนามัยโลกได้เน้นการพัฒนาระบบข้อมูลสุขภาพและเทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริการสุขภาพปฐมภูมิ ทั้งด้านการเข้าถึงบริการ ความต่อเนื่อง และการเชื่อมโยงข้อมูลสุขภาพอย่างเป็นระบบ [1] นอกจากนี้กระทรวงสาธารณสุขยังมีนโยบายยกระดับเครือข่ายบริการปฐมภูมิให้มีมาตรฐานตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิ เพื่อให้ประชาชนได้รับบริการสุขภาพที่มีคุณภาพ ครอบคลุม และเป็นศูนย์กลางของระบบบริการสุขภาพ ส่งผลให้บุคลากรสาธารณสุขจำเป็นต้องมีศักยภาพในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว [2]

การพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของพยาบาลวิชาชีพในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล เป็นกระบวนการพัฒนาคุณภาพการให้บริการสุขภาพปฐมภูมิในระดับหน่วยบริการและเครือข่ายบริการที่เจ้าหน้าที่สาธารณสุขมีบทบาทสำคัญ โดยใช้เกณฑ์มาตรฐานที่เรียกว่าเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิ (Primary Care Award: PCA) เป็นกรอบแนวทางในการประเมินและพัฒนาระบบบริการอย่างต่อเนื่อง [3] ซึ่งถือเป็นกลไกสำคัญในการยกระดับคุณภาพบริการสุขภาพระดับปฐมภูมิ โดยองค์การอนามัยโลกได้ระบุว่าระบบบริการปฐมภูมิที่มีคุณภาพต้องประกอบด้วยการเข้าถึงบริการอย่างทั่วถึง ความต่อเนื่องของการดูแล ความครอบคลุมของบริการ การประสานงานระหว่างหน่วยบริการ และการดูแลที่ยึด

ประชาชนเป็นศูนย์กลาง โดยพัฒนาต่อยอดจากแนวคิดโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลติดดาว มาตรฐานนี้ถูกออกแบบให้เป็นเครื่องมือเชิงยุทธศาสตร์ในการพัฒนาระบบบริการสุขภาพที่มีคุณภาพ ประสิทธิภาพ เป็นธรรม และสร้างความเชื่อมั่นแก่ประชาชน มุ่งเสริมสร้างสุขภาวะที่ดีผ่านการประเมินครอบคลุม 8 มิติสำคัญ ซึ่งประกอบไปด้วย 1) ด้านระบบบริหารจัดการ 2) ด้านการจัดบุคลากรและศักยภาพในการให้บริการ 3) ด้านสถานที่ตั้งหน่วยบริการ 4) ด้านระบบสารสนเทศ 5) ด้านระบบบริการสุขภาพปฐมภูมิ 6) ด้านระบบห้องปฏิบัติการด้านการแพทย์และสาธารณสุข 7) ด้านการจัดบริการเภสัชกรรมและงานคุ้มครองผู้บริโภคด้านสุขภาพ 8) ด้านระบบป้องกันและควบคุมการติดเชื้อ [4] จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าภาพรวมการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลอยู่ในระดับมาก [5-7]

ความรอบรู้ด้านดิจิทัล (Digital Literacy) เป็นสมรรถนะสำคัญของบุคลากรสาธารณสุขในยุคดิจิทัล เนื่องจากเทคโนโลยีสารสนเทศและระบบข้อมูลสุขภาพถูกนำมาใช้ในการปฏิบัติงาน การบริหารจัดการข้อมูล และการติดตามคุณภาพบริการอย่างกว้างขวาง บุคลากรสุขภาพจำเป็นต้องมีทักษะในการเข้าถึง วิเคราะห์ ใช้ประโยชน์ และจัดการข้อมูลดิจิทัลอย่างมีประสิทธิภาพ [8] เพื่อพัฒนาคุณภาพการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยความรอบรู้ด้านดิจิทัล ประกอบด้วย 4 ด้าน ได้แก่ 1) การเข้าใจดิจิทัล 2) การใช้ดิจิทัล 3) การแก้ปัญหาด้วยเครื่องมือดิจิทัล และ 4) การปรับตัวสู่การเปลี่ยนแปลง [9] จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าภาพรวมทัศนคติต่อการใช้ดิจิทัลมีความสัมพันธ์ระดับปานกลางกับความรอบรู้ด้านสุขภาพดิจิทัลของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขที่ปฏิบัติงานในระบบบริการสุขภาพ [10-12]

นอกจากความรอบรู้ด้านดิจิทัลแล้ว องค์กรแห่งการเรียนรู้ (Learning Organization) เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาคุณภาพบริการสุขภาพ เนื่องจากองค์กรที่ส่งเสริมการเรียนรู้ร่วมกัน การแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ และการพัฒนาศักยภาพบุคลากรอย่างต่อเนื่อง จะช่วยให้เกิดการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงและสามารถพัฒนางานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีความสอดคล้องกับการพัฒนาคุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิที่ต้องอาศัยความร่วมมือจากบุคลากรหลายสาขาวิชาชีพ จะช่วยยกระดับมาตรฐานการทำงานอย่างเป็นระบบ และยั่งยืนนำไปสู่การพัฒนาระบบสุขภาพปฐมภูมิที่เข้มแข็งและยั่งยืน โดยอาศัยกระบวนการเรียนรู้ ที่ทำให้ความรู้กลายเป็นความรู้ที่เกิดประโยชน์ ต่อบุคลากรทั้งองค์กร ประกอบด้วย 5 ด้าน ได้แก่ 1) การเป็นบุคคลรอบรู้ 2) การมีแบบแผนความคิด 3) การมีวิสัยทัศน์ร่วมกัน 4) การเรียนรู้ร่วมกันเป็นทีม 5) การคิดอย่างเป็นระบบ [13] จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ภาพรวมองค์กรแห่งการเรียนรู้มีความสัมพันธ์ระดับสูงถึงระดับปานกลางกับการพัฒนาคุณภาพมาตรฐานการบริการสุขภาพปฐมภูมิ [14-15]

จังหวัดอุดรธานีมีโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลจำนวน 206 แห่ง ซึ่งทุกแห่งต้องผ่านการประเมินตามเกณฑ์พัฒนาและคุณภาพมาตรฐานบริการสุขภาพปฐมภูมิ 8 ด้าน อย่างไรก็ตามการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี ยังเผชิญข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความแตกต่างด้านศักยภาพบุคลากร ความพร้อมของระบบเทคโนโลยีสารสนเทศ ภาระงานที่สูง และข้อจำกัดด้านทรัพยากร ส่งผลให้การดำเนินงานตามเกณฑ์คุณภาพยังไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน อีกทั้งบุคลากรบางส่วนยังขาดทักษะด้านดิจิทัลและโอกาสในการพัฒนาการเรียนรู้ร่วมกันภายในองค์กร ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของการพัฒนาคุณภาพบริการปฐมภูมิ นอกจากนี้ยังพบปัญหาด้านระบบห้องปฏิบัติการทางการแพทย์และการควบคุมป้องกันการติดเชื้อ ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับสมรรถนะของบุคลากรในการใช้ความรู้ทางวิชาชีพ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ และการเรียนรู้พัฒนางานอย่างต่อเนื่อง ปัญหาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การพัฒนาคุณภาพบริการปฐมภูมิไม่ได้ขึ้นอยู่เฉพาะทรัพยากรหรือโครงสร้างองค์กรเท่านั้น แต่ยังเกี่ยวข้องกับศักยภาพของบุคลากรในด้านความรอบรู้ด้านดิจิทัล ที่ช่วยให้สามารถเข้าถึง ใช้ และจัดการข้อมูลสุขภาพได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ รวมถึงองค์กรแห่งการเรียนรู้ที่ส่งเสริมการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ การพัฒนาทักษะวิชาชีพ และการสร้างวัฒนธรรมการพัฒนาคุณภาพอย่างต่อเนื่องภายในหน่วยบริการ [16]

จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาความรอบรู้ด้านดิจิทัลและองค์กรแห่งการเรียนรู้ที่มีผลต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี เนื่องจากทั้งสองปัจจัยถือเป็นกลไกสำคัญในการเสริมสร้างศักยภาพบุคลากรสาธารณสุขให้สามารถพัฒนาคุณภาพบริการได้ตามมาตรฐานที่กำหนด อีกทั้งผลการศึกษาจะเป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ที่สามารถนำไปใช้วางแผนพัฒนาบุคลากร ระบบการเรียนรู้ภายในองค์กร และการบริหารจัดการเครือข่ายบริการสุขภาพปฐมภูมิให้มีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับบริบทของพื้นที่ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความรอบรู้ด้านดิจิทัลและองค์กรแห่งการเรียนรู้ ที่มีผลต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี
2. เพื่อศึกษาระดับความรอบรู้ด้านดิจิทัล ระดับองค์กรแห่งการเรียนรู้ และระดับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี
3. เพื่อศึกษาปัญหา อุปสรรค และข้อเสนอแนะการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี

วิธีดำเนินการวิจัย

1. รูปแบบการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงพรรณนาแบบภาคตัดขวาง (Cross-Sectional Descriptive Research)

2. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ศึกษา คือ เจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี ที่รับผิดชอบงานคุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิ จำนวน 206 คน [16] และกลุ่มตัวอย่างได้จากการการคำนวณขนาดตัวอย่างโดยใช้สูตรการคำนวณขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยพหุเชิงเส้นแบบขั้นตอน (Stepwise Multiple Linear Regression Analysis) เพื่อทดสอบสมมติฐานของ [17] ดังนี้

สูตร $$N = \frac{\lambda(1-R^2_{Y.A,B})}{R^2_{Y.A,B}-R^2_{Y.A.}} + w \quad \text{..... (1)}$$

เมื่อ $$\lambda = \lambda_L - \frac{1/V_L - 1/V}{1/V_L - 1/V_U}(\lambda_L - \lambda_U) \quad \text{..... (2)}$$

เมื่อกำหนดให้

$R^2_{Y.A,B}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงพหุสำหรับ Full Model ซึ่งในการศึกษาในครั้งนี้ได้นำค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยของตัวแปร จากการศึกษาสมรรถนะในศตวรรษที่ 21 และภาวะผู้นำการเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อการพัฒนาคุณภาพมาตรฐานบริการสุขภาพปฐมภูมิของผู้อำนวยการโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดชัยภูมิ [5] ซึ่งเป็นลักษณะงานที่คล้ายคลึงกันในการวิจัยครั้งนี้ ซึ่งได้ค่า $R^2_{Y.A,B}$ = 0.684

$R^2_{Y.A.}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงพหุสำหรับ Reduce model ($R^2_{Y.A,B}$ - $R^2_{Y.B.}$) ซึ่งได้ค่า $R^2_{Y.A.}$ = 663

$R^2_{Y.B.}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงพหุที่เปลี่ยนแปลง (R^2 Change) เมื่อไม่มีตัวแปรที่ต้องการทดสอบ $R^2_{Y.B.}$ = 0.021

λ คือ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนตัวแปรอิสระและอำนาจการทดสอบ

w คือ จำนวนตัวแปรอิสระนอกเหนือจากตัวแปรที่ต้องการทดสอบ (เซต A) = 0 (เซต B) = 12

u คือ จำนวนตัวแปรอิสระที่ต้องการทดสอบ (เซต B) เท่ากับ 1 ตัวแปร

V คือ ค่าที่ได้จาก V = N – u – w - 1

ซึ่งการวิจัยในครั้งนี้ได้นำค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยของตัวแปรจากการศึกษา สมรรถนะในศตวรรษที่ 21 และภาวะผู้นำการเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อการพัฒนาคุณภาพมาตรฐานบริการสุขภาพปฐมภูมิของผู้อำนวยการโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดชัยภูมิ [5] ซึ่งเป็นงานที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันและมีบริบทที่ใกล้เคียงกันในการทำวิจัยครั้งนี้ ผลจากการคำนวณขนาดตัวอย่างจำนวนเท่ากับ 118 คน กรณีตอบแบบสอบถาม ผู้วิจัยจึงใช้กลุ่มตัวอย่าง คือ เจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี จำนวน 118 ตัวอย่าง และเพื่อป้องกันการสูญหายในการตอบกลับของแบบสอบถามหรือไม่ได้รับแบบสอบถามคืน (Response rate) ผู้วิจัยจึงเก็บข้อมูลแบบสอบถามจากกลุ่มตัวอย่างเพิ่มร้อยละ 20 [18] ทำให้การเก็บแบบสอบถามมีจำนวนเท่ากับ 142 ตัวอย่าง ในการสุ่มตัวอย่าง เพื่อให้เจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี มีโอกาสในการถูกสุ่มเป็นตัวแทนของประชากรที่ดีและครอบคลุมตามสัดส่วน ผู้วิจัยจึงใช้วิธีสุ่มแบบแบ่งชั้นภูมิ (Stratified Random Sampling) โดยแยกรายอำเภอ ผู้วิจัยเก็บตัวอย่างได้ทั้งสิ้น 134 ตัวอย่าง ซึ่งมากกว่าขนาดตัวอย่างที่คำนวนได้ คือ 118 ตัวอย่าง และ คิดเป็น ร้อยละ 94.36 ของขนาดตัวอย่างที่คำนวณเพื่อป้องกันการสูญหายในการตอบกลับ ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำตัวอย่าง ทั้งหมด 134 ตัวอย่าง ที่เก็บได้มาใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือแบบสอบถาม (Questionnaire) แบ่งเป็น 5 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นคำถามเกี่ยวกับคุณลักษณะส่วนบุคคล จำนวน 9 ข้อ ส่วนที่ 2 เป็นคำถามเกี่ยวกับความรอบรู้ด้านดิจิทัล จำนวน 20 ข้อ มีคำตอบให้เลือก 5 ระดับ (5,4,3,2,1) ส่วนที่ 3 เป็นคำถามเกี่ยวกับองค์กรแห่งการเรียนรู้ จำนวน 25 ข้อ มีคำตอบให้เลือก 5 ระดับ (5,4,3,2,1) ส่วนที่ 4 เป็นคำถามเกี่ยวกับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จำนวน 40 ข้อ มีคำตอบให้เลือก 5 ระดับ (5,4,3,2,1) และส่วนที่ 5 เป็นคำถามปลายเปิด ให้เติมข้อความแสดงความคิดเห็นได้อย่างอิสระเกี่ยวกับปัญหา อุปสรรค และข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จำนวน 3 ข้อ

คะแนนระดับความรอบรู้ด้านดิจิทัล ระดับองค์กรแห่งการเรียนรู้ และระดับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล โดยการนำมาจัดระดับ 5 ระดับ คือ มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย น้อยที่สุด ซึ่งได้จากการแบ่งช่วงคะแนนเฉลี่ย [19] ดังนี้ ระดับมากที่สุด (4.50-5.00) ระดับมาก (3.50-4.49) ระดับปานกลาง (2.50-3.49) ระดับน้อย (1.50-2.49) ระดับน้อยที่สุด (1.00-1.49) สำหรับเกณฑ์การแบ่งระดับความสัมพันธ์จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) มีค่าตั้งแต่ -1 ถึง +1 แบ่งระดับได้ดังนี้ [20] r = 0 หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์ r =±0.01 ถึง ±0.30 หมายถึง มีความสัมพันธ์ต่ำ r= ±0.31 ถึง ± 0.70 หมายถึง มีความสัมพันธ์ปานกลาง r= ±0.71 ถึง±0.99 หมายถึง มีความสัมพันธ์สูง และ r = ±1 มีความสัมพันธ์โดยสมบูรณ์

4. การตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือ

เครื่องมือทั้ง 2 ชุด ผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาจากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 ท่าน โดยนำแต่ละข้อคำถามมาหาค่าดัชนีความสอดคล้องของข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (Item Objective Congruence; IOC) พบว่า ทุกข้อคำถามมีค่าดัชนีความสอดคล้อง มากกว่า 0.50 นำแบบสอบถามไปปรับปรุงแก้ไข ตามข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ จากนั้นนำไปทดลองใช้กับเจ้าหน้าที่สาธารณสุขที่ปฏิบัติงานในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดสกลนคร เนื่องจากมีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 30 ชุด โดยหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟ่าของครอนบาช (Cronbach's Alpha Coefficients) ได้ค่าความเชื่อมั่นทั้งชุด เท่ากับ 0.97 ตัวแปรความรอบรู้ด้านดิจิทัล เท่ากับ 0.96 ตัวแปรองค์กรแห่งการเรียนรู้ เท่ากับ 0.98 และตัวแปรการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล เท่ากับ 0.98

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยจะดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มที่ทำการศึกษาหลังจากผ่านการพิจารณาอนุมัติจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ และได้ดำเนินการเก็บข้อมูลระหว่างวันที่ 1-31 ธันวาคม 2568 โดยใช้แบบสอบถาม ซึ่งมีขั้นตอนในการเก็บรวบรวมข้อมูล ดังนี้

1. ผู้วิจัยขอความอนุเคราะห์จากหน่วยงานในการออกหนังสือขออนุญาตในการทำวิจัยและเก็บรวบรวมข้อมูลถึงสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดอุดรธานี ในการเก็บข้อมูลจากเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี
2. ผู้วิจัยนำแบบสอบถามด้วยตนเอง โดยนำหนังสือขออนุญาตในการเก็บรวบรวมข้อมูล ขอความอนุเคราะห์เก็บข้อมูลในการทำวิจัยให้กับสำนักงานสาธารณสุขอำเภอทั้ง 20 อำเภอ
3. เมื่อครบกำหนดนัดหมายส่งคืนแบบสอบถาม 20 วัน ผู้วิจัยจะไปเก็บแบบสอบถามจากกล่องปิดทึบหรือซองสีน้ำตาลปิดผนึก
4. นำแบบสอบถามทุกฉบับที่รวบรวมมาได้ไปตรวจสอบความครบถ้วนสมบูรณ์ และความน่าเชื่อถือของข้อมูล เมื่อตรวจสอบข้อมูลเรียบร้อยแล้วนำข้อมูลที่ได้มาลงรหัส
5. นำข้อมูลไปวิเคราะห์ประมวลผลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS Version.26 โดยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ การแจกแจงความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่ามัธยฐาน ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และสถิติอนุมานหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน และการวิเคราะห์การถดถอยพหุแบบขั้นตอน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ส่วนข้อมูลเชิงคุณภาพทำการวิเคราะห์เชิงเนื้อหา (Content analysis) ในส่วนของปัญหาและอุปสรรค

การพิทักษ์สิทธิ์กลุ่มตัวอย่าง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตระหนักถึงหลักความปลอดภัย การยอมรับในความเป็นบุคคลของผู้ให้ข้อมูล เพื่อขออนุญาตในการเก็บข้อมูลผู้วิจัยได้อธิบายถึง วัตถุประสงค์ของการศึกษาและขอความยินยอมจากกลุ่มตัวอย่างเป็นลายลักษณ์อักษรผ่านแบบฟอร์มให้ความยินยอม (Informed consent form) และกลุ่มตัวอย่างสามารถแจ้งยุติก่อนสิ้นสุดการศึกษาได้

ตลอดเวลาและข้อมูลทุกอย่างจะถูกปิดเป็นความลับ ผลการวิจัยจะถูกนำเสนอในภาพรวมเพื่อใช้ประโยชน์สำหรับการศึกษา หากมีข้อสงสัยสามารถติดต่อผู้วิจัยได้ตลอดเวลา

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. คุณลักษณะส่วนบุคคลของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี

ได้แบบสอบถามกลับคืนมา 134 ชุด คิดเป็นร้อยละ 94.36 ผลการศึกษา พบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง จำนวน 112 คน (83.6%) อายุระหว่าง 31-40 ปี จำนวน 43 คน (32.1%) โดยมีอายุเฉลี่ย 42.07 ปี (S.D.= 9.47 ปี) อายุต่ำสุด 24 ปี อายุสูงสุด 60 ปี สถานภาพสมรส จำนวน 96 คน (71.6%) สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี จำนวน 119 คน (88.8%) ตำแหน่งประเภทวิชาการระดับชำนาญการ จำนวน 104 คน (77.6%) มีรายได้เฉลี่ยต่อเดือน 44,058.66 บาท (S.D.= 13,331.70 บาท) รายได้ต่ำสุด 18,000 บาท รายได้สูงสุด 70,000 บาท ประสบการณ์ทำงานในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี 11-20 ปี จำนวน 39 คน (29.1%) ค่ามัธยฐาน 15.00 ปี ต่ำสุด 1 ปี สูงสุด 35 ปี เคยได้รับการฝึกอบรมเกี่ยวกับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิ จำนวน 111 คน (82.8%) ส่วนใหญ่ได้รับการอบรม 1 ครั้ง จำนวน 74 คน (55.2%) มีค่ามัธยฐาน 1 ครั้ง น้อยที่สุด 1 ครั้ง มากที่สุด 5 ครั้ง เคยได้รับการประเมินตามเกณฑ์มาตรฐานการให้บริการสุขภาพปฐมภูมิ จำนวน 119 คน (88.8%) เคย 1 ครั้ง จำนวน 65 คน (48.5%) มีค่ามัธยฐาน 1 ครั้ง น้อยที่สุด 1 ครั้ง มากที่สุด 4 ครั้ง

2. ระดับความรอบรู้ด้านดิจิทัลกับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี

ผลการศึกษา พบว่า ภาพรวมกลุ่มตัวอย่างมีความรอบรู้ด้านดิจิทัลอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.48 (S.D.=0.40) เมื่อพิจารณารายด้าน พบว่า ความรอบรู้ดิจิทัลด้านการเข้าใจดิจิทัล มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด คือ อยู่ในระดับมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.69 (S.D.=0.42) รองลงมา คือ ความรอบรู้ดิจิทัลด้านการแก้ปัญหาด้วยเครื่องมือดิจิทัล อยู่ในระดับมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.67 (S.D.=0.49) ส่วนด้านที่มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ ความรอบรู้ดิจิทัลด้านการปรับตัวสู่การเปลี่ยนแปลงดิจิทัล อยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.23 (S.D.=0.56) รองลงมา คือ ความรอบรู้ดิจิทัลด้านการใช้ดิจิทัลอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.34 (S.D.=0.48) ตามลำดับ (ดังตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแปลผลระดับความรอบรู้ด้านดิจิทัล ของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี

ตัวแปรที่ศึกษา	Mean	S.D.	แปลผล
ภาพรวมความรอบรู้ด้านดิจิทัล	**4.48**	**0.40**	**มาก**
1. การเข้าใจดิจิทัล	4.69	0.42	มากที่สุด
2. การใช้ดิจิทัล	4.34	0.48	มาก
3. การแก้ปัญหาด้วยเครื่องมือดิจิทัล	4.67	0.49	มากที่สุด
4. การปรับตัวสู่การเปลี่ยนแปลงดิจิทัล	4.23	0.56	มาก

3. ระดับองค์กรแห่งการเรียนรู้กับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี

ผลการศึกษา พบว่า ภาพรวมกลุ่มตัวอย่างมีระดับองค์กรแห่งการเรียนรู้อยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ย 4.05 (S.D.= 0.51) และเมื่อพิจารณารายด้านพบว่า ด้านการเป็นบุคคลรอบรู้ มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด อยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.09 (S.D.=0.60) รองลงมา คือ ด้านการเรียนรู้ร่วมกันเป็นทีมอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.07 (S.D.=0.62) ส่วนด้านที่มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ ด้านการคิดอย่างเป็นระบบ อยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.02 (S.D.=0.65) รองลงมา คือ ด้านการมีแบบแผนความคิดอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.02 (S.D.=0.53) ตามลำดับ (ดังตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแปลผลระดับองค์กรแห่งการเรียนรู้ ของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี

ตัวแปรที่ศึกษา	Mean	S.D.	แปลผล
ภาพรวมองค์กรแห่งการเรียนรู้	**4.05**	**0.51**	**มาก**
1. การเป็นบุคคลรอบรู้	4.09	0.60	มาก
2. การมีแบบแผนความคิด	4.02	0.53	มาก
3. การมีวิสัยทัศน์ร่วมกัน	4.03	0.62	มาก
4. การเรียนรู้ร่วมกันเป็นทีม	4.07	0.62	มาก
5. การคิดอย่างเป็นระบบ	4.02	0.65	มาก

4. ระดับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี

ผลการศึกษา พบว่า ภาพรวมการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานีอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.18 (S.D.=0.47) เมื่อพิจารณารายด้านพบว่าด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด คือ ด้านระบบป้องกันและควบคุมการติดเชื้อ อยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.34 (S.D.=0.51) รองลงมา คือ ด้านระบบบริหารจัดการ อยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.31 (S.D.=0.57) ส่วนด้านที่มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ ด้านการจัดบุคลากรและศักยภาพในการให้บริการอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.04 (S.D.=0.56) รองลงมา คือ ด้านระบบห้องปฏิบัติการด้านการแพทย์และสาธารณสุข อยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.06 (S.D.=0.59) ตามลำดับ (ดังตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแปลผลระดับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี

ตัวแปรที่ศึกษา	Mean	S.D.	แปลผล
ภาพรวมการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิ	**4.18**	**0.47**	**มาก**
1. ด้านระบบบริหารจัดการ	4.31	0.57	มาก
2. ด้านการจัดบุคลากรและศักยภาพในการให้บริการ	4.04	0.56	มาก
3. ด้านสถานที่ตั้งหน่วยบริการ	4.21	0.58	มาก
4. ด้านระบบสารสนเทศ	4.10	0.58	มาก
5. ด้านระบบบริการสุขภาพปฐมภูมิ	4.23	0.52	มาก
6. ด้านระบบห้องปฏิบัติการด้านการแพทย์และสาธารณสุข	4.06	0.59	มาก
7. ด้านการจัดบริการเภสัชกรรมและงานคุ้มครองผู้บริโภคด้านสุขภาพ	4.17	0.55	มาก
8. ด้านระบบป้องกันและควบคุมการติดเชื้อ	4.34	0.56	มาก

5. ความรอบรู้ด้านดิจิทัลและองค์กรแห่งการเรียนรู้ที่มีความสัมพันธ์กับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี

ผลการศึกษา พบว่า ภาพรวมความรอบรู้ด้านดิจิทัล มีความสัมพันธ์ระดับปานกลางกับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($r=0.490$, p-value<0.001) เมื่อพิจารณาความรอบรู้ด้านดิจิทัลรายด้าน พบว่า ทุกด้านด้านมีความสัมพันธ์ระดับปานกลางกับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าภาพรวมองค์กรแห่งการเรียนรู้ มีความสัมพันธ์ระดับปานกลางกับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($r=0.695$, p-value<0.001) เมื่อพิจารณาองค์กรแห่งการเรียนรู้รายด้าน พบว่า ทุกด้านด้านมีความสัมพันธ์ระดับปานกลางกับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ดังตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน ระหว่างความรอบรู้ด้านดิจิทัลและองค์กรแห่งการเรียนรู้กับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี

ความรอบรู้ด้านดิจิทัล และองค์กรแห่งการเรียนรู้	การพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี			
	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (r)	95% CI	P-value	ระดับความสัมพันธ์
ความรอบรู้ด้านดิจิทัล	**0.490*** **	**0.348 to 0.627**	**<0.001**	**ปานกลาง**
1. การเข้าใจดิจิทัล	0.377***	0.247 to 0.503	<0.001	ปานกลาง
2. การใช้ดิจิทัล	0.405***	0.241 to 0.552	<0.001	ปานกลาง
3. การแก้ปัญหาด้วยเครื่องมือดิจิทัล	0.385***	0.249 to 0.506	<0.001	ปานกลาง
4. การปรับตัวสู่การเปลี่ยนแปลงดิจิทัล	0.443***	0.288 to 0.585	<0.001	ปานกลาง
ภาพรวมองค์กรแห่งการเรียนรู้	**0.695*** **	**0.610 to 0.777**	**<0.001**	**ปานกลาง**
1. การเป็นบุคคลรอบรู้	0.574***	0.436 to 0.690	<0.001	ปานกลาง
2. การมีแบบแผนความคิด	0.551***	0.419 to 0.669	<0.001	ปานกลาง
3. การมีวิสัยทัศน์ร่วมกัน	0.570***	0.437 to 0.689	<0.001	ปานกลาง
4. การเรียนรู้ร่วมกันเป็นทีม	0.568***	0.431 to 0.695	<0.001	ปานกลาง
5. การคิดอย่างเป็นระบบ	0.665***	0.565 to 0.761	<0.001	ปานกลาง

*** Correlation is significant at the <0.001 level

6. ความรอบรู้ด้านดิจิทัลและองค์กรแห่งการเรียนรู้ที่มีผลต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้น ในกรณีที่ใช้สถิติวิเคราะห์ข้อมูลถดถอยพหุเชิงเส้นแบบขั้นตอน ดังนี้ 1) ค่าคลาดเคลื่อน (e) มีการแจกแจงแบบปกติ ทดสอบโดย Kolmogorov-Smirnov (p-value = 0.056) 2) ทดสอบโดยใช้สถิติ t-test พบว่า ค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อน (e) เท่ากับ 0 3) ทดสอบโดยการทำ Scatter plot พบว่าการกระจายของค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในลักษณะคงที่ 4) ค่า Durbin-Wastson พบว่ามีค่า 1.801 และ 5) ค่าแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายของตัวแปรทุกตัวแปรมีค่าคงที่ ค่าความคลาดเคลื่อนมีอิสระต่อกัน โดยการทดสอบไม่พบความสัมพันธ์พหุร่วมเชิงเส้น (Tolerance = 0.353 – 0.374, Variance Inflation Factor: VIF = 2.603 – 2.756)

ผลการศึกษา พบว่า ตัวแปรอิสระที่มีผลต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี ที่ถูกเลือกเข้าสมการคือตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และตัวแปรอิสระที่ไม่ได้ถูกเลือกเข้าสมการคือตัวแปรที่มีค่านัยสำคัญทางสถิติมากกว่า 0.05 โดยตัวแปรที่ถูกเลือกเข้าในสมการเรียงลำดับ ดังนี้ องค์กรแห่งการเรียนรู้ด้านการคิดอย่างเป็นระบบ (R^2 = 0.442, p-value <0.001) ความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการเข้าใจดิจิทัล (R^2 = 0.040, p-value=0.020) องค์กรแห่งการเรียนรู้ด้านการเรียนรู้ร่วมกันเป็นทีม (R^2 = 0.030, p-value=0.001) และความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการใช้ดิจิทัล (R^2 = 0.019, p-value=0.022) จึงกล่าวได้ว่า ตัวแปรอิสระ ทั้ง 4 ตัว สามารถร่วมกันในการพยากรณ์และมีผลต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี ได้ร้อยละ 53.1 (R^2 = 0.531, p-value<0.001) โดยสามารถ

กำหนดเป็นสมการถดถอยพหุเชิงเส้นตรง ซึ่งเป็นสมการทำนายในรูปคะแนนดิบ แทนค่าในสมการได้ ดังนี้ Y = 0.788 + (0.294) (องค์กรแห่งการเรียนรู้ด้านการคิดอย่างเป็นระบบ) + (0.142) (ความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการเข้าใจดิจิทัล) + (0.202) (องค์กรแห่งการเรียนรู้ด้านการเรียนรู้ร่วมกันเป็นทีม) + (0.167) (ความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการใช้ดิจิทัล)

ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อควบคุมตัวแปรอื่นๆ ให้คงที่แล้ว คะแนนของตัวแปรองค์กรแห่งการเรียนรู้ด้านการคิดอย่างเป็นระบบ ความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการเข้าใจดิจิทัล องค์กรแห่งการเรียนรู้ด้านการเรียนรู้ร่วมกันเป็นทีม และความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการใช้ดิจิทัล เพิ่มขึ้น 1 หน่วย จะทำให้คะแนนการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี เพิ่มขึ้น 0.294, 0.142, 0.202 และ 0.167 หน่วย ตามลำดับ โดยมีค่าคงที่ของสมการทำนาย เท่ากับ 0.788 ซึ่งตัวแปรแปรทั้ง 4 ตัว สามารถร่วมกันในการพยากรณ์และมีผลต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี ได้ร้อยละ 53.1 (R^2 = 0.531, p-value<0.001) (ดังตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 ค่าสถิติวิเคราะห์การถดถอยพหุเชิงเส้นแบบขั้นตอนของการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี

ตัวแปร	B	95% CI		Beta	T	p-value	R	R^2	R^2 adj	R^2 change
		Lower	Upper							
1. องค์กรแห่งการเรียนรู้ด้านการคิดอย่างเป็นระบบ	0.294	0.170	0.417	0.399	4.693	<0.001	0.665	0.442	0.438	-
2. ความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการเข้าใจดิจิทัล	0.142	0.017	0.301	0.125	1.765	0.020	0.649	0.482	0.474	0.040
3. องค์กรแห่งการเรียนรู้ด้านการเรียนรู้ร่วมกันเป็นทีม	0.202	0.080	0.325	0.264	3.270	0.001	0.715	0.512	0.500	0.030
4. ความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการใช้ดิจิทัล	0.167	0.024	0.309	0.170	2.310	0.022	0.729	0.531	0.516	0.019
ค่าคงที่ 0.788, F = 36.505, p-value<0.001, R = 0.769, **R^2 = 0.531**, R^2 adj = 0.516										

7. ปัญหา อุปสรรค และข้อเสนอแนะ ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี

ปัญหา อุปสรรคและข้อเสนอแนะ ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี จากแบบสอบถามทั้งหมด 134 ฉบับ พบว่า กลุ่มตัวอย่างได้เสนอปัญหาอุปสรรคและข้อเสนอแนะทั้งหมด 42 ฉบับ (31.34%) โดยปัญหา อุปสรรคและข้อเสนอแนะรายตัวแปร มีดังนี้ ความรอบรู้ด้านดิจิทัล คือ ด้านการเข้าใจดิจิทัล (54.76%) พบว่า เจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลบางส่วนยังขาดความเข้าใจด้านดิจิทัลในการใช้ระบบสารสนเทศสุขภาพ การวิเคราะห์ข้อมูล และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในการพัฒนางาน ส่งผลให้การดำเนินงานตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิขาดประสิทธิภาพและความต่อเนื่อง ดังนั้นควรส่งเสริมการพัฒนาทักษะการเข้าใจดิจิทัลผ่านการอบรม การนิเทศติดตาม และการเรียนรู้จากการปฏิบัติงานจริง เพื่อเพิ่มศักยภาพในการใช้ข้อมูลและเทคโนโลยีในการพัฒนาคุณภาพบริการสุขภาพปฐมภูมิอย่างมีประสิทธิภาพ องค์กรแห่งการเรียนรู้

ด้านการคิดอย่างเป็นระบบ (47.61%) พบว่า เจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลบางส่วนยังขาดทักษะการคิดอย่างเป็นระบบในการวิเคราะห์ปัญหา เชื่อมโยงข้อมูล และวางแผนพัฒนางานตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิ ส่งผลให้การดำเนินงานบางด้านขาดความต่อเนื่องและไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างครอบคลุม ดังนั้นองค์กรควรส่งเสริมกระบวนการเรียนรู้ร่วมกัน การวิเคราะห์ปัญหาเชิงระบบ และการแลกเปลี่ยนประสบการณ์ในการพัฒนางาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการพัฒนาคุณภาพบริการสุขภาพปฐมภูมิ และยังพบว่าตัวแปรการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี คือ ด้านระบบป้องกันและควบคุมการติดเชื้อ (80.95%) ยังพบข้อจำกัดด้านบุคลากร วัสดุอุปกรณ์ และการปฏิบัติตามมาตรฐานการป้องกันการติดเชื้ออย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้บางหน่วยบริการยังมีความเสี่ยงต่อการแพร่กระจายเชื้อในสถานบริการสุขภาพ ดังนั้นควรส่งเสริมการพัฒนาความรู้และทักษะด้านการป้องกันและควบคุมการติดเชื้อ การนิเทศติดตามอย่างสม่ำเสมอ รวมถึงการสนับสนุนทรัพยากรที่เพียงพอเพื่อยกระดับคุณภาพและความปลอดภัยของบริการสุขภาพปฐมภูมิให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด รองลงมาคือ ด้านระบบบริหารจัดการ (71.42%) ยังพบข้อจำกัดด้านการวางแผนงาน การบริหารทรัพยากร และการติดตามประเมินผลการดำเนินงานอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้การดำเนินงานบางด้านไม่เป็นไปตามเป้าหมายและขาดความต่อเนื่อง ดังนั้นควรพัฒนาศักยภาพบุคลากรด้านการบริหารจัดการ การใช้ข้อมูลสารสนเทศเพื่อการตัดสินใจ และการมีส่วนร่วมของทีมสุขภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและยกระดับคุณภาพบริการสุขภาพปฐมภูมิ

สรุปและอภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์ การวิเคราะห์การถดถอยพหุเชิงเส้นแบบขั้นตอน พบว่า ตัวแปรอิสระที่มีผลต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี ซึ่งสามารถอภิปรายผลการวิจัย โดยเรียงลำดับตัวแปรที่ถูกเลือกเข้าสมการได้ ดังนี้

องค์กรแห่งการเรียนรู้ด้านการคิดอย่างเป็นระบบ ผลการศึกษาพบว่ามีความสัมพันธ์ต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี ทั้งนี้เนื่องจากเป็นกระบวนการสำคัญที่ช่วยให้บุคลากรสามารถวิเคราะห์ปัญหา เชื่อมโยงปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และวางแผนพัฒนางานอย่างเป็นองค์รวม ส่งผลให้การดำเนินงานตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิมีความต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Peter M. Senge [13] ที่อธิบายว่าการคิดอย่างเป็นระบบเป็นหัวใจสำคัญขององค์กรแห่งการเรียนรู้ ช่วยให้องค์กรสามารถมองเห็นความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ และปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ผลการศึกษายังสอดคล้องกับการศึกษาที่พบว่า องค์กรแห่งการเรียนรู้ด้านการคิดอย่างเป็นระบบมีผลต่อการพัฒนาคุณภาพและมาตรฐานการบริการสุขภาพปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่ในหน่วยบริการสาธารณสุข [7, 21] อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของบริบทเชิงพื้นที่ โครงสร้างการบริหาร และนโยบายด้านสุขภาพในแต่ละเขตสุขภาพ อาจส่งผลให้ระดับการพัฒนาองค์กรแห่งการเรียนรู้และผลลัพธ์ของการดำเนินงานแตกต่างกัน

ความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการเข้าใจดิจิทัล ผลการศึกษาพบว่ามีความสัมพันธ์ต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี ทั้งนี้เนื่องจากเป็นทักษะพื้นฐานสำคัญที่ช่วยให้บุคลากรสามารถเข้าถึง วิเคราะห์ ตีความ และประยุกต์ใช้ข้อมูลสารสนเทศและเทคโนโลยีดิจิทัลในการปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม ส่งผลให้การดำเนินงานตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะด้านการจัดเก็บข้อมูลสุขภาพ การรายงานข้อมูล การใช้ระบบสารสนเทศสุขภาพ และการติดตามประเมินผลคุณภาพบริการ ซึ่งล้วนเป็นองค์ประกอบสำคัญของการพัฒนาระบบบริการสุขภาพปฐมภูมิในยุคดิจิทัล [22] นอกจากนี้ผลการศึกษายังสอดคล้องกับการศึกษาที่พบว่า ความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการเข้าใจดิจิทัล มีผลต่อการพัฒนา

คุณภาพและมาตรฐานการบริการสุขภาพปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่ในหน่วยบริการสาธารณสุข [11, 23] อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของบริบทเชิงพื้นที่ โครงสร้างการบริหาร และนโยบายด้านสุขภาพในแต่ละเขตสุขภาพ อาจส่งผลให้ระดับการพัฒนาความรอบรู้ด้านดิจิทัลและผลลัพธ์ของการดำเนินงานแตกต่างกัน

องค์กรแห่งการเรียนรู้ด้านการเรียนรู้ร่วมกันเป็นทีม ผลการศึกษาพบว่ามีความสัมพันธ์ต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี ทั้งนี้เนื่องจากการเรียนรู้ร่วมกันเป็นทีมช่วยส่งเสริมให้บุคลากรเกิดการแลกเปลี่ยนความรู้ ประสบการณ์ และแนวทางการปฏิบัติงานร่วมกัน ทำให้สามารถแก้ไขปัญหา พัฒนาระบบบริการ และดำเนินงานตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะการดำเนินงานที่ต้องอาศัยความร่วมมือของทีมสหวิชาชีพ [13] Peter M. Senge อธิบายว่าการเรียนรู้ร่วมกันเป็นทีม เป็นองค์ประกอบสำคัญขององค์กรแห่งการเรียนรู้ ช่วยให้บุคลากรเกิดการพัฒนาศักยภาพและสามารถปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์กรได้อย่างเหมาะสม ซึ่งผลการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีผู้ที่ศึกษาไว้แล้ว พบว่าการเรียนรู้ร่วมกันเป็นทีมในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในหน่วยบริการสาธารณสุข มีความสัมพันธ์ต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิ [24-25]

ความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการใช้ดิจิทัล ผลการศึกษาพบว่ามีความสัมพันธ์ต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี ทั้งนี้เนื่องจากเป็นทักษะสำคัญที่ช่วยให้บุคลากรสามารถนำเทคโนโลยีสารสนเทศและระบบดิจิทัลมาประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงาน การจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลสุขภาพ การสื่อสารภายในทีมสุขภาพ ตลอดจนการติดตามประเมินผลการดำเนินงานตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ [22] ซึ่งผลการศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีผู้ศึกษาไว้แล้ว พบว่า ความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการใช้ดิจิทัลของเจ้าหน้าที่สาธารณสุข มีส่วนร่วมในการพยากรณ์และมีผลต่อการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ในหน่วยบริการสาธารณสุข [10, 11] ทั้งนี้ หากแต่ละพื้นที่มีบริบท นโยบายจากหน่วยงานมีความแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ อาจส่งผลให้ความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการใช้ดิจิทัล มีความแตกต่างกัน

โดยสรุปผลการวิจัย พบว่า ภาพรวมความรอบรู้ด้านดิจิทัลอยู่ในระดับมาก และมีความสัมพันธ์ในระดับปานกลางกับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี และพบว่า ภาพรวมองค์กรแห่งการเรียนรู้อยู่ในระดับมาก และมีความสัมพันธ์ในระดับปานกลางกับการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี นอกจากนี้ยังพบว่า ตัวแปรทั้ง 4 ตัว ประกอบด้วย องค์กรแห่งการเรียนรู้ด้านการคิดอย่างเป็นระบบ ความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการเข้าใจดิจิทัล องค์กรแห่งการเรียนรู้ด้านการเรียนรู้ร่วมกันเป็นทีม และความรอบรู้ด้านดิจิทัลด้านการใช้ดิจิทัล สามารถร่วมกันในการพยากรณ์และมีผลต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี ได้ร้อยละ 53.1 (R^2 = 0.531, p-value<0.001)

ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะจากการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงพรรณนาแบบภาคตัดขวาง ทำให้ไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์เชิงเหตุและผลของตัวแปรได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ข้อมูลได้จากผู้ตอบแบบสอบถามอาจมีอคติจากการรับรู้ส่วนบุคคล และกลุ่มตัวอย่างจำกัดอยู่ในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลจังหวัดอุดรธานี จึงอาจมีข้อจำกัดในการนำผลการวิจัยไปอ้างอิงหรือขยายผลในบริบทพื้นที่อื่น

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

สำนักงานสาธารณสุขจังหวัด สำนักงานสาธารณสุขอำเภอ โรงพยาบาลส่งเสริมสุขสภาพตำบล ในจังหวัดอุดรธานี ควรดำเนินการ ดังนี้

1. ควรส่งเสริมให้บุคลากรมีการวิเคราะห์ปัญหาและวางแผนพัฒนางานอย่างเป็นระบบ โดยใช้ข้อมูลสารสนเทศและการมีส่วนร่วมของทีมสุขภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการพัฒนาคุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิ
2. ควรพัฒนาทักษะการเข้าใจข้อมูลดิจิทัลและระบบสารสนเทศสุขภาพของบุคลากร เพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการตัดสินใจและพัฒนาคุณภาพบริการสุขภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. ควรสนับสนุนกิจกรรมการแลกเปลี่ยนเรียนรู้และการทำงานร่วมกันของทีมสหวิชาชีพ เพื่อส่งเสริมการพัฒนาคุณภาพบริการและการแก้ไขปัญหาในหน่วยบริการอย่างต่อเนื่อง
4. ควรส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีดิจิทัลและระบบสารสนเทศในการปฏิบัติงานและการติดตามประเมินผล เพื่อเพิ่มความรวดเร็ว ถูกต้อง และประสิทธิภาพในการดำเนินงานตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิ

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรมีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการคิดอย่างเป็นระบบของเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล
2. ควรมีควรศึกษาปัจจัยด้านอื่นเพิ่มเติม เช่น ภาวะผู้นำองค์กร วัฒนธรรมองค์กร แรงจูงใจในการปฏิบัติงาน หรือสมรรถนะด้านนวัตกรรม ที่อาจส่งผลต่อการพัฒนาตามเกณฑ์คุณภาพเครือข่ายบริการปฐมภูมิของโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล

เอกสารอ้างอิง

1. World Health Organization. A vision for primary health care in the 21st century: Towards universal health coverage and the Sustainable Development Goals [Internet]. Geneva: WHO; 2018 [cited 2025 Der[HH22.1] 15]. Available from: https://www.who.int/publications/i/item/WHO-HIS-SDS-2018.15
2. ยงยุทธ ภู่ประดับกฤต. กฎหมายการแพทย์และสาธารณสุข คำอธิบายกฎหมายว่าด้วยระบบสุขภาพปฐมภูมิ. นนทบุรี: สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข กระทรวงสาธารณสุข; 2565.
3. สำนักสนับสนุนระบบสุขภาพปฐมภูมิ. รายงานความก้าวหน้าการพัฒนาระบบสุขภาพปฐมภูมิ ปี 2565. นนทบุรี: กระทรวงสาธารณสุข; 2565.
4. กองสนับสนุนระบบสุขภาพปฐมภูมิ กระทรวงสาธารณสุข. คู่มือมาตรฐานหน่วยบริการปฐมภูมิ พ.ศ. 2568–2570. นนทบุรี: กระทรวงสาธารณสุข; 2568.
5. เทพฤทธิ์ ฤทธิ์ไธสง, นพรัตน์ เสนาฮาด. สมรรถนะในศตวรรษที่ 21 และภาวะผู้นำการเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อ การพัฒนาคุณภาพมาตรฐานบริการสุขภาพปฐมภูมิ ของผู้อำนวยการ โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลจังหวัดชัยภูมิ. วารสารศูนย์อนามัยที่ 10 อุบลราชธานี [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [อ้างถึง 16 มีนาคม 2569]; 13(2): 74-89. Available from: https://he03.tci-thaijo.org/index.php/HPC10Journal/article/view/4328

6. สุภาภรณ์ เลี้ยงอำนวย. การพัฒนารูปแบบการเสริมพลังอำนาจเพื่อเพิ่มศักยภาพในการ บริหารจัดการการพัฒนาคุณภาพมาตรฐานบริการสุขภาพปฐมภูมิของผู้อำนวยการโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลในเขตจังหวัดนครปฐม. วารสารแพทย์ เขต 4-5 [อินเทอร์เน็ต]. 2567 [อ้างถึง 16 มีนาคม 2569]; 43(4): 591-607. https://he02.tci-thaijo.org/index.php/reg45/article/view/272888
7. ศศิธร นิลหมื่นไวย์, นครินทร์ ประสิทธิ์, พีรยุทธ แสงตรีสุ, ภูวนาถ ศรีสุธรรม, สุพัฒน์ กองศรีมา, พิทยา ธรรมวงศา. ความฉลาดองค์รวมและองค์กรแห่งการเรียนรู้ที่มีผลต่อการพัฒนาคุณภาพมาตรฐานบริการสุขภาพปฐมภูมิของผู้อำนวยการโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดอุดรธานี. วารสารวิทยาศาสตร์สุขภาพแห่งประเทศไทย [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [อ้างถึง 16 มีนาคม 2569]; 7(2): 51-59. Available from: https://he02.tci-thaijo.org/index.php/HSJT/article/view/272236
8. World Health Organization. Global strategy on digital health 2020–2025 [Internet]. Geneva: WHO; 2021 [cited 2026 May 15]. Available from: https://www.who.int/publications/i/item/9789240020924
9. Ministry of Digital Economy and Society. Summary of the survey on media and information literacy status in Thailand 2019. Bangkok: Office of the National Digital Economy and Society Commission; 2019.
10. ศุภรัตน์ ชินวัฒน์โสภณ, วิยดา ใจแก้ว, จิรวุฒิ คงคา, ณฐกร นิลเนตร, พัชนา เฮ้งบริบูรณ์พงศ์ ใจดี. ความรอบรู้ด้านสุขภาพดิจิทัลของนักสาธารณสุขที่ปฏิบัติงานในระบบบริการสุขภาพ. วารสารสุขภาพและสิ่งแวดล้อมศึกษา [อินเทอร์เน็ต]. 2567 [อ้างถึง 16 มีนาคม 2569]; 9(1): 63-70. Available from: https://so06.tci-thaijo.org/index.php/hej/article/view/269647
11. เอื้องพร พิทักษ์สังข์, เจียมรัตน์ โพธิ์เย็น, จันทนา นามเทพ, ราตรี ฉิมฉลอง, ธนวัฒน์ ปัญญาวงค์, วัฒนพรรณ ฤกษ์มงคล, ศิริพร เลาหสุวรรณพานิช. ทักษะความเข้าใจและใช้เทคโนโลยีดิจิทัลของพยาบาลที่ปฏิบัติงานโรงพยาบาลสังกัดมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่ง. วารสารสภาการพยาบาล [อินเทอร์เน็ต]. 2566 [อ้างถึง 16 มีนาคม 2569]; 38(02): 38-44. Available from: https://he02.tci-thaijo.org/index.php/TJONC/article/view/261436
12. ชื่นจิตร จันทร์สว่าง, สุนทรี เจียรวิทยกิจ. ความสัมพันธ์ระหว่างความรอบรู้ด้านสุขภาพ ความรอบรู้ด้านสุขภาพด้วยเทคโนโลยีดิจิทัลและพฤติกรรมสุขภาพของนักศึกษาพยาบาลปริญญาตรี. วารสารวิจัยและนวัตกรรมทางการพยาบาล [อินเทอร์เน็ต]. 2566 [อ้างถึง 16 มีนาคม 2569]; 29(2): 251-264. Available from: https://he02.tci-thaijo.org/index.php/RNJ/article/view/262409
13. Senge PM. The fifth discipline: The art and practice of the learning organization. New York: Currency Doubleday; 1990.
14. ปราณี มีหาญพงษ์, จันทร์จิรา วงษ์ขมทอง, สุนีย์รัตน์ บุญศิลป์, เนตรชนก ศรีทุมมา. รูปแบบความสัมพันธ์เชิงสาเหตุของภาวะผู้นำการเปลี่ยนแปลง องค์กรแห่งการเรียนรู้ คุณภาพชีวิตการทำงานกับผลการดำเนินงานของหอผู้ป่วยโรงพยาบาลทั่วไป สังกัดกระทรวงสาธารณสุข. วารสารพยาบาลกระทรวงสาธารณสุข [อินเทอร์เน็ต]. 2562 [อ้างถึง 16 มีนาคม 2569]; 29(1): 111-124. Available from: https://he02.tci-thaijo.org/index.php/tnaph/article/view/189138

15. โศรตรีย์ แพน้อย, อติญาณ์ ศรเกษตริน, ชุลีพร เอกรัตน์. ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการดำเนินงานของหน่วยบริการปฐมภูมิตามมาตรฐานศูนย์สุขภาพชุมชนของสาธารณสุขเขต 6. วารสารพยาบาลกระทรวงสาธารณสุข (2556) [อ้างถึง 16 มีนาคม 2569]; 22(2): 64-67. Available from: https://he02.tci-thaijo.org/index.php/tnaph/article/view/4793
16. Udon Thani Provincial Public Health Office. Basic information summary 2025. Udon Thani: Udon Thani Provincial Public Health Office; 2025. [cited 2026 May 15]. Available from: https://udpho.moph.go.th/
17. Cohen J. Statistical power analysis for the behavior sciences. 2nd ed. Hillsdale NJ: Lawrence Erlbaum; 1988.
18. Ferreira JC, Patino CM. Loss to follow-up and missing data: important issues that can affect your study results. J Bras Pneumol. 2019; 45(2): e20190091. https://doi.org/10.1590/1806-3713/e20190091
19. Chantrasuwan S, Buatuan S. Social sciences research methodology. Khon Kaen: Department of Sociology and Anthropology, Faculty of Humanities and Social Sciences, Khon Kaen University; 2004.
20. Elifson KW, Runyon RP, Haber A. Fundamentals of social statistics. 2nd ed. New York: McGraw-Hill; 1990.
21. อังคณา ภิโสรมย์, ศศิธร ธนะภพ. การรับรู้การเป็นองค์กรแห่งการเรียนรู้ของบุคลากรโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดชุมพร. วารสารสาธารณสุขมหาวิทยาลัยบูรพา [อินเทอร์เน็ต]. 2561 [อ้างถึง 16 มีนาคม 2569]; 13(2): 16-27. Available from: https://he02.tci-thaijo.org/index.php/phjbuu/article/view/110156/108690
22. Ministry of Digital Economy and Society. Summary of the survey on media and information literacy status in Thailand 2019. Bangkok: Office of the National Digital Economy and Society Commission; 2019.
23. วัชรพงษ์ วัชรินทร์, นิพิฐพนธ์ แสนด้วง. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาพฤติกรรมการใช้อัตลักษณ์ทางดิจิทัลในการสนับสนุนการจัดบริการด้านสุขภาพ ของบุคลากรสาธารณสุขในพื้นที่จังหวัดแพร่. วารสารสาธารณสุขแพร่เพื่อการพัฒนา [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [อ้างถึง 16 มีนาคม 2569]; 4(2): 70-83. Available from: https://thaidj.org/index.php/jpphd/article/view/16089
24. กิตติภพ บุญเอก, ประจักร บัวผัน, สุรชัย พิมหา. การสนับสนุนจากองค์การและสุนทรียทักษะภาวะผู้นำที่มีผลต่อบทบาทในการควบคุมกำกับของผู้อำนวยการโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล ในจังหวัดขอนแก่น. วารสารสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดขอนแก่น [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [อ้างถึง 16 มีนาคม 2569]; 7(2): e274266. Available from: https://he02.tci-thaijo.org/index.php/jkkpho/article/view/274266/187439
25. ณัฐพร นิจธรรมสกุล, ประจักร บัวผัน, นครินทร์ ประสิทธิ์. สุนทรียทักษะภาวะผู้นำและปัจจัยแห่งความสำเร็จที่มีผลต่อการมีส่วนร่วมในการจัดทำแผนยุทธศาสตร์สาธารณสุขของผู้อำนวยการโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล จังหวัดสกลนคร. วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา) [อินเทอร์เน็ต]. 2567 [อ้างถึง 16 มีนาคม 2569]; 24(4): 133-147. Available from: https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/gskku/article/view/252815

Research Article

Design and Development of a Batter Mixing Machine for Khanom La to Preserve Local Wisdom and Enhance Community Sustainability

Choemsak Chuaidon[1], Natthaphong Nakkhwan[1], Thanatpon Rodphunchoo[1], Pongpun Ratchapakdee[1], Sermsak Kerdwan[1], Sutaporn Getpun[1], Rungrote Jeendoung[1] and Banthita Poosabmee Ponatong[1*]

[1]*Department of Technology, faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Thailand*

[*]Corresponding author; email: Banthita.p@rmutsv.ac.th

Date Received	Date Revised	Date Accepted
May 15, 2026	June 9, 2026	June 9, 2026

Abstract

This research aimed to design and develop a batter mixing machine for Khanom La production in order to reduce the time required for batter preparation, while preserving local wisdom and supporting sustainable community development. The designed machine consists of four main components: the machine frame, the power transmission system, the stirring unit, and the automatic timer control system. The paddle stirrer was selected because it is suitable for low-speed mixing. Open spaces were incorporated into the stirrer design to reduce batter viscosity during the mixing process. The study then compared the mixing time and mixing capacity of manual labor with those of the developed batter mixing machine based on three repeated trials. Manual mixing required an average of 40.00 minutes to mix 10 kilograms of batter, resulting in an average mixing capacity of 15.15 kilograms per hour. In contrast, the developed machine took an average of 13.33 minutes, with an average mixing capacity of 46.06 kilograms per hour. The difference in mixing capacity between manual labor and the machine was analyzed using a Independent Samples t-test at a significance level of 0.05. The results showed a p-value of 0.014, which was lower than the significance level of 0.05, indicating a significant difference between the two methods. The findings demonstrate that the batter mixing machine operated 3.04 times faster than manual labor at the 0.05 significance level, which reduced the production time of Khanom La for the community.

Keywords: Batter Mixing Machine, Khanom La, Paddle Stirrer, Local Wisdom Preservation

Introduction

The Tenth Lunar Month Festival (or Sart Duean Sip) is a long-standing cultural tradition in southern Thailand, particularly in Nakhon Si Thammarat Province, where cultural heritage has been continuously preserved and passed down through generations. One important practice during the festival is the preparation of traditional desserts known as “Mmu Rub.” Popular items included in the Mmu Rub are Khanom La, Khanom Pong, Khanom Dee Sum, Khanom Ba, and Khanom Kong. These traditional desserts reflect local wisdom and also serve as a form of soft power that adds economic value through the promotion of long-held cultural beliefs and regional identity. Each dessert carries its own symbolic meaning. Khanom La represents clothing and textiles offered to ancestors, Khanom Pong symbolizes rafts or boats used by ancestors to cross the great ocean, Khanom Dee Sum represents money for daily use, Khanom Ba symbolizes the traditional game balls used during the Songkran festival, and Khanom Kong represents decorative jewelry and ornaments for the body [1].

Khanom La is one of the traditional desserts prepared for the Tenth Lunar Month Festival. One of the most well-known production areas is Ban Hoi Rak Community. At present, the community has approximately 15–20 groups that produce Khanom La. Each package is sold for around 30–50 baht, while La sheets are priced at approximately 120 baht per kilogram, depending on size and quality. The production of Khanom La generates an average monthly income of 15,000–30,000 baht per household. As a result, Khanom La production has become both a primary occupation and an important source of income for the Ban Hoi Rak Community. The production process begins with raw material preparation. Fine and clean rice flour is selected and mixed with palm sugar and water in appropriate proportions. Rice grains are then soaked in water for approximately 3–4 days until softened. After that, the soaked rice is processed in a grinding machine to produce rice batter. The batter is filtered through a thin white cloth to obtain a smooth texture. Once the batter settles, it is wrapped in cheesecloth and pressed to remove excess moisture. The dried flour is then transferred to a mixing machine, where honey is added to improve the flavor. Before the batter can be used, it must be stirred thoroughly each time to prevent the ingredients from separating or forming lumps. This process takes approximately 40 minutes per cycle before the batter is further processed into Khanom La.



Figure 1 Traditional Khanom La batter mixing by manual labor

Based on the production conditions of Khanom La in Ban Hoi Rak Community, manual batter mixing has been identified as a key issue affecting both production efficiency and the quality of life of producers. Hand

mixing requires considerable physical effort and takes a long continuous period of about 40 minutes per 10 kilograms of batter. The daily production volume varies depending on customer demand, while orders increase significantly during the Tenth Lunar Month Festival. This leads to fatigue among producers, limits production capacity, and prevents them from meeting rising market demand. As a result, income opportunities are reduced. At present, there is also no suitable batter mixing machine for Khanom La production that fits the community context while maintaining product quality.

Improving production efficiency through the design of appropriate machinery can enhance productivity, reduce processing time, and help maintain product quality. In the industrial sector, [2] designed a solar-powered palm sugar stirring machine and compared it with manual labor, finding that the machine reduced stirring time by up to 58 percent compared with traditional methods and also helped reduce worker fatigue. [3] developed a gas-fired filling stirring machine for curry puff production in community settings, which reduced mixing time and manual labor requirements, improved ingredient homogeneity, increased production capacity, and generated higher income for farmer groups. [4] developed a fruit processing stirring machine suitable for elderly users in a community enterprise in Ban Pa Suan, which reduced the workforce by one person, eased physical effort, and shortened working time, leading to lower gas consumption and reduced operating costs per production cycle. [5] designed a rice mixing machine and tested optimal speed and mixing time, which increased production capacity at the same labor level and reduced electricity consumption. [6] developed a dough kneading machine for small and medium enterprises to improve production efficiency by applying a bidirectional rotational system along a single axis, achieving a kneading efficiency of 90.65 percent. Similarly, [7] designed a dough mixing machine for bread production capable of processing 31.90 kilograms per hour at 280 rpm, with an efficiency of 94.70 percent, taking into account the properties of mixed dough. [8] designed and simulated a dough mixing machine to reduce cost and processing time, using Fusion 360 software to analyze structural performance. In the chemical industry, [9] designed and constructed a mixing machine for cosmetic and cleaning products to control product quality and increase production capacity to meet market demand. The system used a paddle impeller and produced 57.85 liters per hour, increasing output by 64.36 percent with a payback period of 0.6 years. In the agricultural sector, [10] developed a semi-automatic chitosan mixing machine for community use, which received the highest level of user satisfaction in terms of usability and safety. The machine could process 20 liters in 2 hours, operate continuously for 6–8 hours per day, reduce production costs, and allow easy mobility and use. [11] designed a horizontal compost mixing machine using a rotating ribbon-type blade system to improve mixing efficiency in community fertilizer production. The evaluation of dispersion performance showed a coefficient of variation below 5 percent, with 1.74 percent at 3 minutes and 3.5 percent at 4 minutes. [12] also studied the efficiency of fertilizer mixing blades for farmers. Overall, improving production processes through machinery reduces labor requirements, lowers production costs, and decreases work-related fatigue. However, the mixing blades used in commercially available mixers may not suit Khanom La batter, as the batter has a high level of viscosity. The project team studied, researched, and developed a batter mixing machine for Khanom La production that is suitable for the Ban Hoi Rak community. The objective was to improve efficiency in the Khanom La production process and reduce the risk of injury among producers, which would lead to increased output, higher income, and a sustainable improvement in the quality of life of Khanom La producers in the community.

Objectives

1. To design and build a batter mixing machine for Khanom La production.
2. To study the efficiency of the batter mixing machine for Khanom La.
3. To support the preservation of local knowledge and enhance the community economy in a sustainable way.

Research conceptual framework

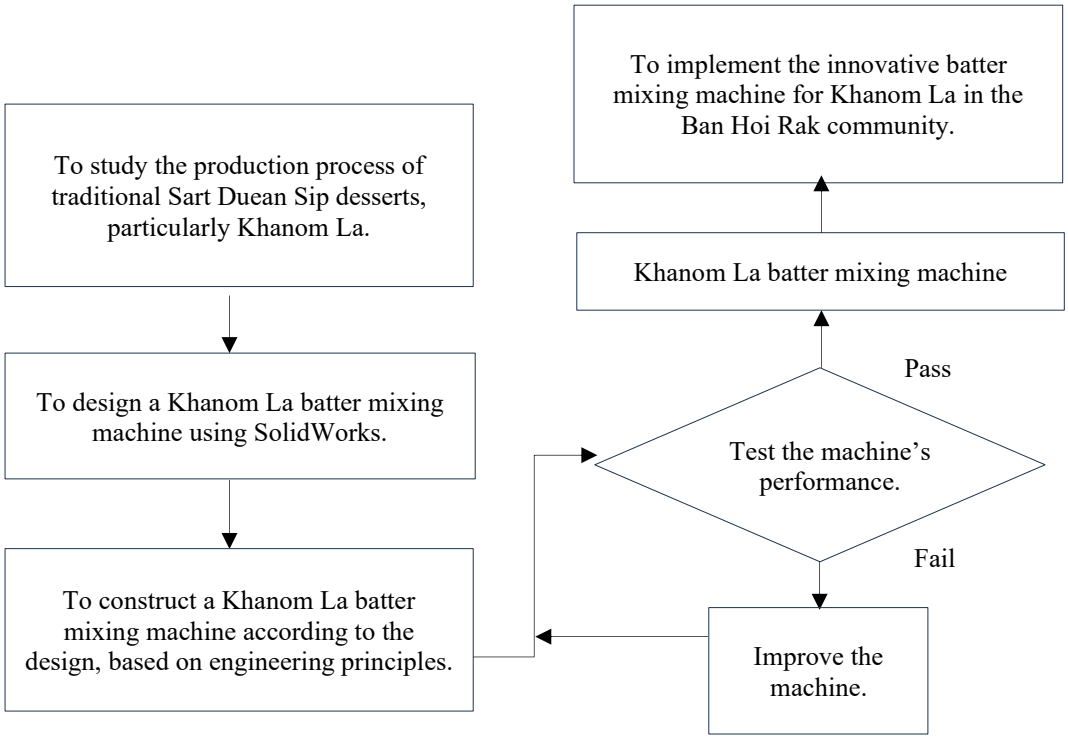


Figure 2 Conceptual framework of the research

Research methodology

1. Study relevant theories and research related to the chemical and food properties of flour, the production process of Khanom La batter, electric motors, stirring blades, and related studies.

2. Design a Khanom La batter mixing machine using SolidWorks software.

3. Plan the manufacturing steps of the Khanom La batter mixing machine using an operation process chart (OPC).

4. Construct the Khanom La batter mixing machine based on engineering principles.

5. Test the performance of the machine by measuring the mixing time for Khanom La batter in three trials, each using 10 kilograms of batter, and then calculate the mean and standard deviation of the mixing time.

6. Compare the mixing efficiency between manual labor and the machine using statistical analysis with Independent Samples t-test at a 0.05 level of significance.

7. Summarize the experimental results and submit them for innovation registration.

8. Transfer knowledge and provide instructions on how to use the Khanom La batter mixing machine to the Ban Hoi Rak community.

Results

1. Results from the design and construction of the Khanom La batter mixing machine

The Khanom La batter mixing machine was designed using software and then constructed based on engineering principles, as shown in Figure 3. The designed machine consists of four main components: the structural frame, the power and transmission system, the mixing blade assembly, and the automatic timing control unit. The details of the machine design are presented below.

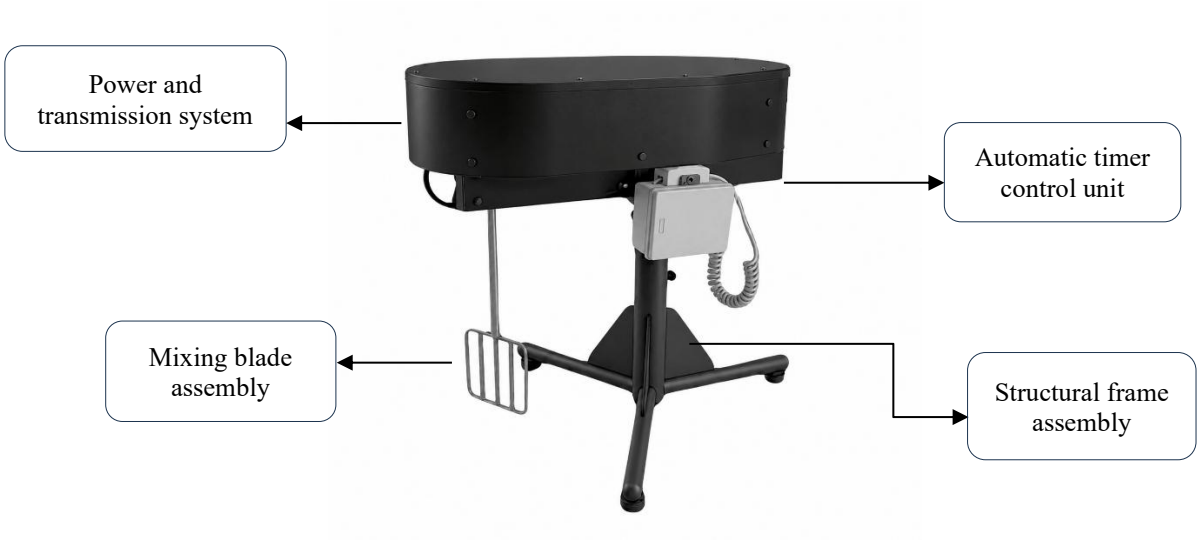


Figure 3 Khanom La batter mixing machine

The structural frame was designed using stainless steel. It has a height of 100 cm and a width of 86 cm. A single 70 cm round steel pipe was used and formed into the frame structure of the mixing machine.

The power unit serves as the energy source for the machine operation. It uses a 0.5 horsepower electric motor, and the rotational speed of the mixing blade can be calculated using Equation 1. A control box regulates the electrical voltage at 220 volts. The transmission system transfers power from the motor to the mixing shaft. Its main components include a belt, pulleys, a shaft, and pillow block bearings.

The mixing blade assembly was designed as a paddle stirrer, which is suitable for low-speed mixing. Gaps were added within the blade structure to reduce the viscosity of the batter and improve heat transfer during mixing. The blades were made from stainless steel 304 and ensured that the Khanom La batter mixed evenly throughout the process. The main component is the stirring shaft, which has a width of 20 cm and a length of 20 cm.

The automatic timer control unit regulates the operating time of the motor. Users can set the desired time, up to a maximum of 60 minutes. Once the system starts, the timer counts down and keeps the motor running continuously until the set time has elapsed. The system then automatically cuts off the power, stopping the motor. This helps ensure consistent mixing and reduces user error.

The rotational speed of the mixing blade assembly is calculated using Equation 1. The system uses a 0.5 horsepower motor with a speed of 1,450 rpm. The driving pulley had diameters of 2.0 inches (d_1) and 2.5 inches (d_3), while the driven pulley had diameters of 12.0 inches (d_2) and 12.0 inches (d_4). The speed of the driving pulley (n_1) is 1,450 rpm. The rotational speed of the mixing blade assembly (n_4) can then be determined, as illustrated in Figure 4.

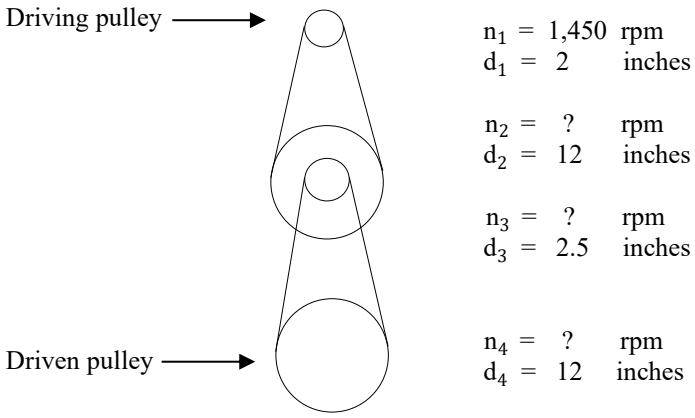


Figure 4 Calculation of the rotational speed of the mixing blade assembly

$$nd_{driving\ pulley} = nd_{\text{driven pulley}} \quad \text{... (1)}$$

Where:

$d_{1,3}$ = diameter of the driving pulley (inches)

$d_{2,4}$ = diameter of the driven pulley (inches)

n_1 = the speed motor of the driving pulley (revolutions per minute)

n_2 = the speed motor of the driven pulley (revolutions per minute)

n_3 = the speed mixing blades of the driving pulley (revolutions per minute)

n_4 = the speed mixing blades of the driven pulley (revolutions per minute)

Substituting the values:

$$n_1 d_1 = n_2 d_2$$
$$n_2 = \frac{n_1 d_1}{d_2}$$
$$n_2 = \frac{1450 \times 2}{12}$$
$$n_2 = 242 \text{ rpm}$$
$$n_3 d_3 = n_4 d_4$$
$$n_4 = \frac{n_3 d_3}{d_4}$$
$$n_4 = \frac{242 \times 2.5}{12}$$
$$n_4 = 50 \text{ rpm}$$

Therefore, the rotational speed mixing blades of the driven pulley (n_2) is 50 rpm, using a 0.5 horsepower motor.

2. Operation Process Chart (OPC) and Engineering Principles Applied in the Construction of a Khanom La Batter Mixing Machine

The operation process chart for the Khanom La batter mixing machine begins with defining the scope of the production process, from the design stage to the assembly of the machine structure. The process is then analyzed and divided into sequential operations, such as cutting, turning, welding, and assembly. Standard symbols are used to represent each type of activity, allowing the overall process to be presented clearly and supporting improvements in production efficiency. In addition, the chart assists in the systematic analysis of waste reduction and product quality enhancement, as shown in Figure 5.

3. Performance Evaluation Results of the Khanom La Batter Mixing Machine

The researchers evaluated the performance of the Khanom La batter mixing machine by examining the time required for batter mixing and comparing its mixing efficiency with manual labor. Electrical energy consumption was also taken into consideration during the evaluation.

3.1 Mixing Time and Performance of the Khanom La Batter Mixing Machine

The mixing time of Khanom La batter was tested using two methods: manual labor and the batter mixing machine developed through the design process. Each trial used 10 kilograms of batter and was conducted in three repetitions. The results were then analyzed to determine the mean and standard deviation, as presented in Table 1. After the design and development of the batter mixing machine, the operational procedure was carried out as outlined in the process chart.

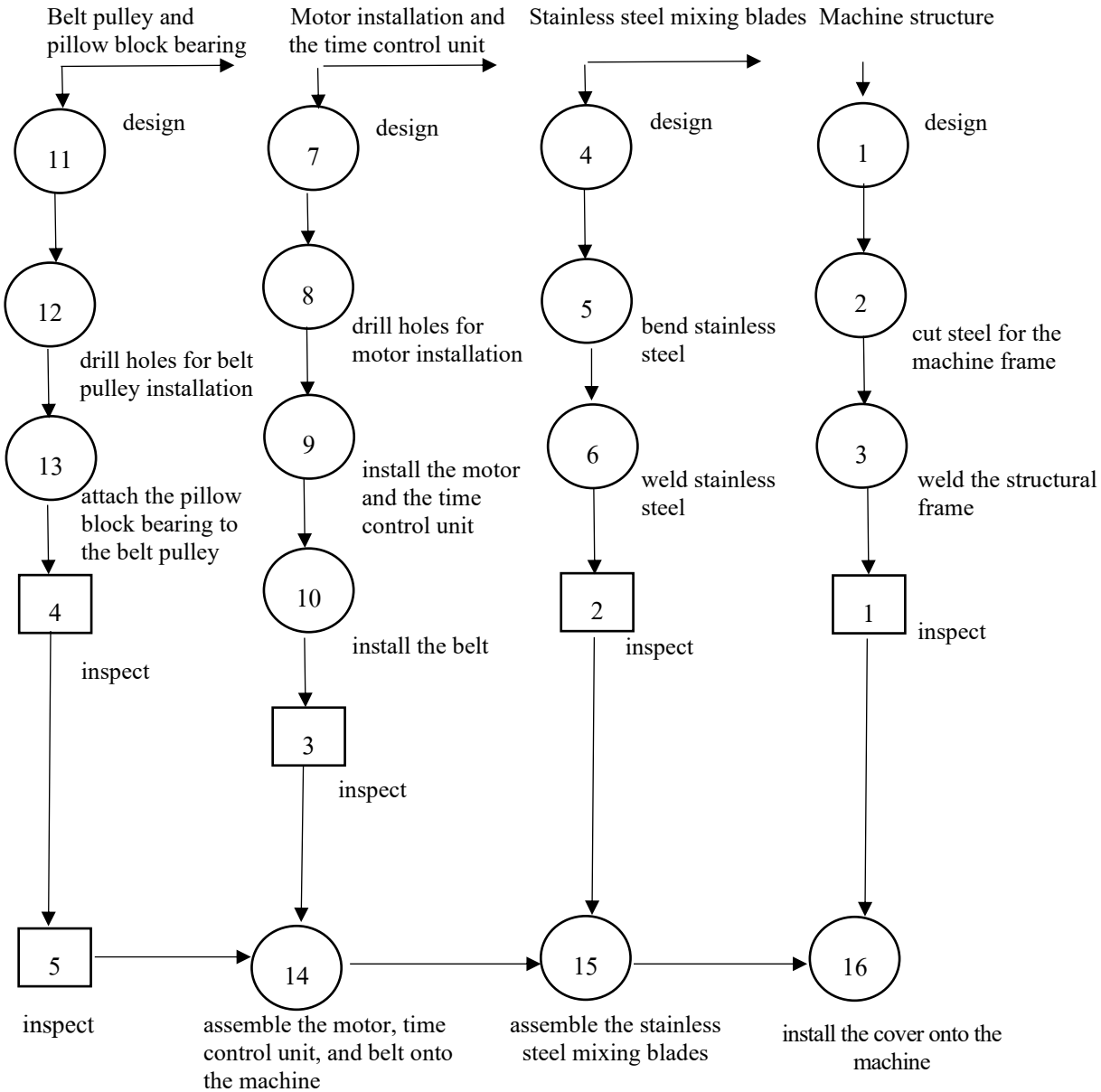


Figure 5 Operation Process Chart of the Khanom La Batter Mixing Machine

Kalasin University Journal of Science Technology and Innovation | 215
Volume: 5 Issue: 1 (January – June 2026)

Table 1 Mixing Time and Performance of the Khanom La Batter Mixing Process

Trial	Manual labor		Khanom La batter mixing machine	
	Mixing time (minutes)	Mixing capacity (kg/h)	Mixing time (minutes)	Mixing capacity (kg/h)
1	35.00	17.14	16.00	37.50
2	40.00	15.00	13.00	46.15
3	45.00	13.33	11.00	54.54
Mean	40.00	15.15	13.33	46.06

Based on Table 1, the mixing time and capacity of Khanom La batter were tested using two methods: manual labor and the designed batter mixing machine. For manual labor, the average time required to mix 10 kilograms of batter was 40.00 minutes, resulting in an average mixing capacity of 15.15 kg/h. In contrast, the designed machine took an average mixing time of 13.33 minutes, with an average capacity of 46.06 kg/h. The machine therefore operated 3.04 times faster than manual labor. The viscosity was then measured with a DV2T Brookfield viscometer, and it was found that the batter's viscosity decreased from 14,213 cP to 2,847 cP, which was within the acceptable range set by the community requirements. This improvement helps the Ban Hoi Rak community, Hu Long Subdistrict, Pak Phanang District, Nakhon Si Thammarat Province, reduce production time in Khanom La processing. The machine also provides continuous and consistent mixing, leading to better batter quality and a finer texture, while also contributing to energy savings in the production process.

3.2 Electrical Energy Consumption of the Khanom La Batter Mixing Machine

In applying the Khanom La batter mixing machine to the production process, the research team calculated its electrical energy consumption by considering the total power usage of all electrical components in the machine, which amounted to 379 watts. The calculation also used the average electricity tariff of the Provincial Electricity Authority, approximately 3.98 baht per unit. The results of the electrical energy consumption are presented in Table 2.

Table 2 Electrical Energy Consumption of the Khanom La Batter Mixing Machine

Trial	Mixing time		Electrical energy consumption	
	minutes	hour	baht per cycle	baht per hour
1	16.00	0.27	0.41	
2	13.00	0.22	0.33	1.51
3	11.00	0.18	0.27	
Mean	13.33	0.22	0.34	

According to Table 2, the electrical energy consumption of the Khanom La batter mixing machine shows that the amount of batter used depends on customer demand during each production period. For each mixing cycle using 10 kilograms of batter, the average electricity cost is 0.34 baht per cycle, equivalent to 1.51 baht per hour. The results indicate that the use of the Khanom La batter mixing machine can improve production speed while maintaining a low electricity cost of 1.51 baht per hour.

3.3 Analysis of Differences in Batter Mixing Performance

The comparison of batter mixing performance between the machine and manual labor was conducted using statistical analysis based on Independent Samples t-test at a significance level of 0.05, with the statistical software. The results are shown in Figure 6, and the hypotheses for testing differences in mixing performance are presented as follows.

$$H_0: \mu_p = \mu_m$$
$$H_1: \mu_p \neq \mu_m$$

Where: μ_p Mean mixing capacity using manual labor (kg/h)

μ_m Mean mixing capacity using the mixing machine (kg/h)

Independent Samples t-test: Person, Machine

Source	N	Mean	StDev	SE Mean
Person	3	40.00	5.00	2.90
Machine	3	13.33	2.52	1.50
T-Value	8.250			
P-Value	0.014			

Figure 6 Results of Statistical Analysis at a Significance Level of 0.05

As shown in Figure 6, the analysis of differences in mixing performance between the machine and manual labor was conducted using Independent Samples t-test at a significance level of 0.05. The results show a p-value of 0.014, which is lower than the significance level of 0.05. This indicates a statistically significant difference in mixing performance between the two methods, confirming that the mixing machine operates faster than manual labor at the 0.05 significance level.

Summary and Discussion of Research Findings

Ban Hoi Rak Community, Hu Long Subdistrict, Pak Phanang District, Nakhon Si Thammarat Province, is well known for producing Khanom La, a traditional dessert associated with the Sart Duean Sip festival. The production process relies heavily on manual labor, particularly during the batter mixing stage, which requires continuous stirring and considerable physical effort. This results in a long processing time and high labor demand. To address this issue, a Khanom La batter mixing machine was designed and developed. The machine reduces mixing time and produces a more consistent batter texture compared with manual mixing. This approach aligns with the concept of applying machinery in food production processes to improve efficiency and reduce production time [2] [3] [4] [5] [11]. The developed machine is capable of continuous and consistent mixing without the need for constant human labor. It shortens the mixing time, improves batter quality, and produces a finer texture. It also contributes to energy savings in the production process.

The Khanom La batter mixing machine consists of four main components: the machine frame, the power and transmission unit, the mixing blades, and the automatic time control unit. The results from testing the mixing time and capacity of Khanom La batter were compared between two methods: manual labor and the designed mixing machine. For manual labor, the average time required to mix 10 kilograms of batter was 40.00 minutes, resulting in an average

mixing capacity of 15.15 kg/h. In comparison, the designed machine required an average mixing time of 13.33 minutes, with an average capacity of 46.06 kg/h. The viscosity was then measured with a DV2T Brookfield viscometer, and it was found that the batter's viscosity decreased from 14,213 cP to 2,847 cP, which was within the acceptable range set by the community requirements. The average electrical energy cost was 0.34 baht per cycle, equivalent to 1.51 baht per hour. The results also show that the mixing machine operates 3.04 times faster than manual labor.

Research Recommendations

Future studies may place greater focus on energy consumption through the adoption of solar energy systems. This direction could also expand the scope of analysis to cover both economic and environmental impacts.

Acknowledgements

The research team extends its gratitude to the Ban Hoi Rak community group, Pak Phanang District, Nakhon Si Thammarat Province, for their kind assistance in testing the Khanom La batter mixing machine and for their provision of information throughout the research process. The team also thanks the Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, for its support and facilitation throughout the study.

References

1. Nakhon Si Thammarat Journal, Special Issue: "Duan Sip 51" Commemorating the Traditional Tenth Lunar Month Festival of Nakhon Si Thammarat Province. (2008). Nakhon Si Thammarat Provincial Administrative Organization; K.U. Quality Printing Co., Ltd., Songkhla. https://finearts.go.th/storage/contents/2023/05/file/dX4mBJJZtx0xJ9sL5y8FXXEZ0vrnrFYHO8boJlZg.pdf
2. Nutwarat K, Pranee T, Phinyapat S, Boonchub B. Case study and design the stirrer machine from solar energy for sugar jaggery. Art and Architecture Journal Naresuan University. 2021: 12(1): 121-132. https://so01.tci-thaijo.org/index.php/ajnu/article/view/242126
3. Ronnarit J, Athika C. The Development of a curry puff filling mixing machine using heat from liquefied petroleum gas (LPG) for community use. Udon Thani Rajabhat University Journal of Sciences and Technology. 2020: 8(1), 75-87. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/scudru/article/view/239973
4. Pakin M, Weeraphat I, Sutthirat K, Thep K. The developments of fruit processing stirrer suitable machine for the elderly in Ban Pa Xuan fruit conserve community enterprise Group, Wang Hin, Mueang Tak District, Tak Province. Proceedings of the National Academic Conference for Students, Kamphaeng Phet Rajabhat University, No. 1, 2021: 1053-1060. https://research.kpru.ac.th/research2/pages/filere/11022021-03-06.pdf
5. Amnad T, Pongtorn W. Design and test of horizontal rice mixer with ribbon stirring blade. Academic Journal Uttaradit Rajabhat University. 2022: 17(2): 37-54. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/uruj/article/view/248161

6. Ojo O, Oyerinde A, Bamisaye O, Adewole J, Adepoju T. Development of dough kneading machine for small and medium-sized enterprises. Journal of Applied Research in Technology & Engineering. 2024; 5(1): 23-31. https://doi.org/10.4995/jarte.2024.20210
7. Oni K, Akinmolayan O, Ige A M. Performance evaluation of dough mixing machine. ABUAD Journal of Engineering Research and Development (AJERD). 2025: 8(2): 130-139. https://journals.abuad.edu.ng/ajerd/article/view/926
8. Fatah I Y A, Ramli N A, Rohimi R. Conceptual design and simulation analysis of dough mixer-maker machine. Malaysian Journal of Applied Sciences. 2022; 7(2): 93-102. https://doi.org/10.37231/myjas.2022.7.2.340
9. Sittiboon S, Thunyatip S. Mixing machine for beauty product and liquid detergents. Journal of Innovation Technology Research. 2021: 5(2), 19-29. https://so04.tci-thaijo.org/index.php/JIT/article/view/253866
10. Pakornkiat P, Nikom L, Asada W, Thiangtham S. Development of prototype semi-automatic chitosan stirrer for community. Journal of Social Science and Cultural. 2024: 8(7): 115-126. https://so06.tci-thaijo.org/index.php/JSC/article/view/275239/184347
11. Supakanya K, Bhagavadi S. Design and Efficiency Assessment of Horizontal Fertilizer Mixing Machine. UTK Research Journal. 2025: 19(1): 100-105. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/rmutk/article/view/259072
12. Pratama A T, Zuardi G. Performance enhancement of mixing impellers based on mixture ppm analysis. Journal of Applied Agricultural Science and Technology. 2025: 9(1): 70-84. https://doi.org/10.55043/jaast.v9i1.266

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 (มกราคม - มิถุนายน 2569)

บทความวิจัย (Research Article)

ผลของการเปลี่ยนแปลงความเค็มในการเลี้ยงปลากะพงขาว (*Lates calcarifer*) ต่อการเจริญเติบโต คุณค่าทางโภชนาการ และคุณภาพเนื้อ

Effect of Salinity Change for Asian seabass (*Lates calcarifer*) Culture on Growth Performance, Nutritional Value and Meat Quality

จรรยพร อินทะสะระ[1], นัทท์ นันทพงศ์[1] และ พรพิมล เชื้อดวงผุย[1*]
Janyaporn Intasara[1], Nutt Nuntapong[1] and Pornpimon Chuaduangpui[1*]
[1]*คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*
[1]*Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University*
[*]Corresponding author; email: pornpimon.b@psu.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
7 พฤษภาคม 2569	13 มิถุนายน 2569	16 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

ศึกษาผลของระดับความเค็มต่อการเจริญเติบโต คุณภาพซาก คุณค่าทางโภชนาการ และคุณภาพเนื้อของปลากะพงขาว (*Lates calcarifer*) เลี้ยงปลากะพงขาวที่ระดับความเค็ม 0, 5, 15 และ 30 ppt ระยะเวลา 180 วัน แบ่งออกเป็น 7 ชุดการทดลอง ใช้ระดับความเค็มและระยะเวลาเลี้ยงต่างกัน โดยชุดการทดลองที่ 1 3 5 และ 7 เลี้ยงปลาระดับความเค็มคงที่ตลอดการทดลอง ชุดการทดลองที่ 2 4 และ 6 เลี้ยงปลาโดยมีการเปลี่ยนแปลงความเค็มระหว่างการทดลอง ผลการศึกษาชุดการทดลองที่เลี้ยงปลาที่ความเค็ม 30 ppt เวลา 180 วัน มีค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (weight gain; WG) ร้อยละ 1,359.29±126.26 ค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวัน (average daily weight gain; ADG) 1.45±0.19 กรัมต่อวัน และค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate; SGR) ร้อยละ 1.49±0.05 ต่อวัน สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่น ๆ แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) กับชุดการทดลองที่เลี้ยงปลากะพงขาวที่ระดับความเค็ม 5 ppt 180 วัน (ยกเว้นค่า ADG) และชุดการทดลองที่เลี้ยงปลากะพงขาวที่ระดับความเค็ม 0 ppt 180 วัน เท่านั้น รวมทั้งมีปริมาณไขมันบนฐานน้ำหนักสดร้อยละ 3.27±0.62 และปริมาณไขมันบนฐานน้ำหนักแห้งร้อยละ 13.38±1.81 ซึ่งมีค่าสูงที่สุดและแตกต่างทางสถิติ ($p<0.05$) กับชุดการทดลองอื่น แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) กับชุดการทดลองที่เลี้ยงปลาที่ความเค็ม 15 ppt เวลา 90 วัน และเลี้ยงต่อที่ความเค็ม 5 ppt เวลา 90 วัน ส่วนคุณภาพซาก พบว่าทุกชุดการทดลองมีเปอร์เซ็นต์เนื้อที่กินได้ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) ชุดการทดลองที่เลี้ยงปลาที่ความเค็ม 15 ppt เวลา 180 วัน มีคะแนนกลิ่น 7.30±1.32 คะแนน และกลิ่นรส 7.23±1.04 คะแนน สูงที่สุดเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่น แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) กับชุดการทดลองที่เลี้ยงปลากะพงขาวที่ระดับความเค็ม 15 ppt 90 วัน และเลี้ยงต่อที่ความเค็ม 5 ppt เวลา 90 วัน ชุดการทดลองที่เลี้ยงปลากะพงขาวที่ระดับความเค็ม 5 ppt 90 วัน และเลี้ยงต่อที่ความเค็ม 0 ppt เวลา 90 วัน (ยกเว้นกลิ่น) และชุดการทดลองที่เลี้ยงปลากะพงขาวที่ระดับความเค็ม 0 ppt 180 วัน (ยกเว้นกลิ่น) ดังนั้น การเลี้ยงปลากะพงขาวที่ระดับความเค็ม 15 ppt ขึ้นไป ส่งผลให้ปลากะพงขาวมีการเจริญเติบโตและคุณภาพเนื้อด้านประสาทสัมผัสของเนื้อปลาที่มีคุณภาพ อาจใช้ผลการศึกษาเป็นแนวทางในการจัดการการเลี้ยง เพื่อผลิตปลากะพงขาวให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ปลากะพงขาว, ระดับความเค็ม, คุณค่าทางโภชนาการ, คุณภาพเนื้อ, คุณภาพซาก

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 (มกราคม - มิถุนายน 2569)

Abstract

This study investigated the effect of salinity level on the growth performance, carcass quality, nutritional value and meat quality of Asian seabass (*Lates calcarifer*). Fish were cultured under salinity levels of 0, 5, 15, and 30 ppt over a 180-day period. Seven experimental treatments, using different salinity levels and rearing durations. Treatments 1, 3, 5, and 7 were maintained at fixed salinity levels throughout the experiment, whereas Treatments 2, 4, and 6 were exposed to salinity adjustments during the culture period. The results showed that fish reared at a salinity of 30 ppt for 180 days exhibited the highest growth performance, with a weight gain (WG) of 1,359.29 ± 126.26%, an average daily gain (ADG) of 1.45 ± 0.19 g day^{-1}, and a specific growth rate (SGR) of 1.49 ± 0.05% day^{-1},compared to other treatments. However, this was significant differences ($p < 0.05$) experimental treatment rearing fish at a salinity of 5 ppt for 180 days (except for the ADG) and the experimental treatment rearing fish at a salinity of 0 ppt for 180 days, this treatment had the highest lipid contents on both a wet-weight basis (3.27 ± 0.62%) and a dry-weight basis (13.38 ± 1.81%), which were significantly different ($p < 0.05$) from those of the other treatments. However, no significant difference ($p > 0.05$) was observed when compared with fish reared at 15 ppt for 90 days followed by 5 ppt for an additional 90 days. Regarding carcass quality, no significant differences ($p > 0.05$) were observed in the edible flesh percentage among all treatments. Fish reared at a salinity of 15 ppt for 180 days achieved the highest sensory scores for odor (7.30 ± 1.32) and flavor (7.23 ± 1.04) compared with the other treatments. However, this was significant differences ($p < 0.05$) experimental treatment rearing fish at a salinity of 15 ppt water salinity for 90 days and 5 ppt water salinity for another 90 days, experimental treatment rearing fish at a salinity of 5 ppt water salinity for 90 days and 0 ppt water salinity for another 90 days (except for the odor) and the experimental treatment rearing fish at a salinity of 0 ppt for 180 days (except for the odor). Therefore, rearing Asian seabass at salinity levels of 15 ppt or higher can enhance growth performance and improve sensory quality of fish meat. These findings can serve as a practical guideline for aquaculture management to enhance the production efficiency of Asian seabass.

Keywords: Asian seabass, Salinity level, Nutritional value, Meat quality, Carcass quality

บทนำ

ปลากะพงขาว (*Lates calcarifer*) เป็นปลาที่ทนความเค็มได้ในช่วงกว้าง (euryhaline fish) กล่าวคือ สามารถดำรงชีวิตได้ในสภาวะความเค็มที่หลากหลายตั้งแต่น้ำจืดจนถึงน้ำที่มีความเค็มสูง [1] ปลาชนิดนี้ได้รับความนิยมในการเพาะเลี้ยงอย่างแพร่หลายในจังหวัดชายฝั่งทะเลของประเทศไทย เนื่องจากเลี้ยงง่าย โตเร็ว เนื้อมีรสชาติดีและมีราคา จึงมีความสำคัญทางเศรษฐกิจต่อประเทศไทยทั้งในด้านการบริโภคภายในประเทศและส่งขายออกต่างประเทศ [2] โดยตลาดหลักในการส่งออกปลากะพงขาวของไทย ได้แก่ ฮ่องกง มาเลเซีย สหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ เมียนมาร์ และอิหร่าน [3] ในช่วงปลายปี พ.ศ. 2562 จนถึงปัจจุบัน ประเทศไทยประสบปัญหาราคาปลากะพงขาวปรับตัวลดลง เนื่องจากการนำเข้าปลากะพงขาวจากประเทศมาเลเซียเป็นจำนวนมากและจำหน่ายในราคาที่ต่ำกว่าปลากะพงขาวภายในประเทศ ทำให้ตลาดภายในประเทศมีสินค้ามากกว่าความต้องการ จากสถานการณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นกรมประมงได้ดำเนินกิจกรรมเพื่อส่งเสริมการบริโภคทั้งการบริโภคปลากะพงขาวภายในประเทศและการสร้างโอกาสในการส่งออกปลากะพงขาวไปยังตลาดจีน เพื่อสร้างโอกาสการค้าให้กับเกษตรกรและช่วยกระตุ้นให้ภาพรวมการส่งออกปลากะพงขาวขยับตัวสูงขึ้น [3, 4] ซึ่งส่งผลให้

เกิดการพัฒนาและขยายการเลี้ยงมากขึ้นทั้งในบ่อดินและกระชัง ประกอบกับปลากะพงขาวที่ได้จากการเพาะเลี้ยงมีรสชาติดี จึงเป็นที่นิยมในการบริโภคโดยเฉพาะตลาดภายในประเทศ [5]

แหล่งเพาะเลี้ยงปลากะพงขาวมีการกระจายตัวครอบคลุมเกือบทุกภูมิภาคของประเทศไทย โดยจังหวัดที่มีบทบาทสำคัญด้านการผลิต ได้แก่ ฉะเชิงเทรา สมุทรสาคร สมุทรสงคราม สงขลา และสมุทรปราการ [4] ทั้งนี้ จังหวัดสงขลานับเป็นหนึ่งในพื้นที่สำคัญของการเพาะเลี้ยงปลากะพงขาวของประเทศ เนื่องจากมีความได้เปรียบเชิงนิเวศทางธรรมชาติ โดยมีสภาพแวดล้อมที่เอื้ออำนวยต่อการเลี้ยง ซึ่งประกอบด้วยแหล่งน้ำที่มีสภาพแตกต่างกัน 3 ประเภท ได้แก่ น้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำเค็ม โดยน้ำทะเลในพื้นที่ตำบลเกาะยอมีการแปรผันในช่วง 0–31.6 ส่วนในพันส่วน (ppt) ซึ่งก่อให้เกิดสภาพแวดล้อมที่มีความเฉพาะเจาะจงและเหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงปลากะพงขาว ทำให้ปลาที่เลี้ยงในบริเวณดังกล่าวมีชื่อเสียงในเรื่อง “เนื้อปลาอร่อย” [6, 7] ในปี พ.ศ. 2563 กรมทรัพย์สินทางปัญญาได้ดำเนินการขึ้นทะเบียน "ปลากะพงสามน้ำทะเลสาบสงขลา" เป็นสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (Geographical Indication; GI) เพื่อรับรองแหล่งกำเนิดทางภูมิศาสตร์อันเป็นเอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ [8]

ด้วยเหตุนี้ ความเค็มจึงถือเป็นหนึ่งในปัจจัยทางกายภาพที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโต การเผาผลาญพลังงาน การทำงานทางสรีรวิทยา และกระบวนการเมแทบอลิซึมของปลา นอกจากนี้ยังพบว่าปลาแต่ละชนิดมีช่วงความเค็มที่เหมาะสมแตกต่างกัน โดยการเปลี่ยนแปลงของระดับความเค็มสามารถก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในด้านการเจริญเติบโต การทำงานทางสรีรวิทยา และคุณภาพเนื้อปลาได้อย่างมีนัยสำคัญ [9, 10, 11] จากรายงานการศึกษาก่อนหน้านี้ ระดับความเค็มที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบปิดอยู่ในช่วง 5 ถึง 36 ppt [12, 13, 14] ทั้งนี้งานวิจัยที่มุ่งศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงระดับความเค็มในระหว่างช่วงระยะเวลาการเพาะเลี้ยงยังคงมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อประเมินผลของการเปลี่ยนแปลงระดับความเค็มในช่วงระยะเวลาการเพาะเลี้ยงต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย คุณภาพซาก คุณค่าทางโภชนาการ และคุณภาพเนื้อของปลากะพงขาว โดยผลการศึกษาครั้งนี้ สามารถเป็นแนวทางในการจัดการด้านการเลี้ยงหรือเป็นทางเลือกให้แก่เกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงปลากะพงขาว ได้นำผลจากการศึกษาครั้งนี้ไปประยุกต์ใช้ในการเลี้ยงปลากะพงขาวให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่เลี้ยงจริง เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณค่าทางโภชนาการและคุณภาพเนื้อที่ดียิ่งขึ้น และเพื่อเป็นแนวทางส่งเสริมการผลิตปลากะพงขาวของประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพสูงสุด สอดคล้องกับความต้องการของตลาด ทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเค็มต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอดตายของปลากะพงขาว
2. เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเค็มต่อคุณภาพซาก คุณค่าทางโภชนาการ และคุณภาพเนื้อของปลากะพงขาว

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การออกแบบการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) ประกอบด้วย 7 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ได้แก่ ชุดการทดลองที่ 1 เลี้ยงปลาที่ระดับความเค็ม 30 ppt 180 วัน (30/180) ชุดการทดลองที่ 2 เลี้ยงปลาที่ระดับความเค็ม 30 ppt 90 วัน และเลี้ยงต่อที่ระดับความเค็ม 15 ppt 90 วัน (30/90-15/90) (ปรับความเค็มลงวันละ 5 ppt) ชุดการทดลองที่ 3 เลี้ยงปลาที่ระดับความเค็ม 15 ppt 180 วัน (15/180) ชุดการทดลองที่ 4 เลี้ยงปลาที่ระดับความเค็ม 15 ppt 90 วัน และเลี้ยงต่อที่ระดับความเค็ม 5 ppt 90 วัน (15/90-5/90) (ปรับความเค็มลงวันละ 5 ppt) ชุดการทดลองที่ 5 เลี้ยงปลาที่ระดับความเค็ม 5 ppt 180 วัน (5/180) ชุดการทดลองที่ 6 เลี้ยงปลาที่ระดับความเค็ม 5 ppt

90 วัน และเลี้ยงต่อที่ระดับความเค็ม 0 ppt 90 วัน (5/90-0/90) (ปรับความเค็มลงวันละ 5 ppt) และชุดการทดลองที่ 7 เลี้ยงปลาที่ระดับความเค็ม 0 ppt 180 วัน (0/180) ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 6 เดือน

2. การอนุญาตวิจัยในสัตว์

งานวิจัยนี้ได้รับใบอนุญาตใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์เลขที่ใบอนุญาตใช้สัตว์ U1-02775-2559 และได้รับอนุญาตใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ตามเอกสารเลขที่ Ref.AQ116/2022 จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3. สัตว์ทดลอง

ลูกพันธุ์ปลากะพงขาวขนาดความยาวเฉลี่ย 3-4 นิ้วต่อตัว จากโรงเพาะฟักของเกษตรกรในจังหวัดฉะเชิงเทรา นำมาปรับสภาพในบ่อซีเมนต์ที่เติมน้ำทะเล ระดับความเค็ม 30 ppt เวลา 7 วัน จากนั้นคัดปลาใส่ถังทดลองขนาด 200 ลิตร ที่บรรจุปริมาตรน้ำ 180 ลิตร จำนวนถังละ 20 ตัว เพื่อปรับสภาพความเค็มน้ำที่ 15, 5 และ 0 ppt ตามลำดับ ในระหว่างการปรับสภาพปลา ให้อาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนร้อยละ 42 วันละ 2 ครั้ง เวลา 09.00 และ 16.00 น. ถ่ายน้ำ ร้อยละ 50 ทุกวัน เวลา 16.30 น. ปรับสภาพปลาเป็นระยะเวลา 14 วัน คัดเลือกปลาที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 19.32±0.73 กรัมต่อตัว ปล่อยในถังทดลองขนาด 200 ลิตร ความหนาแน่นของลูกปลา 1 ตัวต่อน้ำ 10 ลิตร (12 ตัวต่อถัง) จัดระบบให้อากาศอย่างต่อเนื่อง ระหว่างทดลองให้อาหารสำเร็จรูป ที่มีโปรตีนร้อยละ 42 วันละ 2 ครั้ง เวลา 09.00 และ 16.00 น. โดยให้กินจนอิ่ม เก็บข้อมูลน้ำหนักอาหารที่ให้ทุกวัน เปลี่ยนถ่ายน้ำร้อยละ 50 ทุกวัน เวลา 16.30 น. ตลอดระยะเวลาการทดลอง มีการตรวจติดตามคุณภาพน้ำตลอดการทดลอง และทุก ๆ 30 วัน มีการติดตามการเจริญเติบโตของปลา มีการชั่งน้ำหนักปลารายตัวโดยใช้เครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง และนับจำนวนปลาที่เหลือในแต่ละถังทดลอง นำไปคำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (WG) น้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวัน (ADG) อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR) อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (feed conversion ratio; FCR) และอัตราการรอดตาย (survival rate; SR)

4. การเตรียมอาหารทดลอง

การทดลองครั้งนี้ ใช้อาหารเม็ดสำเร็จรูปสำหรับปลากะพงขาวยี่ห้อโปรฟีด (Thai Union) ชนิดลอยน้ำ (โปรตีนร้อยละ 42) ก่อนใช้เป็นอาหารสำหรับปลาทดลอง นำอาหารเม็ดสำเร็จรูปไปวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ ปริมาณความชื้น เถ้า โปรตีน และไขมัน ตามวิธีการของ AOAC [15] ค่าที่ได้เท่ากับ ร้อยละ 7.21 7.42 43.22 และ 8.46 (ร้อยละบนฐานน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ

5. การวิเคราะห์คุณภาพซาก และคุณค่าทางโภชนาการ

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง สุ่มปลาจำนวน 6 ตัวในทุกชุดการทดลอง (n = 6) เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพซาก โดยการนำปลาชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการชำแหละ ด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความละเอียด 2 ตำแหน่ง จากนั้นชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนต่าง ๆ ของปลา บันทึกและคำนวณข้อมูลเปอร์เซ็นต์เนื้อที่กินได้ (Edible flesh) ดังนี้

$$\text{Edible flesh (\%)} = (\text{Flesh weight} / \text{Body weight}) \times 100$$

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง สุ่มปลาจำนวน 6 ตัวในทุกชุดการทดลอง (n = 6) เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของเนื้อปลา ได้แก่ ความชื้น เถ้า โปรตีน และไขมัน ตามวิธีมาตรฐาน AOAC [15] วิเคราะห์ปริมาณความชื้นโดยการนำเนื้อปลาอบให้แห้งสนิทด้วยตู้อบลมร้อน (UF110; Memmert, Schwabach, Germany) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ วิเคราะห์ปริมาณเถ้าโดยนำเนื้อปลาเผาด้วยเตาเผา (Ney Tech, Vulcan D-550, York, PA, USA)

ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยเครื่องวิเคราะห์ตามวิธี Kjeldahl (KjeltecTM 8100; Foss, Höganäs, Sweden) และวิเคราะห์ปริมาณไขมันด้วยเครื่องสกัดโดยใช้ปิโตรเลียมอีเทอร์เป็นตัวทำละลาย (SoxtecTM 8000; Foss, Suzhou, P.R. China)

6. การวิเคราะห์คุณภาพเนื้อ (ด้านประสาทสัมผัสของเนื้อปลา)

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง สุ่มปลาจำนวน 6 ตัวในทุกชุดการทดลอง (n = 6) เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัสของเนื้อปลา โดยแล่เฉพาะเนื้อปลาส่วนบริเวณครึ่งบนลำตัว (ไม่รวมเกล็ดและหนัง) ล้างด้วยน้ำสะอาด ตัดเป็นชิ้นขนาด 5-6 กรัม วางในถ้วยพลาสติกชนิดโพลิโพรพิลีน (Polypropylenem PP) ประเภท 5 และทำให้สุกโดยใช้เตาไมโครเวฟ Samsung รุ่น MS20A3010A ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นทดสอบความชอบของผู้บริโภคด้วยวิธีวัดระดับความชอบ 9 ระดับ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ กลิ่น กลิ่นรส ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยคะแนน 9 คือ ชอบมากที่สุด และคะแนน 1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด ให้ผู้ทดสอบชิมเนื้อปลาทุกชุดการทดลอง ๆ ละ 1 ชิ้น การทดสอบครั้งนี้ใช้จำนวนผู้ทดสอบทั่วไป 30 คน โดยผู้ทดสอบเป็นนักศึกษาและบุคลากรภายในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ โดยไม่กำหนดเพศและอายุของผู้ทดสอบ และวางแผนการทดลองแบบ Randomized complete block design (RCBD)

7. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

พารามิเตอร์คุณภาพน้ำที่ตรวจวัด ได้แก่ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved Oxygen; DO) ด้วยเครื่องวัด DO meter ยี่ห้อ YSI รุ่น 550A อุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ ความเค็มด้วย Salinity Refractometer รุ่น RHS-28ATC ค่า pH ด้วย test kit ยี่ห้อ AQUA-VBC อ่านค่าโดย Spectro kit ยี่ห้อ Marine Leader (เก็บตัวอย่างน้ำ เวลา 8.00 น. ตรวจติดตามทุกวัน) ค่าแอมโมเนีย และไนไตรท์ด้วย test kit ยี่ห้อ AQUA-VBC อ่านค่าโดย Spectro kit ยี่ห้อ Marine Leader (เก็บตัวอย่างน้ำ เวลา 8.00 น. ตรวจติดตาม 5 วันต่อครั้ง)

8. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย คุณภาพซาก คุณค่าทางโภชนาการ และคุณภาพเนื้อ มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว One-way analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (version 29.0.1.0; SPSS Inc.; English, USA) ทั้งนี้ แต่ละชุดการทดลองถูกพิจารณาเป็นหน่วยทดลองอิสระในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

9. สถานที่ทำการวิจัยและเก็บข้อมูล

ดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูล ณ ศูนย์วิจัยสุขภาพสัตว์น้ำ กิจการ ศุภมาตย์ สาขาวิชาวาริชศาสตร์และนวัตกรรมการจัดการ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. การเจริญเติบโตและอัตราการรอดตาย

ผลของการเปลี่ยนแปลงระดับความเค็มต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอดตายของปลากะพงขาว (Table 1) พบว่าระดับความเค็มส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (WG) น้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวัน (ADG) และอัตราการเจริญเติบโต

จำเพาะ (SGR) โดยชุดการทดลองที่ 1 (30/180) มีค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (WG) และค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR) สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่น ๆ แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) กับชุดการทดลองที่ 5 (5/180) (ยกเว้นค่า ADG) และชุดการทดลองที่ 7 (0/180) เท่านั้น และชุดการทดลองที่ 1 (30/180) มีค่าน้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวัน (ADG) สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่น ๆ แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) กับชุดการทดลองที่ 7 (0/180) เท่านั้น ทั้งนี้พบว่าระดับความเค็มไม่ส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) และอัตราการรอดตาย (SR) (Table 1)

เมื่อเปรียบเทียบการเลี้ยงปลากะพงขาวที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค็มระหว่างการทดลองกับการเลี้ยงที่ระดับความเค็มคงที่ ทั้งในระดับสูงและต่ำตลอดระยะเวลาการทดลอง พบว่าไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอดตายของปลา (Table 1)

2. คุณค่าทางโภชนาการและคุณภาพซาก

ผลของการเปลี่ยนแปลงระดับความเค็มต่อคุณค่าทางโภชนาการและคุณภาพซากของปลากะพงขาว (Table 2) พบว่า ระดับความเค็มไม่ส่งผลต่อปริมาณความชื้น เถ้า โปรตีนบนฐานน้ำหนักสด โปรตีนบนฐานน้ำหนักแห้งของเนื้อปลา และเปอร์เซ็นต์เนื้อที่กินได้ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) ในทุกชุดการทดลอง แต่ระดับความเค็มมีผลต่อปริมาณไขมัน (น้ำหนักสด) และปริมาณไขมัน (น้ำหนักแห้ง) ของเนื้อปลา โดยชุดการทดลองที่ 1 (30/180) มีค่าสูงที่สุด แตกต่างจากชุดการทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) กับชุดการทดลองที่ 4 (15/90-5/90)

เมื่อเปรียบเทียบการเลี้ยงปลากะพงขาวที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค็มระหว่างการทดลองกับการเลี้ยงที่ระดับความเค็มคงที่ ทั้งในระดับสูงและต่ำตลอดระยะเวลาการทดลอง พบว่าชุดการทดลองที่ 2 (30/90-15/90) มีปริมาณไขมันทั้งในฐานน้ำหนักเปียกและฐานน้ำหนักแห้งต่ำกว่าชุดการทดลองที่ 1 (30/180) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) กับชุดการทดลองที่ 3 (15/180) (Table 2)

3. คุณภาพเนื้อ

ผลของการเปลี่ยนแปลงความเค็มต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของเนื้อปลากะพงขาว (Table 3) พบว่าระดับความเค็มส่งผลต่อคะแนนความชอบด้านกลิ่น และกลิ่นรส โดยคะแนนความชอบด้านกลิ่นในชุดการทดลองที่ 3 (15/180) มีค่ามากที่สุด แตกต่างจากชุดการทดลองที่ 4 (15/90-5/90) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) กับชุดการทดลองอื่น ๆ (ตารางที่ 3) และคะแนนความชอบด้านกลิ่นรส ในชุดการทดลองที่ 3 (15/180) มีค่ามากที่สุด แตกต่างจากชุดการทดลองที่ 4 (15/90-5/90) ชุดการทดลองที่ 6 (5/90-0/90) และ ชุดการทดลองที่ 7 (0/180) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แต่ไม่แตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) กับชุดการทดลองที่ 1 (30/180), 2 (30/90-15/90) และ 5 (5/180) ทั้งนี้พบว่าระดับความเค็มไม่ส่งผลต่อคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) ในทุกชุดการทดลอง (Table 3)

เมื่อเปรียบเทียบการเลี้ยงปลากะพงขาวที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค็มระหว่างการทดลองกับการเลี้ยงที่ระดับความเค็มคงที่ ทั้งในระดับสูงและต่ำตลอดระยะเวลาการทดลอง พบว่าชุดการทดลองที่ 4 (15/90-5/90) ได้คะแนนในด้านกลิ่นต่ำกว่าชุดการทดลองที่ 3 (15/180) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) คะแนนในด้านกลิ่นรส พบว่าชุดการทดลองที่ 4 (15/90-5/90) ได้คะแนนต่ำกว่าชุดการทดลองที่ 3 (15/180) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลองที่ 5 (5/180) ทั้งนี้พบว่าชุดการทดลองที่ 6 (5/90-0/90) ได้คะแนนด้านกลิ่นไม่แตกต่างจากชุดการทดลองที่ 5 (5/180) และ 7 (0/180) แต่คะแนนในด้านกลิ่นรสพบว่า ชุดการทดลองที่ 6 (5/90-0/90) ได้คะแนนในด้านกลิ่นต่ำกว่า ชุดการทดลองที่ 5 (5/180) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลองที่ 7 (0/180) (Table 3)

4. คุณภาพน้ำ

ผลของคุณภาพน้ำในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO) มีค่าอยู่ในช่วง 4.98±0.03 ถึง 5.70±0.01 mg/L อุณหภูมิ มีค่าอยู่ในช่วง 26.14±0.02 ถึง 26.50±0.01 ℃ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีค่าอยู่ในช่วง 7.34±0.01 ถึง 7.64±0.01 แอมโมเนีย มีค่าอยู่ในช่วง 0.012±0.001 ถึง 0.018±0.001 mg/L และไนไตรท์มีค่าอยู่ในช่วง 2.89±0.16 ถึง 3.31±0.06 mg/L

Table 1 Growth performance and survival rate of Asian seabass from treatment 1-7

Parameters	T1 (30/180)	T2 (30/90-15/90)	T3 (15/180)	T4 (15/90-5/90)	T5 (5/180)	T6 (5/90-0/90)	T7 (0/180)
Initial body weight (g)	19.21±1.22	19.38±1.37	18.97±0.46	19.34±0.56	19.42±0.64	18.97±0.25	19.96±0.10
Final body weight (g)	280.88±35.61^{a}	253.12±28.00^{ab}	233.23±19.65^{ab}	262.90±38.80^{ab}	222.93±38.17^{ab}	225.62±28.33^{ab}	207.50±11.94^{b}
WG (%)	1359.29±126.26^{a}	1203.97±57.61^{abc}	1130.16±105.14^{abc}	1263.96±241.97^{ab}	1052.34±232.61^{bc}	1090.49±165.94^{abc}	939.66±59.51^{c}
ADG (g/day)	1.45±0.19^{a}	1.20±0.21^{ab}	1.19±0.11^{ab}	1.35±0.22^{ab}	1.13±0.21^{ab}	1.15±0.16^{ab}	1.04±0.07^{b}
SGR (%/day)	1.49±0.05^{a}	1.43±0.02^{abc}	1.39±0.05^{abc}	1.45±0.10^{ab}	1.35±0.10^{bc}	1.37±0.08^{abc}	1.30±0.03^{c}
FCR	1.13±0.19	1.14±0.07	1.35±0.33	1.33±0.11	1.32±0.33	1.34±0.13	1.42±0.06
SR (%)	72.22±4.81	77.78±4.81	66.67±16.67	63.89±12.73	80.55±20.97	69.45±4.81	66.67±0.00

Note: Mean ± SD (n = 3). Different superscript letters within the same row indicate significant differences ($p < 0.05$).

Treatment abbreviation:

T1(30/180): Fish reared at a salinity of 30 ppt for 180 days

T2 (30/90-15/90): Fish reared at a salinity of 30 ppt for 90 days, followed by 15 ppt for 90 days

T3 (15/180): Fish reared at a salinity of 15 ppt for 180 days

T4(15/90-5/90): Fish reared at a salinity of 15 ppt for 90 days, followed by 5 ppt for 90 days

T5 (5/180): Fish reared at a salinity of 5 ppt for 180 days

T6 (5/90-0/90): Fish reared at a salinity of 5 ppt for 90 days, followed by 0 ppt for 90 days

T7(0/180): Fish reared at a salinity of 0 ppt for 180 days

Table 2 Nutritional value and carcass quality of Asian seabass from treatment 1-7

Parameters (%)	T1 (30/180)	T2 (30/90-15/90)	T3 (15/180)	T4 (15/90-5/90)	T5 (5/180)	T6 (5/90-0/90)	T7 (0/180)
Moisture	76.46±1.68	76.46±1.38	76.14±0.94	76.25±1.05	76.16±1.20	76.64±0.55	76.71±0.47
Ash (wet weight basis)	0.28±0.02	0.27±0.02	0.28±0.02	0.26±0.02	0.26±0.01	0.27±0.01	0.28±0.02
Ash (dry weight basis)	1.18±0.10	1.14±0.05	1.17±0.08	1.11±0.06	1.11±0.04	1.16±0.07	1.20±0.08
fat (wet weight basis)	3.27±0.62^{a}	2.27±0.38^{b}	1.96±0.45^{b}	2.41±0.47^{ab}	2.18±0.30^{b}	1.87±0.51^{b}	1.80±0.24^{b}
fat (dry weight basis)	13.38±1.81^{a}	9.70±1.80^{b}	8.15±1.64^{b}	10.11±1.54^{ab}	9.14±1.06^{b}	7.99±2.08^{b}	7.74±1.13^{b}
protein (wet weight basis)	18.84±0.56	19.36±1.43	19.79±0.67	19.23±0.51	19.66±1.11	19.42±0.50	19.19±0.59
protein (dry weight basis)	81.82±3.14	82.17±1.82	82.97±1.53	81.02±1.82	82.45±0.61	83.14±1.69	82.40±1.42
Edible flesh	34.30±2.04	34.57±2.19	34.84±3.12	33.42±3.55	34.60±1.04	34.43±3.41	32.74±3.03

Note: Mean ± SD (n = 6). Different superscript letters within the same row indicate significant differences ($p < 0.05$).

ISSN : 2821 - 9406 (Online)

227

Table 3 Meat quality of Asian seabass from treatment 1-7

Parameters (point)	T1 (30/180)	T2 (30/90-15/90)	T3 (15/180)	T4 (15/90-5/90)	T5 (5/180)	T6 (5/90-0/90)	T7 (0/180)
Appearance	7.07±1.31	6.77±1.41	7.23±1.31	6.67±1.20	7.17±1.53	7.13±1.33	7.10±1.21
Odor	7.03±1.27^{a}	7.27±1.23^{a}	7.30±1.32^{a}	5.83±1.80^{b}	7.10±1.58^{a}	6.50±1.59^{ab}	6.43±1.98^{ab}
Flavor	6.97±1.10^{ab}	6.77±1.52^{abc}	7.23±1.04^{a}	6.13±1.83^{bc}	6.83±1.64^{ab}	5.90±1.90^{c}	6.23±1.98^{bc}
Texture	7.10±1.13	7.03±1.13	6.90±1.47	6.40±1.45	7.20±1.45	6.40±1.79	6.40±1.69
Overall	7.07±1.17	7.07±1.11	7.00±1.15	6.40±1.40	6.97±1.50	6.50±1.64	6.63±1.40

Note: Mean ± SD (n = 30). Different superscript letters within the same row indicate significant differences ($p<0.05$).

การเจริญเติบโตและสุขภาพของปลาเป็นปัจจัยสำคัญในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเค็มของน้ำเลี้ยง ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของระดับความเค็มที่แตกต่างกันต่อการเลี้ยงปลากะพงขาว *(L. calcarifer)* เพื่อทำความเข้าใจการตอบสนองทางสรีรวิทยาและปรับปรุงแนวทางการเลี้ยงให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปปลากะพงขาวสามารถรักษาสมดุลภายในร่างกาย (osmoregulation) ได้แม้ในสภาวะความเค็มที่เปลี่ยนแปลง ผลการศึกษาพบว่า การรักษาระดับความเค็มที่ 30 ppt ส่งผลเชิงบวกต่อการเจริญเติบโตของลูกปลากะพงขาวเมื่อเปรียบเทียบกับการเลี้ยงในน้ำจืด ขณะที่การเปลี่ยนแปลงระดับความเค็มระหว่างการเลี้ยงไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และอัตราการรอดตาย

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ใช้ระดับความเค็มคงที่ พบว่า ปลากะพงขาวที่เลี้ยงที่ 30 ppt ตลอดระยะเวลา 180 วัน มีการเจริญเติบโตดีที่สุด ขณะที่การเลี้ยงในน้ำจืด (0 ppt) ให้ผลการเจริญเติบโตต่ำที่สุด สะท้อนว่าระดับความเค็มสูงใกล้เคียงสภาวะธรรมชาติของปลากะพงขาวเอื้อต่อการใช้พลังงานเพื่อการเจริญเติบโตมากกว่า ผลการศึกษาชี้ให้เห็นแนวโน้มว่าระดับความเค็มตั้งแต่ 15–30 ppt เป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลากะพงขาว ขณะที่การเลี้ยงในน้ำจืดส่งผลให้การเจริญเติบโตลดลง สะท้อนว่าปลาต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในการรักษาสมดุลเกลือแร่ ส่งผลให้พลังงานที่เหลือสำหรับการเจริญเติบโตลดลง

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่มีการลดระดับความเค็มระหว่างการเลี้ยง พบว่า การลดความเค็มแบบลำดับขั้นยังคงรักษาสมรรถนะการเจริญเติบโตได้ใกล้เคียงกับการเลี้ยงที่ความเค็มสูงตลอดการทดลอง แม้ว่างานวิจัยนี้ไม่ได้ประเมินต้นทุนการผลิตโดยตรง แต่ผลการศึกษาพบว่า การลดระดับความเค็มแบบลำดับขั้น เช่น 30/90–15/90 และ 15/90–5/90 ยังคงให้ผลการเจริญเติบโตไม่แตกต่างจากการเลี้ยงที่ 30 ppt ตลอดระยะเวลาการทดลอง จึงมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านความเค็มหรือมีต้นทุนการจัดหาน้ำทะเลสูง

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของ Hassan et al. [14] ที่แนะนำระดับความเค็ม 25 และ 36 ppt สำหรับการเลี้ยงปลากะพงขาว โดยไม่ส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหาร เมื่อเทียบกับระดับความเค็มที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ Sari et al. [16] รายงานว่าความเค็มในช่วง 28–32 ppt สามารถเพิ่มน้ำหนักตัวได้ถึง 0.5 กรัมต่อวัน ทั้งนี้ Yusof et al. [17] รายงานว่า ปลากะพงขาวสามารถเจริญเติบโตได้ดีในน้ำกร่อยที่ความเค็มประมาณ 15 ppt ซึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างด้านความทนทานต่อความเค็มระหว่างสายพันธุ์ ดังนั้นการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสมและการวิเคราะห์พันธุกรรมจึงมีความสำคัญต่อการจัดการการเลี้ยง

ทั้งนี้ความสามารถในการควบคุมสมดุลเกลือแร่ (osmoregulation) เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้ปลาที่ทนความเค็มได้ในช่วงกว้าง (euryhaline fish) สามารถปรับตัวได้ ปลากะพงขาวตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็มผ่านกลไกที่เกี่ยวข้องกับฮอร์โมน เอนไซม์ และตัวขนส่งไอออน [9] โดยในสภาวะที่ความเข้มข้นของไอออนระหว่างน้ำและเลือดใกล้เคียงกัน (isosmotic) ปลาจะใช้พลังงานในการปรับสมดุลของร่างกายน้อยลง ส่งผลให้พลังงานส่วนที่เหลือสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้มากขึ้น [18, 19, 20]

ในการศึกษานี้ การที่ปลามีอัตราการเจริญเติบโตลดลงเมื่อเลี้ยงในน้ำจืด อาจเกิดจากการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นที่จำเป็นสำหรับการควบคุมสมดุลของน้ำและเกลือแร่ในตัวให้คงที่ เมื่อพลังงานที่จำเป็นสำหรับการใช้ในการหายใจและการควบคุมสมดุลของน้ำและเกลือแร่ลดลง พลังงานเมตาบอลิซึมส่วนเกินจากการเผาผลาญ พลังงานส่วนเกินจะถูกนำมาใช้เพื่อการเจริญเติบโตและการพัฒนา [21, 22]. ซึ่งสอดคล้องกับ Saghafiankho et al. [12] ที่พบว่าการเลี้ยงที่ความเค็ม 35 ppt ทำให้การแสดงออกของยีน Na^+/K^+-ATPase และ NKCC ในเหงือกต่ำที่สุด ส่งผลให้ปลาใช้พลังงานในการควบคุมสมดุลเกลือน้อยลง

นอกจากนี้ Li et al. [23] รายงานว่าความเค็มต่ำก่อให้เกิดความเครียดทางสรีรวิทยา เช่น oxidative stress และ endoplasmic reticulum stress ซึ่งส่งผลให้การเจริญเติบโตลดลง อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออน ยังมีผลต่อประสิทธิภาพการกินอาหารและการทำงานของเอนไซม์ย่อยอาหาร โดยเฉพาะในสภาวะความเค็มต่ำ กิจกรรมของเอนไซม์ย่อยโปรตีน (pepsin-like enzymes) จะลดลง ในทางตรงกันข้าม สภาวะความเค็มสูงช่วยส่งเสริมกระบวนการดูดซึมสารอาหาร เนื่องจากการดูดซึมกลูโคสและกรดอะมิโนขึ้นอยู่กับการทำงานของ Na^+/K^+-ATPase [24, 25]

ในด้านองค์ประกอบซาก พบว่าระดับความเค็มไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เนื้อที่กินได้ โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 32.74–34.84 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ พิเชต และคณะ [26] ที่รายงานว่าเปอร์เซ็นต์เนื้อที่กินได้ของปลากะพงขาวที่เลี้ยงด้วยอาหารสำเร็จรูปสำหรับปลาทะเลชนิดลอยน้ำ (ขนาดปลาไม่ต่ำกว่า 500 กรัม/ตัว) มีค่าเท่ากับร้อยละ 40.18 ±1.06 พบว่าเปอร์เซ็นต์เนื้อที่กินได้ จากผลจากการศึกษามีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความแตกต่างของขนาดตัวปลา โดยปลาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีน้ำหนักเฉลี่ย 311.37 กรัม (มีขนาดเล็กกว่า) ทั้งนี้สอดคล้องกับรายงานของโกมุทและคณะ [27] ที่ศึกษาคุณภาพซากของปลา Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) น้ำหนัก 3, 4 และ 5 กิโลกรัม และพบว่าเปอร์เซ็นต์เนื้อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักตัวปลา ทั้งนี้ความเค็มมีผลต่อองค์ประกอบทางโภชนาการของกล้ามเนื้อปลา รวมถึงคุณภาพเนื้อ เช่น ความแน่น กลิ่น และรสชาติ [28, 29] ผลการศึกษานี้พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเค็มไม่มีผลต่อปริมาณความชื้น เถ้า และโปรตีนในเนื้อปลา ซึ่งสอดคล้องกับ Xu et al. [30] ที่รายงานว่าปลานิลที่เลี้ยงในความเค็มที่ต่างกันมีค่าของปริมาณความชื้น เถ้า และโปรตีน ในตัวปลาไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ปริมาณไขมันในเนื้อปลาที่เลี้ยงที่ความเค็ม 30 ppt มีค่าสูงกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ผลดังกล่าวอาจอธิบายได้ว่าในช่วงความเค็ม 25–30 ppt ความดันออสโมติกของน้ำใกล้เคียงกับของเหลวในร่างกายปลา ทำให้การใช้พลังงานในการรักษาสมดุลลดลง ส่งผลให้มีการสะสมไขมันมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม การเลี้ยงในน้ำจืดพบว่าปริมาณไขมันลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการใช้ไขมันเป็นแหล่งพลังงานผ่านกระบวนการ β-oxidation เพื่อรองรับความเครียดจากการออสโมเรกูเลชัน [31, 32].

ผลการศึกษาคุณภาพเนื้อของปลากะพงขาว พบว่าระดับความเค็มส่งผลต่อกลิ่นและกลิ่นรส โดยการเลี้ยงปลากะพงขาวที่ระดับความเค็ม 15 ppt 180 วัน มีค่ามากที่สุด ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการรายงานของ พรพิมล และคณะ [33] ได้กล่าวว่าสัตว์น้ำจืด หรือสัตว์น้ำที่เพาะเลี้ยงในสภาวะความเค็มต่ำ ประสบกับปัญหาการสะสมของกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ (off-flavor) โดยเฉพาะกลิ่นโคลน/ดิน (musty/earthy off-flavor) ซึ่งเกิดจากสารสองชนิด ได้แก่ Geosmin และ 2-methylisoborneol (MIB) ที่สร้างโดยแบคทีเรียบางสายพันธุ์ เช่น Streptomyces และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในสกุล *Oscillatoria* sp., *Anabaena* sp., *Lyngbya* sp., *Aphanizomenon* sp., *Symploca* sp. และ *Phormidium* sp.

คุณภาพน้ำระหว่างการทดลอง พบว่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำหลัก เช่น ออกซิเจนละลายน้ำ อุณหภูมิ pH และแอมโมเนีย อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลากะพงขาว อย่างไรก็ตาม ระดับไนไตรท์สูงกว่าค่าที่แนะนำ (<0.3 mg/L) แม้ว่าปลายังคงสามารถดำรงชีวิตได้ตามปกติ ซึ่งอาจเป็นผลจากการถ่ายน้ำเป็นประจำที่ช่วยลดผลกระทบของไนไตรท์

ผลการศึกษายืนยันความสามารถของปลากะพงขาวในการดำรงชีวิตในสภาพน้ำจืดตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 180 วัน อย่างไรก็ตาม การเจริญเติบโตมีแนวโน้มต่ำกว่ากลุ่มที่เลี้ยงในระดับความเค็ม 15–30 ppt จึงอาจเหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านแหล่งน้ำเค็มหรือพื้นที่เพาะเลี้ยงในแผ่นดิน แต่ผู้เพาะเลี้ยงควรคำนึงถึงผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตด้วย

จากผลการศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่า การเลือกความเค็มในการเลี้ยงอาจขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การผลิต หากมุ่งเน้นการเพิ่มผลผลิตและการเจริญเติบโต การเลี้ยงที่ 30 ppt อาจเป็นทางเลือกที่เหมาะสม ขณะที่หากมุ่งเน้นคุณภาพการบริโภคและความพึงพอใจของผู้บริโภค การเลี้ยงที่ 15 ppt อาจเป็นทางเลือกที่น่าสนใจมากกว่า ทั้งนี้ผลการศึกษายังพบว่าปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระดับความเค็ม 15 ppt มีคะแนนด้านกลิ่นและกลิ่นรสสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมของพื้นที่น้ำกร่อยในเขตทะเลสาบสงขลาที่มีความแปรผันของความเค็มตามฤดูกาล ข้อมูลดังกล่าวอาจช่วยสนับสนุนการอธิบายลักษณะเฉพาะด้าน

คุณภาพของผลิตภัณฑ์ปลากะพงขาวทะเลสาบสงขลา และเป็นข้อมูลทางวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบการผลิตภายใต้แนวคิดสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (GI) ในอนาคต

จากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่อาจทำให้ระดับความเค็มของแหล่งน้ำเพาะเลี้ยงเกิดความผันผวนมากขึ้น ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าปลากะพงขาวมีศักยภาพในการปรับตัวต่อสภาพความเค็มที่แตกต่างกันได้ในช่วงกว้าง โดยยังคงรักษาอัตราการรอดตายไว้ได้ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวอาจเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการจัดการฟาร์มและการเลือกพื้นที่เพาะเลี้ยงในอนาคต แม้ว่างานวิจัยนี้ไม่ได้ประเมินต้นทุนการผลิตโดยตรง แต่ผลการศึกษาพบว่าการลดระดับความเค็มแบบลำดับขั้นยังคงให้ผลการเจริญเติบโตใกล้เคียงกับการเลี้ยงที่ความเค็ม 30 ppt ตลอดระยะเวลาการทดลอง จึงอาจเป็นแนวทางที่ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการจัดการน้ำเลี้ยงและลดข้อจำกัดด้านการใช้น้ำเค็มในบางพื้นที่ ทั้งนี้ควรมีการศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์การผลิตเพิ่มเติมเพื่อยืนยันความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

สรุปผล

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าระดับความเค็มมีผลต่อการเจริญเติบโต คุณค่าทางโภชนาการบางส่วน และคุณภาพเนื้อบางประการ (คุณภาพทางประสาทสัมผัสของเนื้อ) ของปลากะพงขาว โดยการเลี้ยงที่ความเค็ม 30 ppt ตลอด 180 วัน ให้ผลการเจริญเติบโตและการสะสมไขมันสูงที่สุด ขณะที่การเลี้ยงที่ 15 ppt ตลอด 180 วัน ให้คะแนนด้านกลิ่นและกลิ่นรสสูงที่สุด นอกจากนี้ การลดระดับความเค็มแบบลำดับขั้นยังคงรักษาสมรรถนะการเจริญเติบโตได้ใกล้เคียงกับการเลี้ยงที่ความเค็มสูงตลอดการทดลอง

ในเชิงการประยุกต์ใช้ หากมุ่งเน้นการเจริญเติบโต ควรเลือกความเค็มประมาณ 30 ppt หากมุ่งเน้นคุณภาพเนื้อและความพึงพอใจของผู้บริโภค ควรเลือกความเค็มประมาณ 15 ppt ส่วนการเลี้ยงในช่วง 15–30 ppt อาจเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการสร้างสมดุลระหว่างประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพผลิตภัณฑ์ ดังนั้น ผลการศึกษานี้จึงสามารถใช้เป็นแนวทางในการจัดการการเลี้ยงปลากะพงขาวทั้งในบ่อดินและกระชัง โดยสำหรับการเลี้ยงในกระชัง ควรพิจารณาเก็บเกี่ยวผลผลิตในช่วงที่ความเค็มของน้ำอยู่ที่ 15 ppt ขึ้นไป เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพการผลิตที่เหมาะสม

การศึกษาในครั้งนี้มีข้อเสนอแนะ ดังนี้

1) การศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อคุณภาพเนื้อของปลากะพงขาว เช่น ระยะเวลาในการเลี้ยง การจัดการอาหาร เป็นต้น

2) การศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพเนื้อของปลากะพงขาวจากแหล่งเลี้ยงที่แตกต่างกัน ทั้งรูปแบบการเลี้ยง (กระชัง บ่อดิน) และพื้นที่เลี้ยง (ภูมิภาคที่ต่างกัน)

3) นำผลการศึกษาครั้งนี้ไปประยุกต์ใช้ในการเพาะเลี้ยงเชิงพาณิชย์ในระบบการเลี้ยงแบบปิด

4) ควรมีการทดลองในบ่อดินหรือกระชังเชิงพาณิชย์ และวิเคราะห์ต้นทุน-ผลตอบแทนของการจัดการความเค็ม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์โดยสนับสนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ผู้วิจัยขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านที่มีส่วนร่วมและให้การสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. Rimmer, MA. Cultured aquatic species fact sheets: *Lates calcarifer* (Bloch, 1790) [Centropomidae] [internet]. 2026. [1 April 2026]. https://www.fao.org/fishery/docs/DOCUMENT/aquaculture/CulturedSpecies/file/en/en_barramundi.htm
2. สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง กรมประมง. การเพาะเลี้ยงปลาทะเล. กรมประมง ; 2562. น.12. https://www4.fisheries.go.th/local/file_document/20190613095037_1_file.pdf
3. กนกอร ยางป้อม. สถานการณ์สินค้าปลากะพงขาวและผลิตภัณฑ์ในช่วง 9 เดือนแรกของปี 2568. กลุ่มเศรษฐกิจการประมง กองนโยบายและแผนพัฒนาการประมง กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2568; 1. https://www.fisheries.go.th/strategy/fisheconomic/Monthly%20report/kapong/sea%20bass%20Q3-2025.pdf
4. ฐิติมา เอียดแก้ว. สถานการณ์สินค้าปลากะพงขาวและผลิตภัณฑ์ในช่วง 6 เดือนแรกของปี 2564. กลุ่มเศรษฐกิจการประมง กองนโยบายและแผนพัฒนาการประมง กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2564. น.8. https://www.fisheries.go.th/strategy/fisheconomic/Monthly%20report/kapong/%E0%B8%81%E0%B8%B0%E0%B8%9E%E0%B8%87%E0%B8%82%E0%B8%B2%E0%B8%A7%204%2064.pdf
5. สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดสมุทรปราการ. ข้อมูลเพื่อการวางแผนพัฒนาการเกษตรและสหกรณ์รายสินค้าของจังหวัดสมุทรปราการ ประจำปีงบประมาณ 2565: ปลากะพงขาว. 2565. เอกสารเลขที่ 3/2565. น.3. https://www.opsmoac.go.th/samutprakan-dwl-files-441691791949
6. สุรเดช สดคมขำ. ชาวเกาะยอ สงขลา เลี้ยงปลากะพงในกระชัง [internet]. เทคโนโลยีชาวบ้าน. 2565 [18 ธันวาคม 2565]. https://www.khaosod.co.th/technologychaoban/featured/article_32372
7. ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรมสัตว์น้ำชายฝั่ง. รายงานคุณภาพน้ำ ตำบลเกาะยอ อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา [internet]. 2565 [1 เมษายน 2565]. https://www4.fisheries.go.th/local/index.php/main/view_blog2/1434/160333/3322
8. ฐานเศรษฐกิจดิจิทัล. จ่อขึ้นทะเบียนสินค้า GI "ปลากะพงสามน้ำเลสาบสงขลา" [internet]. 2565 [10 มิถุนายน 2565]. https://www.thansettakij.com/economy/516274
9. Zhang X, Shen Z, Qi T, Xi R, Liang X, Li L, Tang R, L Dapeng. Slight increases in salinity improve muscle quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*). Fishes. 2021; 6(1): 7. https://doi.org/10.3390/fishes6010007
10. Zhou Z, Hu F, Li W, Yang X, Hallerman E, Huang Z. Effects of salinity on growth, hematological parameters, gill microstructure and transcriptome of fat greenling *Hexagrammos otakii*. Aquaculture. 2021; 531: 735945. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735945
11. Du X, Zhang W, He J, Zhao M, Wang J, Dong X, F, Yuanyuan, X, Xudong, M, Shuyan. The impact of rearing salinity on flesh texture, taste, and fatty acid composition in largemouth bass *Micropterus salmoides*. Foods. 2022; 11: 3261. https://doi.org/10.3390/foods11203261

12. Saghafiankho S, Salati AP, Morshedi V, Ghasemi A, Bahabadi MN. Effects of different levels of salinity on NKA and NKCC expression in Asian sea bass (*Lates calcarifer*). Turk J Fish Aquat Sci. 2021; 21(1): 1-7. https://www.trjfas.org/abstract.php?id=14803
13. Wijayanto D, Bambang AN, Nugroho RA, Kurohman F, Nursanto DB. Effect of salinity on growth and benefit-cost ratio of Asian seabass reared in artificial media. AACL Bioflux. 2021; 14(5): 3000-3005. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20220052978
14. Hassan HU, Ali QM, Ahmed AE, Gabol K, Swelum AA, Masood Z, S. Mushtaq, Saeed, Y. Gul, S. Rizwan, T. Zulfiqar, M. A. M. Siddique. Growth performance and survivability of the Asian seabass *Lates calcarifer* (Bloch, 1790) reared under hyper-saline, hypo-saline and freshwater environments in a closed aquaculture system. Braz J Biol. 2022; 84: e254161. https://doi.org/10.1590/1519-6984.254161
15. AOAC. Official methods of analysis. 15th ed. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists; 1990. 194 p. https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=1929875
16. Sari LD, Fadjar M, Widodo MS, Lutfiatunnisa, Valen FS. Growth analysis of Asian seabass (*Lates calcarifer* Bloch 1790) based on morphometrics in BPBAP Situbondo, East Java. AACL Bioflux. 2020; 13: 2445-2451. https://bioflux.com.ro/docs/2020.2445-2451.pdf
17. Yusof MN, Mohd Faudzi N, Jasni NA, Nillian E, Senoo S, Ching FF. Comparisons on growth performance, survivability, organoleptic qualities and economic feasibility of Asian seabass (*Lates calcarifer*) reared in different salinities. Malays Appl Biol. 2024; 53: 127-136. https://doi.org/10.55230/mabjournal.v53i1.2723
18. Marais JFK. Routine oxygen consumption of Mugil cephalus, *Liza dumerili* and *L. richardsoni* at different temperatures and salinities. Mar Biol. 1978; 50: 9-16. https://doi.org/10.1007/BF00390537
19. Evans DH. 8 The Roles of Gill Permeability and Transport Mechanisms in Euryhalinity. Fish Physiol. 1984; 10: 239-283. https://doi.org/10.1016/S1546-5098(08)60187-9
20. Moser ML, Miller JM. Effects of salinity fluctuation on routine metabolism of juvenile spot, *Leiostomus xanthurus*. J Fish Biol. 1994; 45: 335-340. https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1994.tb01312.x
21. Tseng YC, Hwang PP. Some insights into energy metabolism for osmoregulation in fish. Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol. 2008; 148: 419-429. https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2008.04.009
22. Hersi, M.A., Genc, E., Pipilos, A. Keskin, E. 2023. Effects of dietary synbiotics and biofloc meal on the growth, tissue histomorphology, whole-body composition and intestinal microbiota profile of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured at different salinities. Aquaculture 570: 739391. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739391

23. Li, X., Shen, Y., Bao Y., et al. 2022. Physiological responses and adaptive strategies to acute low-salinity environmental stress of the euryhaline marine fish black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*). Aquaculture 554: 738117. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738117
24. Harpaz S, Hakim Y, Slosman T, Eroldogan OT. Effects of adding salt to the diet of Asian sea bass *Lates calcarifer* reared in fresh or salt water recirculating tanks, on growth and brush border enzyme activity. Aquaculture. 2005; 248: 315-324. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.03.007
25. Vargas-Chacoff L, Saavedra E, Oyarzún R, Martínez-Montaño E, P Pontigo J, Yáñez A, Ruiz-Jarabo I, M Mancera J, Ortiz E, Bertrán C. Effects on the metabolism, growth, digestive capacity and osmoregulation of juvenile Sub-Antarctic notothenioid fish *Eleginops maclovinus* acclimated to different salinities. Fish Physiol Biochem. 2015; 41(6): 1369-1381. https://link.springer.com/article/10.1007/s10695-015-0092-3
26. พิเชต พลายเพชร, อิสราภรณ์ จิตรหลัง, มนทกานติ ท้ามติ้น, สิริพร ลือชัยชัยกุล, จีรรัตน์ เกื้อแก้ว, เพ็ญศรี เมืองเยาว์, นงลักษณ์ สำราญราษฎร์, สุพิศ ทองรอด. การเจริญเติบโตและคุณภาพเนื้อของปลากะพงขาว (*Lates calcarifer* Bloch, 1790) ที่เลี้ยงด้วยปลาสดและอาหารสำเร็จรูป. ใน: การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46 สาขาประมง; 29 มกราคม-1 กุมภาพันธ์ 2551; กรุงเทพมหานคร. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2551. หน้า 156-166. https://www4.fisheries.go.th/local/file_document/20170301001543_file.pdf
27. โกมุท อุ่นศรีส่ง, สัญชัย จตุรสิทธา, ประสาน พรโสภิณ, อมรินทร์ เดชานุวัติ. คุณภาพซากและเนื้อของปลาสเตอร์เจียนที่ผลิตโดยมูลนิธิโครงการหลวง. เชียงใหม่: ภาควิชาสัตวศาสตร์และสัตว์น้ำ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2554. รายงานการวิจัยเลขที่ 3055-3907. น. 46. https://archive.lib.cmu.ac.th/full/rpf/2556/rpf56_092_full.pdf
28. Gan L, Xu ZX, Ma JJ, Xu C, Wang XD, Chen K, Q. Chen L, C. Li E. Effects of salinity on growth, body composition, muscle fatty acid composition, and antioxidant status of juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758). J Appl Ichthyol. 2016; 32: 372-374. https://doi.org/10.1111/jai.12997
29. Kumari S, Harikrishna V, Surasani VKR, Balange AK, Rani AB. Growth, biochemical indices and carcass quality of red tilapia reared in zero water discharge based biofloc system in various salinities using inland saline ground water. Aquaculture. 2021; 540: 736730. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736730
30. Xu H, Ren M, Liang H, Ge X, Ji K, Huang D, Yu Heng, Longhua Wu. Interactive effects of water salinity and dietary methionine levels on growth performance, whole-body composition, plasma parameters, and expression of major nutrient metabolism genes in juvenile genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquaculture. 2022; 546: 737381. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737381

31. Henderson RJ. Fatty acid metabolism in freshwater fish with particular reference to polyunsaturated fatty acids. Arch Anim Nutr. 1996; 49(1): 5-22. https://doi.org/10.1080/17450399609381859
32. Jarvis PL, Ballantyne JS. Metabolic responses to salinity acclimation in juvenile shortnose sturgeon *Acipenser brevirostrum*. Aquaculture. 2003(1-4); 219: 891-909. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00063-2
33. พรพิมล พิมลรัตน์, นิวุฒิ หวังชัย, ชนกันต์ จิตมนัส, หลุยส์ เลอเบล. กลิ่นโคลนในสัตว์น้ำ: ผลกระทบ สาเหตุ และการแก้ไขปัญหา (Musty/earthy off-flavor in aquatic animals: impact, causes, and solutions). วารสารวิจัย มข. 2557; 19(6): 927-938. https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/server/api/core/bitstreams/36fc7470-3719-4ee5-a0df-cd3648bca385/content



KSTi

Kalasin University
Journal of Science Technology and Innovation

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Kalasin University Journal of
Science Technology and Innovation