Kalasin University
Journal of Science Technology and Innovation

KALASIN UNIVERSITY

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Kalasin University Journal of Science Technology and Innovation



ISSN : 2821-9406 (Online)

ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม 2569)
Vol.5 No.2 (July - December 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

ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐดนย์ พรรณุเจริญวงษ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะวัชร ฝอยทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ ส่งเสริม	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.นรงค์ วิชาผา	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ ขุนลึก	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
รองศาสตราจารย์ ดร.เกศินี สราญฤทธิชัย	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล เรืองแสน	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ภัทราวดี มากมี	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต มานะธุระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา ถนอมสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สุทธิบาก	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.เพียว ผาใต้	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย รัตนสุข	มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
รองศาสตราจารย์ ดร.นนทพงษ์ พลพวก	มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.รัตนา จารุวรรโณ	มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รองศาสตราจารย์ ดร.พรนภา เกษมศิริ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย พิมหา	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวิศ ศรีจันทร์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ว่าที่ร้อยเอก ดร.คงเดช พะสีนาม	มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศราวุฒิ สุพรรณราช	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติสกลนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุจาภา นันทโพธิ์เดช	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย เหลาหา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหัสรรษ ภูจีระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรลักษณ์ พวงใบดี	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลการ ทรงศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรนาถ สุวรรณเรือง	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มัลลิกา ธีระกุล	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชินภัทร ธุระการ	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉรา ชุมพล	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาวิภา รัตนกร	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชินภัทร ธุระการ	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนูสิญจน์ สุขเสริม	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรสิทธิ์ พ่อค้า	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิกา ทองขาว	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำราญ เลิศคอนสาร วิทยาลัยพิชญบัณฑิต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุณิสา สุวรรณพันธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศธร ทองกระสี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
อาจารย์ ดร.บัญชา ล้ำเลิศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
อาจารย์ ดร.สุไพลิน พิชัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย
อาจารย์ ดร.กิตติพงษ์ อาจหาญ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
อาจารย์ สุทธิเกียรติ ภูพานไร่ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ปิญาพร ภูลายเรียบ วิทยาลัยบัณฑิตเอเซีย
นายแพทย์คมกฤษ วิเศษ โรงพยาบาลเขาวง
ดร.เยาวเรศ ก้านมะลิ โรงพยาบาลกาฬสินธุ์
เภสัชกรหญิง ศิโรรัตน์ ชูสกุล โรงพยาบาลวาปีปทุม
นางสาวบุษรินทร์ บุตรแก้ว สำนักงานเทศบาลกาฬสินธุ์
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 18 บทความ ดังนี้ 1) โมเดลเชิงสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐในประเทศไทย ผู้นิพนธ์ ผกามาศ องอาจ, ไชยยศ ไพวิทยศิริธรรม, ยุวรี ญานปรีชาเศรษฐ และ ชัยรัตน์ ศรีบุญจันทร์ 2) ผลการใช้แหนแดงอบแห้งทดแทนกากถั่วเหลืองในอาหารปลายี่สกเทศ ผู้นิพนธ์ อภิรัตน์ เอกชาติปัญญา, ณัทธิยา ชำนาญค้า, สุกัญญา คำหล้า, พัชราวลัย ศรียะศักดิ์, สุพันธ์ณี สุวรรณภักดี และ นัยนา เสนาศรี 3) พฤติกรรมการตอบสนองของระบบการควบคุมแบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัดด้วยตัวควบคุมพี พีไอ พีดี และพีไอดี ผู้นิพนธ์ สมเจตน์ บุญชื่น, ชาญณรงค์ ท้าวอาสา, วรณัฏฐ์ ช้างต่อ, ณัฐวุฒิ คำเหลือง, ทวีศักดิ์ วรจักร, พจน์ ชัยอ้าย, นัฐพงษ์ เนินชัด, ธนภูมิ เฟื่องเพียร และ อุมาพร จันธิมา 4) การพัฒนาวิธีทดสอบและการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน ผู้นิพนธ์ สุนทร ขวัญอ่อน, อังคณา ยาบา และ ผุสดี มุหะหมัด 5) ผลลัพธ์ทางคลินิกและปัจจัยที่สัมพันธ์กับระดับฮีโมโกลบินเอวันซีของผู้ป่วยโรคเบาหวานชนิดที่ 2 ณ โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลห้วยกะปิ ผู้นิพนธ์ อัมภา สีแดด 6) การพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการวิเคราะห์ปัจจัยด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (DOE) ผู้นิพนธ์ อัครพล น้ำใจดี, มีโชค มากมี, ราชัน แก้วผดุง, ศิวกร แสนขวา, พจน์ ชัยอ้าย และ ศุทธินี กล่อมแสร์ 7) การพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน ผู้นิพนธ์ นรากร สารีแหล้ และ กฤษณา ทรัพย์สิริโสภา 8) การพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อก ด้วยโปรแกรมซีร่าคอร์ ผู้นิพนธ์ สมเจตน์ บุญชื่น, สารัลย์ กระจง, วัชรพล แก้วเปี้ย, ภัณฑิรา วรรณชิด, ฐิติณัฐ ไชยกาล, สุวรรณษา ตันดี, ทวีศักดิ์ วรจักร,นัฐพงษ์ เนินชัด และ สุภัตรา ปินจันทร์ 9) การขึ้นรูปและการวิเคราะห์ลักษณะของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง ผู้นิพนธ์ ณัฐนรี เจะอาลี, ธนพงษ์ เชื้อฉุน, เพียงฤทัย บุญประสิทธิ์ และ ทิพย์วรรณ หงกะเชิญ 10) การศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนและประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องคั่วพริกแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ผู้นิพนธ์ อมร ดอนเมือง, สัณหวัจน์ ทองแดง, จรัญ มงคลวัย, อรปรียา เวียงอินทร์ และ บัญชา ล้ำเลิศ 11) ปริมาณผลได้และสมบัติของถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้า ผู้นิพนธ์ ณภัทร อาวะแสง, พีรพัฒน์ คำชูราษฎร์, จุฑามาศ พะโนราช, สายัญ พันธ์สมบูรณ์, ปิยะฉัตร วิริยะอำไพวงศ์, อัดชา เหมันต์, ภัคคิป ไกรโสดา, หอมหวน ตาสาโรจน์ และ โกศล เรืองแสน 12) อิทธิพลของความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้ต่อสมบัติทางไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด ผู้นิพนธ์ วิโรจน์ ฉัตรเกษ, ไพศาล แก่นนาดี และ มงคล กาสีวงค์ 13) ไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส ผู้นิพนธ์ จันทร์เพ็ญ ไพรแก่น, กิจธนาพัฒน์ บรรดลนพรัตน์, พิไลพร หนูทองคำ และ สุพรรณี ปริญญาวุฒิชัย 14) การออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชนโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ ผู้นิพนธ์ ระวัฒน์ คำชนะ, ไวรุจน์ อิ่มโพ และ ภาณุวัฒน์ วงค์แสงน้อย 15) การประเมินสภาพและฟื้นฟูโครงสร้างลานคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล: กรณีศึกษาลานอเนกประสงค์สาธารณะเมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี ผู้นิพนธ์ อมรชัย ใจยงค์, เพชร์รัตน์ ลิ้มสุปรียารัตน์ และ ภัทรพร พรเทพเกษมสันต์ 16) การพัฒนารูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจด้วยคลื่นสะท้อนความถี่สูงทางทรวงอกโรงพยาบาลกุมภวาปี

จังหวัดอุดรธานี ผู้นิพนธ์ พชรวรินทร์ วรรณศิลป์ และ เปรมฤดี บริบาล 17) การพัฒนาและประเมินผลแนวปฏิบัติการพยาบาลสำหรับผู้ป่วยที่ได้รับออกซิเจนอัตราการไหลสูงในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย โรงพยาบาลกุมภวาปี ผู้นิพนธ์ วิภารัตน์ สามหมอ และ เบญจวรรณ กิจควรดี 18) การพัฒนารูปแบบการพยาบาลผู้ป่วยนอกเพื่อสนับสนุนบริการ Tele-Urology โรงพยาบาลพยัคฆภูมิพิสัย จังหวัดมหาสารคาม ผู้นิพนธ์ อนงค์ จันทศิลป์, ชญาภา เยยโพธิ์ และ จิตรา สุวรรณพันธ์

บทความในฉบับนี้มาจากนักวิจัยและนักวิชาการที่มีความหลากหลายสังกัด โดยทุกบทความทั้งหมดได้ผ่านการกลั่นกรองและพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Reviewers) จำนวน 3 คน ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญที่มาจากหลากหลายหน่วยงานเป็นผู้พิจารณาเพื่อความสมบูรณ์ของบทความ และแจ้งให้ผู้นิพนธ์นำบทความไปปรับปรุงแก้ไขให้เป็นการเรียบร้อยก่อนเข้าสู่กระบวนการตีพิมพ์เผยแพร่ของวารสาร

ในโอกาสนี้ ขอขอบคุณคณาจารย์ นักวิชาการ นักศึกษา และผู้สนใจทุกท่านที่ให้ความสนใจร่วมส่งบทความเผยแพร่ในวารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ และขอขอบคุณ กองบรรณาธิการ คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประเมินและตรวจสอบบทความทุกท่านมา ณ โอกาสนี้



(รองศาสตราจารย์ ดร.เกยูร ดวงอุปมา)
บรรณาธิการ

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม 2569)

ข้อมูลเกี่ยวกับวารสาร ก

กองบรรณาธิการ ค

บทบรรณาธิการ จ

บทความ

โมเดลเชิงสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐในประเทศไทย 1-17

ผกามาศ องอาจ
ไชยยศ ไพวิทยศิริธรรม
ยุวรี ญานปรีชาเศรษฐ
ชัยรัตน์ ศรีบุญจันทร์

ผลการใช้แหนแดงอบแห้งทดแทนกากถั่วเหลืองในอาหารปลายี่สกเทศ 18-35

อภิรัตน์ เอกชาติปัญญา
ณัทธิยา ชำนาญค้า
สุกัญญา คำหล้า
พัชราวลัย ศรียะศักดิ์
สุพันธ์ณี สุวรรณภักดี
นัยนา เสนาศรี

พฤติกรรมการตอบสนองของระบบการควบคุมแบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัดด้วยตัวควบคุมพี พีไอ พีดี และพีไอดี 36-50

สมเจตน์ บุญชื่น
ชาญณรงค์ ท้าวอาสา
วรณัฏฐ์ ช้างต่อ
ณัฐวุฒิ คำเหลือง
ทวีศักดิ์ วรจักร
พจน์ ชัยอ้าย
นัฐพงษ์ เนินชัด
ธนภูมิ เฟื่องเพียร
อุมาพร จันธิมา

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม 2569)

การพัฒนาวิธีทดสอบและการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน 51-67

สุนทร ขวัญอ่อน
อังคณา ยาบา
ผุสดี มุหะหมัด

ผลลัพธ์ทางคลินิกและปัจจัยที่สัมพันธ์กับระดับฮีโมโกลบิลเอวันซีของผู้ป่วยโรคเบาหวานชนิดที่ 2 ณ โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลห้วยกะปิ 68-85

อัมภา สีแดด

การพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการวิเคราะห์ปัจจัยด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (DOE) 86-100

อัครพล น้ำใจดี
มีโชค มากมี
ราชัน แก้วผดุง
ศิวกร แสนขวา
พจน์ ชัยอ้าย
ศุทธินี กล่อมแสร์

การพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน 101-114

นรากร สารีแหล้
กฤษณา ทรัพย์สิริโสภา

การพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อก ด้วยโปรแกรมซีร่าคอร์ 115-127

สมเจตน์ บุญชื่น
สารัลย์ กระจง
วัชรพล แก้วเปี้ย
ภัณฑิรา วรรณชิด
ฐิติณัฐ ไชยกาล
สุวรรณษา ตันดี
ทวีศักดิ์ วรจักร
นัฐพงษ์ เนินชัด
สุภัตรา ปินจันทร์

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม 2569)

การขึ้นรูปและการวิเคราะห์ลักษณะของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง 128-143

ณัฐนรี เจะอาลี
ธนพงษ์ เชื้อฉุน
เพียงฤทัย บุญประสิทธิ์
ทิพย์วรรณ หงกะเชิญ

การศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนและประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องคั่วพริกแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน 144-158

อมร ดอนเมือง
สัณหวัจน์ ทองแดง
จรัญ มงคลวัย
อรปรียา เวียงอินทร์
บัญชา ล้ำเลิศ

ปริมาณผลได้และสมบัติของถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้า 159-168

ณภัทร อาวะแสง
พีรพัฒน์ คำชูราษฎร์
จุฑามาศ พะโนราช
สายัญ พันธ์สมบูรณ์
ปิยะฉัตร วิริยะอำไพวงศ์
อัดชา เหมันต์
ภัคคิป ไกรโสดา
หอมหวน ตาสาโรจน์
โกศล เรืองแสน

อิทธิพลของความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้ต่อสมบัติทางไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด 169-182

วิโรจน์ ฉัตรเกษ
ไพศาล แก่นนาดี
มงคล กาสีวงค์

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม 2569)

ไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส 183-199

จันทร์เพ็ญ ไพรแก่น
กิจธนาพัฒน์ บรรดลนพรัตน์
พิไลพร หนูทองคำ
สุพรรณี ปริญญาวุฒิชัย

การออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชนโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ 200-215

ระวัฒน์ คำชนะ
ไวรุจน์ อิ่มโพ
ภาณุวัฒน์ วงค์แสงน้อย

การประเมินสภาพและฟื้นฟูโครงสร้างลานคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล: กรณีศึกษาลานอเนกประสงค์สาธารณะเมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี 216-231

อมรชัย ใจยงค์
เพชร์รัตน์ ลิ้มสุปรียารัตน์
ภัทรพร พรเทพเกษมสันต์

การพัฒนารูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจด้วยคลื่นสะท้อนความถี่สูงทางทรวงอก โรงพยาบาลกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี 232-247

พชรวรินทร์ วรรณศิลป์
เปรมฤดี บริบาล

การพัฒนาและประเมินผลแนวปฏิบัติการพยาบาลสำหรับผู้ป่วยที่ได้รับออกซิเจนอัตราการไหลสูง ในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย โรงพยาบาลกุมภวาปี 248-265

วิภารัตน์ สามหมอ
เบญจวรรณ กิจควรดี

การพัฒนารูปแบบการพยาบาลผู้ป่วยนอกเพื่อสนับสนุนบริการ Tele-Urology โรงพยาบาลพยัคฆภูมิพิสัย จังหวัดมหาสารคาม 266-281

อนงค์ จันทศิลป์
ชญาภา เยยโพธิ์
จิตรา สุวรรณพันธ์

บทความวิจัย (Research Article)

โมเดลเชิงสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา ของพยาบาลภาครัฐในประเทศไทย

A Causal Model of Factors Affecting Government Nurses' Intentions to Use Artificial Intelligence for Counseling in Thailand

ผกามาศ องอาจ[1*] ไชยยศ ไพวิทยศิริธรรม[1] และ ยุวรี ญานปรีชาเศรษฐ์[1]
Pagamart ONG-ART[1*], Chaiyos Paiwithayasiritham[1] and Yuwaree Yanprechaset[1]
[1]คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
[1]Master of Education, Silpakorn University
*Corresponding author; email: pakashiro2520@gmail.com

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
26 พฤษภาคม 2569	22 มิถุนายน 2569	22 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ เพื่อพัฒนาและตรวจสอบความสอดคล้องของโมเดลเชิงสาเหตุ และ เพื่อศึกษาอิทธิพลทางตรงและทางอ้อมต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐ เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย เป็นแบบสอบถามผ่านตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือโดยผู้เชี่ยวชาญ 3 คน ทุกข้อคำถามมีค่าดัชนีความสอดคล้องอยู่ระหว่าง 0.67-1.00 วิเคราะห์ความเชื่อมั่น ได้ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาช = .935-.968 เก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถามออนไลน์ กับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 396 คน โดยการสุ่มแบบหลายขั้นตอน ตามสัดส่วนของแต่ละโรงพยาบาล วิเคราะห์ข้อมูลด้วยค่าคะแนนเฉลี่ย วิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้างด้วยโปรแกรมลิสเรล ผลการวิจัย พบว่า โมเดลเชิงสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐ สอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ ค่า χ^2 = 22.18, df = 19, p = 0.28, χ^2 /df = 1.17, RMSEA = 0.02, RMR = 0.01 และ CFI = 1.00 เมื่อพิจารณาขนาดของอิทธิพลรวม อิทธิพลทางตรง และอิทธิพลทางอ้อม พบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลรวมสูงที่สุด ได้แก่ ตัวแปรปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม มีค่าอิทธิพลรวมเท่ากับ 0.94 รองลงมาได้แก่ ตัวแปรปัจจัยด้านบุคคล มีค่าอิทธิพลรวมเท่ากับ 0.13 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ตามลำดับ ตัวแปรที่มีอิทธิพลทางตรงสูงที่สุด ได้แก่ ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม มีค่าอิทธิพลทางตรงเท่ากับ 0.85 รองลงมา คือ ตัวแปรปัจจัยด้านบุคคล มีค่าอิทธิพลทางตรงเท่ากับ 0.67 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ตามลำดับ ตัวแปรที่มีอิทธิพลทางอ้อมสูงที่สุด ได้แก่ ตัวแปรปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม มีอิทธิพลทางอ้อมผ่านปัจจัยด้านบุคคล มีขนาดอิทธิพลเท่ากับ 0.09 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ทั้งนี้ความแปรปรวนของความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐ ของตัวแปรปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) และปัจจัยด้านบุคคล (PEF) อธิบายความแปรปรวนของความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (OBI) ได้ 90 %

คำสำคัญ: โมเดลเชิงสาเหตุ, ความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา, ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา

Abstract

This study aimed to develop and validate a causal model and to examine the direct and indirect effects of factors influencing nurses' intention to use artificial intelligence (AI) for counseling. The research instrument was a questionnaire whose content validity was evaluated by three experts. The Item–Objective Congruence (IOC) indices for all items ranged from 0.67 to 1.00. The reliability of the instrument was assessed using Cronbach's alpha coefficients ranging from .935 to .968. Data were collected through an online questionnaire administered to 396 public-sector nurses selected using a proportionate multistage sampling technique. Descriptive statistics, including mean scores, were used for data analysis. Structural Equation Modeling (SEM) was conducted using LISREL software to test the proposed causal model.

The findings indicated that the proposed causal model fit the empirical data well (χ^2 = 22.18, df = 19, p = .28, χ^2/df = 1.17, RMSEA = .02, RMR = .01, and CFI = 1.00). Regarding total effects, environmental factors exhibited the strongest influence on nurses' intention to use AI for counseling (TE = .94), followed by personal factors (TE = .13), both of which were statistically significant at the .01 level. In terms of direct effects, environmental factors exerted the greatest direct influence (DE = .85), followed by personal factors (DE = .67), with both effects reaching statistical significance at the .01 level. Regarding indirect effects, environmental factors had the strongest indirect influence through personal factors, with an effect size of .09, which was statistically significant at the .01 level. Together, environmental factors (ENV) and personal factors (PEF) explained 90% of the variance in public-sector nurses' intention to use AI for counseling (OBI).

Keywords: Causal Modeling, Intention to Use AI for Counseling, AI for Counseling

บทนำ

ในศตวรรษที่ 21 เทคโนโลยีดิจิทัล โดยเฉพาะเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญและเปลี่ยนแปลงระบบบริการสุขภาพเข้าสู่ระบบดิจิทัลอย่างเป็นระบบ นอกจากนี้ระบบสุขภาพทั่วโลกยังเผชิญปัญหาขาดแคลนพยาบาล แม้จะผลิตพยาบาลเพิ่มจาก 27.9 ล้านคนในปี 2018 เป็น 29.8 ล้านคนในปี 2023 พบว่ายังไม่เพียงพอต่อความต้องการ โดยพบว่ามีการขาดแคลนสูงถึง 12.9 ล้านคน [1-2] ส่งผลให้พยาบาลที่อยู่ในระบบบริการสาธารณสุขมีภาระงานมากขึ้น เกิดความเหนื่อยล้าจากการทำงาน และอัตราการลาออกเพิ่มขึ้น ส่งผลกระทบต่อระบบบริการสุขภาพอย่างยิ่ง [2] ภาระงานบางส่วนใช้เวลาไปกับงานบันทึกข้อมูลด้านสุขภาพและงานบริหารต่างๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการดูแลผู้ป่วยโดยตรง [3] ส่งผลต่อประสิทธิภาพคุณภาพบริการ และความปลอดภัยผู้ป่วย การนำปัญญาประดิษฐ์มาใช้เพื่อให้คำปรึกษาซึ่งเป็นแชทบอท (Chatbot) เป็นโปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่อจำลองการสนทนากับมนุษย์ ผ่านเสียงหรือข้อความ เพื่อประเมิน วิเคราะห์ และให้คำแนะนำหรือคำปรึกษาทางสุขภาพอัตโนมัติแก่ผู้รับบริการ โดยไม่ต้องอาศัยผู้ให้คำปรึกษามนุษย์โดยตรงจะช่วยวิเคราะห์ข้อมูลทางคลินิก เพิ่มความแม่นยำในการบันทึกข้อมูล ช่วยลดภาระงาน และพยาบาลมีเวลาดูแลผู้ป่วยเพิ่มมากขึ้น [4–5]

ในบริบทประเทศไทย มีการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในระบบบริการสาธารณสุขเพิ่มมากขึ้น ภายใต้นโยบายของรัฐบาลที่สนับสนุนการใช้เทคโนโลยี เพื่อดูแลและติดตามผู้ป่วย [6] นอกจากนี้การนำปัญญาประดิษฐ์มาใช้ให้คำปรึกษาทางการพยาบาล จะช่วยแก้ไขปัญหาภาระงานที่หนักของพยาบาล ลดอัตราการลาออก ซึ่งเป็นสาเหตุของการขาดแคลนพยาบาล ผู้ป่วยเข้าถึงการบริการได้อย่างทันท่วงที ลดเวลารอคอยเพิ่มคุณภาพการบริการภายใต้มาตรฐานวิชาชีพ และผู้รับบริการมี

ความปลอดภัยและความพึงพอใจยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม ในบริบทของภาครัฐยังเผชิญกับความท้าทาย จากปัญหาภาระงานที่หนัก จากการขาดแคลนอัตรากำลัง อีกทั้งปัญหาด้านสมรรถนะดิจิทัลของพยาบาล ปัญหาการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล กฎหมายและจริยธรรม ที่เกี่ยวข้อง [7] ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา ผู้วิจัยสังเคราะห์ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำปัญญาประดิษฐ์มาใช้ให้คำปรึกษาทางการพยาบาล นำมาใช้ในตัวแปรหลักจากโมเดล โดยมีแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 5 ทฤษฎี คือ 1) ทฤษฎีรวมของการยอมรับและการใช้เทคโนโลยี (Unified Theory of Acceptance and Use of Technology: UTAUT) [7-10] ใช้อธิบายตัวแปรตามและทำนายพฤติกรรมความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา อธิบายตัวแปร 3 ด้าน คือ ความคาดหวังด้านประสิทธิภาพ (Performance Expectancy) ความคาดหวังด้านความง่ายในการใช้ (Effort Expectancy) และ อิทธิพลทางสังคม (Social Influence) 2) ทฤษฎีความสามารถของตนเอง (Self-Efficacy) อธิบายตัวแปร 1 ด้าน คือ ประสบการณ์ในการใช้งาน (Experience) เป็นความสามารถของบุคคลที่ส่งผลต่อแรงจูงใจ ความรู้สึก ความคิด และพฤติกรรมของบุคคลที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา 3) สมรรถนะดิจิทัล (Digital Competency) อธิบายตัวแปร 1 ด้าน เป็นแนวคิดที่บ่งชี้ว่าพยาบาลมีความรู้ ทักษะและทัศนคติที่จำเป็นในการใช้งานเครื่องมือปัญญาประดิษฐ์ จะส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา 4) กรอบแนวคิดเทคโนโลยี–องค์กร–สิ่งแวดล้อม (Technology–Organization–Environment Framework :TOE) อธิบายตัวแปร 2 ด้าน คือ อิทธิพลทางสังคม (Social Influence) และ นโยบายขององค์กร (Organizational) และ 5) กฎหมาย จริยธรรมและสิทธิผู้ป่วย (Law and Ethics) อธิบายตัวแปร 1 ด้าน โดยนำตัวแปรมาคัดสรรด้วยวิธีการสังเคราะห์จากแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้ปัจจัยที่ส่งผล ความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาล 2 ด้าน คือ 1) ปัจจัยด้านบุคคล และ 2) ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม และพัฒนาโมเดลเชิงสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐในประเทศไทย ที่ครอบคลุมทั้งปัจจัยด้านบุคคลและปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม โดยเลือกศึกษากับพยาบาลภาครัฐในโรงพยาบาลต่างๆ ทั่วประเทศไทย ในบริบทที่หลากหลาย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาและตรวจสอบความสอดคล้องของโมเดลเชิงสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐ
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลทางตรงและทางอ้อมต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐ

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative research) เพื่อพัฒนาโมเดลเชิงสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐในประเทศไทย และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา นำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ข้อมูลโมเดลสมการโครงสร้างด้วยโปรแกรมลิสเรล

ประชากร ได้แก่ พยาบาลวิชาชีพที่ปฏิบัติงานในโรงพยาบาล สังกัดกระทรวงสาธารณสุข จาก 4 โรงพยาบาล ได้แก่ โรงพยาบาลน่าน, โรงพยาบาลนครปฐม, โรงพยาบาลร้อยเอ็ด และ โรงพยาบาลสิเกา มีจำนวน 2,536 คน

กลุ่มตัวอย่าง กำหนดกลุ่มตัวอย่างตามหลักการวิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้าง (LISREL) ใช้ขนาดตัวอย่าง โดยอ้างอิงข้อเสนอของ Hair และคณะ[11] ที่แนะนำให้ใช้ขนาดตัวอย่าง 5–20 คนต่อพารามิเตอร์ งานวิจัยนี้มีจำนวนพารามิเตอร์ 24 ค่า ผู้วิจัยกำหนดที่ 15 คนต่อพารามิเตอร์ ได้ขนาดกลุ่มตัวอย่าง 360 คน และเพิ่มอีก 10 % เพื่อป้องกันการสูญหายของข้อมูล รวมเป็น 396 คน

การสุ่มตัวอย่างใช้วิธีการสุ่มแบบหลายขั้นตอน (Multi-stage random sampling) ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1) สุ่มเขตสุขภาพจาก 13 เขต เลือกจำนวน 4 เขต ได้แก่ เขต 1, 5, 7 และ 12 2) สุ่มจังหวัดในแต่ละเขต เขตละ 1 จังหวัด ได้แก่

น่าน นครปฐม ร้อยเอ็ด และตรัง 3) สุ่มโรงพยาบาลจังหวัดละ 1 แห่ง ได้แก่ โรงพยาบาลน่าน โรงพยาบาลนครปฐม โรงพยาบาลร้อยเอ็ด และโรงพยาบาลสิเกา และ 4) สุ่มพยาบาลในแต่ละโรงพยาบาลด้วยวิธีแบ่งชั้นตามสัดส่วนจากจำนวนประชากรทั้งหมด 2,536 คน และสุ่มอย่างง่ายให้ได้กลุ่มตัวอย่าง 396 คน ผลการเก็บข้อมูลได้รับแบบสอบถามกลับคืนจำนวน 396 ฉบับ คิดเป็น 100 % และผ่านการตรวจสอบความครบถ้วนสมบูรณ์เพื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูล

การพิทักษ์สิทธิ์กลุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยทำหนังสือขอรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์จาก คณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ โรงพยาบาลเมตตาประชารักษ์ (วัดไร่ขิง) โครงการวิจัยที่ COA No 006/2569 การขอความยินยอมเข้าร่วมวิจัย เก็บรวบรวมข้อมูลระบบออนไลน์ (Google Form) โดยในหน้าแรกแสดงเอกสารชี้แจงรายละเอียดการวิจัย ครอบคลุมวัตถุประสงค์ ขั้นตอนการวิจัย สิทธิของผู้เข้าร่วม การรักษาความลับ และข้อมูลติดต่อผู้วิจัย ผู้เข้าร่วมต้องอ่านและกด “ยินยอมเข้าร่วมวิจัย” ก่อนจึงจะสามารถเข้าถึงแบบสอบถามได้ หากไม่ยินยอม ระบบจะไม่แสดงแบบสอบถามและยุติการเข้าร่วมโดยอัตโนมัติ ระบบมีการบันทึกการให้ความยินยอมเป็นหลักฐาน ทั้งนี้ผู้วิจัยจะไม่นำความลับไปเปิดเผยและนำเสนอผลการวิจัยเป็นภาพรวม

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย แบ่งเป็น 4 ตอน ดังนี้ **ตอนที่ 1** แบบสอบถามเกี่ยวกับข้อมูลทั่วไป เป็นคำถามแบบตรวจสอบรายการ (Check List) จำนวน 5 ข้อ ประกอบด้วย เพศ อายุ วุฒิการศึกษา ตำแหน่งปัจจุบัน และประสบการณ์ในการทำงาน **ตอนที่ 2** แบบสอบถามปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา เป็นคำถามแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) มี 5 ระดับ ตามแนวทางของลิเคิร์ท (Likert) จำนวน 39 ข้อ **ตอนที่ 3** แบบสอบถามวัดความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา มีลักษณะเป็นมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Rating Scale) ตามแนวทางของลิเคิร์ท (Likert) จำนวน 6 ข้อ **ตอนที่ 4** ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

การเก็บรวบรวมข้อมูล มีการเก็บรวบรวมข้อมูลดังนี้ 1) ผู้วิจัยศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กำหนดตัวชี้วัดและนิยามศัพท์เฉพาะของปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาล โดยแบ่ง พฤติกรรมความตั้งใจ ออกเป็น 2 ตัวแปร คือ 1) ความตั้งใจเชิงพฤติกรรมภายนอก (Overt Behavior) คือ การกระทำที่เกิดขึ้นจนบุคคลอื่นสามารถสังเกตได้ ได้แก่ การใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาจริง 2) ความตั้งใจเชิงพฤติกรรมภายใน (Covert Behavior) คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในจิตใจ บุคคลอื่นไม่สามารถสังเกตได้ ได้แก่ การวางแผนหรือคาดว่าจะใช้ และปัจจัยที่ส่งผลต่อการความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา แบ่งเป็น 2 ด้าน ได้แก่ ปัจจัยด้านบุคคล จากแนวคิด UTAUT [9-10], ทฤษฎี Self-Efficacy และ แนวคิดสมรรถนะดิจิทัล ประกอบด้วย 4 ตัวแปร ได้แก่ ความคาดหวังด้านประสิทธิภาพ (Performance Expectancy) ความคาดหวังด้านความง่ายในการใช้ (Effort Expectancy) ประสบการณ์ในการใช้งาน (Experience) สมรรถนะด้านดิจิทัล (Digital Competence) และ ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม จากทฤษฎี TOE และกฎหมายและจริยธรรม ประกอบด้วย 3 ตัวแปร ได้แก่ อิทธิพลทางสังคม (Social Influence) นโยบายขององค์กร (Organizational Policy) และกฎหมายและจริยธรรม (Law and Ethics) 2) สร้างแบบสอบถามและตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน ใช้ดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (IOC) ผู้วิจัยปรับปรุงตามข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ และคัดเลือกข้อคำถามที่มีค่าดัชนีความสอดคล้องอยู่ระหว่าง 0.67-1.00 3) นำไปทดลองใช้ (Try Out) กับพยาบาล ที่ไม่ใช่กลุ่มตัวอย่าง จำนวน 30 คน ได้ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient) = .935-.968 และ 4) จากนั้นนำแบบสอบถามที่ผ่านการตรวจสอบแล้ว เก็บรวบรวมข้อมูลระบบออนไลน์ (Google Form) กับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 396 คน

ผลการวิจัย

ผู้วิจัยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยนำข้อมูลที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 396 คน มาสร้างเป็นตัวแปรสังเกตได้ทั้ง 9 ตัวแปร จากข้อคำถามในแบบสอบถาม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา จำนวน 39 ข้อ และ ข้อคำถามเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา จำนวน 6 ข้อ มาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเลขคณิต และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย ค่าความเบ้และค่าความโด่ง รายละเอียดดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานของการวิจัย

การนำเสนอผลการวิเคราะห์ค่าสถิติพื้นฐาน ประกอบด้วย จำนวนและร้อยละของกลุ่ม ตัวอย่าง ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย ค่าความเบ้และ ค่าความโด่งของตัวแปรสังเกตได้

1.1 จำนวนและร้อยละของกลุ่มตัวอย่าง

ผู้วิจัยเก็บรวบรวมข้อมูลกับพยาบาลวิชาชีพ ที่สังกัดกระทรวงสาธารณสุขในประเทศไทย ปี 2568 จำนวน 396 คน โดยแสดงข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่างเป็นจำนวนและร้อยละจำแนกตามรายละเอียด ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำนวนและร้อยละข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง

ข้อมูลทั่วไป		จำนวน (n=396)	ร้อยละ
โรงพยาบาล	โรงพยาบาลนครปฐม	135	34.09
	โรงพยาบาลน่าน	96	24.24
	โรงพยาบาลร้อยเอ็ด	159	40.15
	โรงพยาบาลสิเกา	6	1.52
เพศ	ชาย	18	4.55
	หญิง	378	95.45
อายุ	20-30 ปี	114	28.79
	31-40 ปี	134	33.84
	41-50 ปี	77	19.44
	51-60 ปี	71	17.93
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี	379	95.71
	ปริญญาโท	17	4.30
ตำแหน่งปัจจุบัน	พยาบาลวิชาชีพปฏิบัติการ	118	29.80
	พยาบาลวิชาชีพชำนาญการ	206	52.02
	พยาบาลวิชาชีพชำนาญการพิเศษ	67	16.92
	พยาบาลวิชาชีพเชี่ยวชาญ	5	1.26
ประสบการณ์ในการทำงาน	1-5 ปี	40	10.10
	6-10 ปี	74	18.69
	11-15 ปี	58	14.65
	16-20 ปี	74	18.69
	21-25 ปี	46	11.62
	26-30 ปี	71	17.93
	มากกว่า 30 ปี	33	8.33

จากตารางที่ 1 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย คือ พยาบาลวิชาชีพ ที่สังกัดกระทรวงสาธารณสุขในประเทศไทย ปี 2568 จำนวน 4 โรงพยาบาล (รพ.นครปฐม รพ.น่าน รพ.ร้อยเอ็ด และรพ.สิเกา) จำนวน 396 คน โดยกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นโรงพยาบาลร้อยเอ็ด จำนวน 159 คน คิดเป็น 40.15 % รองลงมาคือ โรงพยาบาลนครปฐม จำนวน 135 คน คิดเป็น 34.09 % โรงพยาบาลน่าน จำนวน 96 คน คิดเป็น 24.24 % และโรงพยาบาลสิเกา จำนวน 6 คน คิดเป็น 1.52 % เป็นเพศหญิง

จำนวน 378 คน คิดเป็น 95.45 % รองลงมาคือ เป็นเพศชาย จำนวน 18 คน คิดเป็น 4.55 % มีอายุ 31-40 ปี จำนวน 134 คน คิดเป็น 33.84 % รองลงมาคือ อายุ 20-30 ปี จำนวน 114 คน คิดเป็น 28.79% อายุ 41-50 ปี จำนวน 77 คน คิดเป็น 19.44 % และอายุ 51-60 ปี จำนวน 71 คน คิดเป็น 17.93 % มีวุฒิการศึกษาปริญญาตรี จำนวน 379 คน คิดเป็น 95.71 % รองลงมาคือ วุฒิการศึกษาปริญญาโท จำนวน 17 คน คิดเป็น 4.30 % มีตำแหน่งปัจจุบันเป็น พยาบาลวิชาชีพชำนาญการ จำนวน 206 คน คิดเป็น 52.02 % รองลงมาคือ พยาบาลวิชาชีพปฏิบัติการ จำนวน 118 คน คิดเป็น 29.80 % พยาบาลวิชาชีพชำนาญการพิเศษ จำนวน 67 คน คิดเป็น 16.92 % และพยาบาลวิชาชีพเชี่ยวชาญ จำนวน 5 คน คิดเป็น 1.26 % และมีประสบการณ์ในการทำงาน 6-10 ปี และ 16-20 ปี จำนวน 74 คน คิดเป็น 18.69% เท่ากัน รองลงมาคือ ประสบการณ์ในการทำงาน 26-30 ปี จำนวน 71 คน คิดเป็น 17.93 % ประสบการณ์ในการทำงาน 11-15 ปี จำนวน 58 คน คิดเป็น 14.65 % ประสบการณ์ในการทำงาน 21-25 ปี จำนวน 46 คน คิดเป็น 11.62 % ประสบการณ์ในการทำงาน 1-5 ปี จำนวน 40 คน คิดเป็น 10.10 % และประสบการณ์ในการทำงาน มากกว่า 30 ปี จำนวน 33 คน คิดเป็น 8.33 %

1.2 ค่าสถิติพื้นฐานของตัวแปรสังเกตได้

ผู้วิจัยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลกับพยาบาลวิชาชีพ ที่สังกัดกระทรวงสาธารณสุข ในประเทศไทย โดยนำข้อมูล ที่ได้จากตัวอย่าง จำนวน 396 คน มาสร้างเป็นตัวแปรสังเกตได้ทั้ง 9 ตัวแปร จากข้อคำถาม ตอนที่ 2 ข้อคำถามเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา จำนวน 39 ข้อ และ ข้อคำถามตอนที่ 3 ข้อคำถามเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา จำนวน 6 ข้อ มาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเลขคณิต และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย ค่าความเบ้และค่าความโด่ง รายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยเลขคณิต และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสังเกตได้

ตัวแปร	*M*	*SD*	ความหมาย	*CV (%)*	*Sk*	*Ku*
ปัจจัยด้านบุคคล						
1. ความคาดหวังด้านประสิทธิภาพ	4.23	0.36	มาก	8.60	-0.89	1.56
2. ความคาดหวังด้านความง่ายในการใช้	3.32	0.35	ปานกลาง	10.43	0.02	1.21
3. ประสบการณ์ในการใช้งาน	3.25	0.32	ปานกลาง	9.78	0.03	0.33
4. สมรรถนะด้านดิจิทัล	3.68	0.25	มาก	6.90	-0.50	2.71
ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม						
1. อิทธิพลทางสังคม	3.72	0.45	มาก	12.13	-0.60	1.51
2. นโยบายขององค์กร	3.76	0.39	มาก	10.33	-0.65	2.58
3. กฎหมายและจริยธรรม	3.71	0.41	มาก	10.96	-0.72	4.04
ความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์						
1. พฤติกรรมภายนอก	3.46	0.55	ปานกลาง	15.83	0.04	-0.25
2. พฤติกรรมภายใน	3.57	0.51	มาก	14.20	-0.22	0.55

จากตารางที่ 2 พบว่า ปัจจัยด้านบุคคล ประกอบด้วยตัวแปรสังเกตได้ 4 ตัวแปร ได้แก่ ความคาดหวังด้านประสิทธิภาพ ความคาดหวังด้านความง่ายในการใช้ ประสบการณ์ในการใช้งาน และสมรรถนะดิจิทัล พบว่า กลุ่มตัวอย่างมีปัจจัยด้านบุคคลอยู่ในระดับมาก 2 ตัวแปร และอยู่ในระดับปานกลาง 2 ตัวแปร มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.25 – 4.23 และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน อยู่ในช่วง 0.25 – 0.36 เมื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 6.90 – 10.43 แสดงว่า

ค่าเฉลี่ยที่ได้มีความเป็นตัวแทนของกลุ่มตัวอย่าง และเมื่อพิจารณา ค่าความเบ้และความโด่ง พบว่า มีค่าความเบ้ อยู่ในช่วง -0.89 ถึง 0.03 ค่าความโด่ง อยู่ในช่วง 0.33 ถึง 2.71 แสดงว่า ตัวแปรสังเกตได้ทั้ง 4 ตัวแปร มีลักษณะการแจกแจงใกล้เคียงกับโค้งปกติ

ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ประกอบด้วยตัวแปรสังเกตได้ 3 ตัวแปร ได้แก่ อิทธิพลทางสังคมนโยบายขององค์กร และกฎหมายและจริยธรรม พบว่า กลุ่มตัวอย่างมีปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม อยู่ใน ระดับมากทั้ง 3 ตัวแปร มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.71 – 3.76 และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ ในช่วง 0.39 – 0.45 เมื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 10.33 – 12.13 แสดงว่า ค่าเฉลี่ยที่ได้มีความเป็นตัวแทนของกลุ่มตัวอย่าง และเมื่อพิจารณาค่าความเบ้และความโด่ง พบว่า มีค่าความเบ้ อยู่ในช่วง -0.60 ถึง -0.72, ค่าความโด่ง อยู่ในช่วง 1.51-4.04 แสดงว่า ตัวแปรสังเกตได้ทั้ง 3 ตัวแปร มีลักษณะการแจกแจงใกล้เคียงกับโค้งปกติ

ความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ ประกอบด้วยตัวแปรสังเกตได้ 2 ตัวแปร ได้แก่ พฤติกรรมภายนอก และพฤติกรรมภายใน พบว่า กลุ่มตัวอย่างมีความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ อยู่ในระดับมาก1 ตัวแปร และอยู่ในระดับปานกลาง 1 ตัวแปร มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.46 – 3.57 และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 0.51 – 0.55 เมื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 14.20 – 15.83 แสดงว่า ค่าเฉลี่ย ที่ได้มีความเป็นตัวแทนของกลุ่มตัวอย่าง และเมื่อพิจารณาค่าความเบ้และความโด่ง พบว่า มีค่าความเบ้ อยู่ในช่วง -0.22 ถึง 0.04 ค่าความโด่ง อยู่ในช่วง -0.25 ถึง 0.55 แสดงว่า ตัวแปรสังเกตได้ทั้ง 2 ตัวแปร มีลักษณะการแจกแจงใกล้เคียงกับโค้งปกติ

จากนั้นตรวจสอบเมื่อนำค่าความเบ้ (Sk) และค่าความโด่ง (Ku) ของตัวแปรสังเกตได้มาพิจารณา พบว่าค่าความเบ้ของทุกตัวแปรอยู่ในช่วงประมาณ -0.89 ถึง 0.04 และค่าความโด่งอยู่ในช่วงประมาณ -0.25 ถึง 4.04 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ สำหรับการวิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้าง แสดงว่าการแจกแจงของตัวแปรมีลักษณะเข้าใกล้โค้งปกติ ประกอบกับค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (CV) อยู่ในช่วง 6.90–15.83 สะท้อนว่าค่าเฉลี่ยมีความเป็นตัวแทนของกลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสม จึงสนับสนุนความเหมาะสมในการนำข้อมูลไปใช้วิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้างด้วยโปรแกรมลิสเรล

ตอนที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความตรงเชิงโครงสร้างของโมเดลการวัดปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐ

2.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการวัดปัจจัยด้านบุคคล (PEF)

จากการวิเคราะห์โมเดลการวัดตัวแปรแฝงของปัจจัยด้านบุคคล (PEF) ประกอบด้วยตัวแปรสังเกตได้จำนวน 4 ตัวแปร ได้แก่ ความคาดหวังด้านประสิทธิภาพ (PEX) ความคาดหวังด้านความง่ายในการใช้ (EEX) ประสบการณ์ในการใช้งาน (EXP) และความสามารถทางด้านดิจิทัลหรือสมรรถนะดิจิทัล (DIC) โดยผู้วิจัยได้วิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสังเกตได้แบบจำลองการวัดปัจจัยด้านบุคคล

	PEX	EEX	EXP	DIC
PEX	1			
EEX	0.78**	1		
EXP	0.78**	0.79**	1	
DIC	0.73**	0.79**	0.76**	1
M	4.23	3.32	3.25	3.68
S.D.	0.36	0.35	0.32	0.25
Bartlett's test of sphericity Chi-Square 1339.48, df = 6, p = 0.01, KMO = 0.85				

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

จากตารางที่ 3 ผู้วิจัยทำการตรวจสอบค่าสหสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทั้ง 4 องค์ประกอบของปัจจัยด้านบุคคล รวมทั้ง 6 คู่ พบว่า ค่าสหสัมพันธ์ของตัวแปรสังเกตได้แตกต่างจากศูนย์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 มี 6 คู่ มีค่าความสัมพันธ์กันในระดับสูงระหว่าง 0.73 ถึง 0.79 ส่วนผลการวิเคราะห์เมทริกซ์สหสัมพันธ์ด้วย Bartlett's test of sphericity ได้ค่า Chi-Square = 1339.48, df = 6, p = 0.01 ซึ่งแตกต่างจากศูนย์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ว่า เมทริกซ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรสังเกตได้ไม่ใช่เมทริกซ์เอกลักษณ์ (Identity Matrix) และตัวแปรมีความสัมพันธ์กันมากพอที่จะสามารถนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบได้ และค่าดัชนี Kaiser-Mayer-Olkin (KMO) = 0.85 ว่า ตัวแปรมีความเหมาะสมที่จะทำการวิเคราะห์องค์ประกอบได้ดี

การวัดตัวแปรแฝงปัจจัยด้านบุคคล (PEF) มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐาน (Standardized factor loadings: λ) ค่าสถิติทดสอบ t-test ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น (R^2) ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 องค์ประกอบเชิงยืนยันของแบบจำลองการวัดปัจจัยด้านบุคคล (PEF)

ตัวแปร	λ	SE	t-test	R^2
ความคาดหวังด้านประสิทธิภาพ (PEX)	0.83	0.03	19.82**	0.69
ความคาดหวังด้านความง่ายในการใช้ (EEX)	0.94	0.03	24.28**	0.88
ประสบการณ์ในการใช้งาน (EXP)	0.86	0.03	20.80**	0.73
สมรรถนะด้านดิจิทัล (DIC)	0.88	0.02	21.93**	0.78

หมายเหตุ : ค่านำหนักองค์ประกอบของปัจจัยด้านบุคคล (PEF) เป็นพารามิเตอร์บังคับ และ ** คือค่า $p < 0.01$

จากตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองตัวแปรแฝงของปัจจัยด้านบุคคล (PEF) ผลปรากฏว่าตัวแปรสังเกตได้สามารถใช้วัดหรืออธิบายความแปรปรวนของตัวแปรแฝงนี้ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 โดยตัวแปรสังเกตได้ความคาดหวังด้านความง่ายในการใช้ (EEX) มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานสูงสุด (λ = 0.94) รองลงมา ได้แก่ ตัวแปรสังเกตได้ ความสามารถทางด้านดิจิทัลหรือสมรรถนะดิจิทัล (DIC) (λ = 0.88) ตัวแปรสังเกตได้ ประสบการณ์ในการใช้งาน (EXP) (λ = 0.86) และตัวแปรสังเกตได้ ความคาดหวังด้านประสิทธิภาพ (PEX) (λ = 0.83) ตามลำดับ ทั้งนี้ตัวแปรสังเกตได้ความคาดหวังด้านความง่ายในการใช้ (EEX) สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรแฝงนี้ได้ 88 % (R^2 = 0.88) รองลงมา ได้แก่ ตัวแปรสังเกตได้ ความสามารถทางด้านดิจิทัลหรือสมรรถนะดิจิทัล (DIC) ตัวแปรสังเกตได้ ประสบการณ์ในการใช้งาน (EXP) และตัวแปรสังเกตได้ ความคาดหวังด้านประสิทธิภาพ (PEX) ที่สามารถร่วมอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรแฝงได้ 78 %, 73 % และ 69 % (R^2 = 0.78, 0.73 และ 0.69) ตามลำดับ

2.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการวัดปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV)

จากการวิเคราะห์โมเดลการวัดตัวแปรแฝงของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) ประกอบด้วยตัวแปรสังเกตได้จำนวน 3 ตัวแปร ได้แก่ อิทธิพลทางสังคม (SOI) นโยบายองค์กร (ORG) และกฎหมายและจริยธรรม (LAE) โดยผู้วิจัยได้วิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน ดังนี้

ตารางที่ 5 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสังเกตได้ของแบบจำลองการวัดปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม

	SOI	ORG	LAE
SOI	1		
ORG	0.78**	1	
LAE	0.78**	0.77**	1
M	3.72	3.76	3.71
S.D.	0.45	0.39	0.41
Bartlett's test of sphericity Chi-Square 960.48, df = 3, p = 0.01, KMO = 0.75			

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

จากตารางที่ 5 ผู้วิจัยทำการตรวจสอบค่าสหสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทั้ง 3 องค์ประกอบของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม รวมทั้ง 3 คู่ พบว่า ค่าสหสัมพันธ์ของตัวแปรสังเกตได้แตกต่างจากศูนย์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ทั้ง 3 คู่ มีค่าความสัมพันธ์กันในระดับสูงระหว่าง 0.77 ถึง 0.78 ส่วนผลการวิเคราะห์เมทริกซ์สหสัมพันธ์ด้วย Bartlett's test of sphericity ได้ค่า Chi-Square = 960.48, df = 3, p = 0.01 ซึ่งแตกต่างจากศูนย์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ว่า เมทริกซ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรสังเกตได้ไม่ใช่เมทริกซ์เอกลักษณ์ (Identity Matrix) และตัวแปรมีความสัมพันธ์กันมากพอที่จะสามารถนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบได้ และค่าดัชนี Kaiser-Mayer-Olkin (KMO) = 0.75 ว่า ตัวแปรมีความเหมาะสมที่จะทำการวิเคราะห์องค์ประกอบได้ดี

ตารางที่ 6 องค์ประกอบเชิงยืนยันของแบบจำลองการวัดปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV)

ตัวแปร	**λ**	**SE**	**t-test**	R^2
อิทธิพลทางสังคม (SOI)	0.94	0.03	24.14**	0.88
นโยบายขององค์กร (ORG)	0.93	0.03	23.88**	0.86
กฎหมายและจริยธรรม (LAE)	0.84	0.03	20.43**	0.70

หมายเหตุ : ค่าน้ำหนักองค์ประกอบของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) เป็นพารามิเตอร์บังคับ
และ ** คือค่า $p < 0.01$

จากตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองตัวแปรแฝงของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) ผลปรากฏว่าตัวแปรสังเกตได้สามารถใช้วัดหรืออธิบายความแปรปรวนของตัวแปรแฝงนี้ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 โดยตัวแปรสังเกตได้ อิทธิพลทางสังคม (SOI) ค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานสูงสุด (λ = 0.94) และ รองลงมา ได้แก่ ตัวแปรสังเกตได้ นโยบายขององค์กร (ORG) (λ = 0.93) และตัวแปรสังเกตได้ กฎหมายและจริยธรรม (LAE) (λ = 0.84) ตามลำดับ ทั้งนี้ตัวแปรสังเกตได้ อิทธิพลทางสังคม (SOI) สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรแฝงนี้ได้ 88 % (R^2 = 0.88) รองลงมา ได้แก่ ตัวแปรสังเกตได้ นโยบายขององค์กร (ORG) และตัวแปรสังเกตได้ กฎหมายและจริยธรรม (LAE) ที่สามารถร่วมอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรแฝงได้ 86 % และ 70 % (R^2 = 0.86 และ 0.70) ตามลำดับ

2.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการวัดความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (OBI)

จากการวิเคราะห์โมเดลการวัดตัวแปรแฝงของความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (OBI) ประกอบด้วยตัวแปรสังเกตได้จำนวน 2 ตัวแปร ได้แก่ พฤติกรรมภายนอก (OVB) และพฤติกรรมภายใน (CVB) โดยผู้วิจัยได้วิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันดังนี้

ตารางที่ 7 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสังเกตได้ของแบบจำลองการวัดความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์

	OVB	CVB
OVB	1	
CVB	0.75**	1
M	3.46	3.57
S.D.	0.55	0.51
Bartlett's test of sphericity Chi-Square 320.98, df = 1, p = 0.01, KMO = 0.50		

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

จากตารางที่ 7 ผู้วิจัยทำการตรวจสอบค่าสหสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทั้ง 2 องค์ประกอบของความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ มี 1 คู่ พบว่า ค่าสหสัมพันธ์ของตัวแปรสังเกตได้แตกต่างจากศูนย์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 มี 1 คู่ มีค่าความสัมพันธ์กันในระดับสูง เท่ากับ 0.75 ส่วนผลการวิเคราะห์เมทริกซ์สหสัมพันธ์ด้วย Bartlett's test of sphericity ได้ค่า Chi-Square = 320.98, df = 1, p = 0.01 ซึ่งแตกต่างจากศูนย์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ว่า เมทริกซ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรสังเกตได้ไม่ใช่เมทริกซ์เอกลักษณ์ (Identity Matrix) และตัวแปรมีความสัมพันธ์กันมากพอที่จะสามารถนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบได้ และค่าดัชนี Kaiser-Mayer-Olkin (KMO) = 0.50 ว่า ตัวแปรมีความเหมาะสมที่จะทำการวิเคราะห์องค์ประกอบได้ดี

ตารางที่ 8 องค์ประกอบเชิงยืนยันของแบบจำลองการวัดความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (OBI)

ตัวแปร	**λ**	SE	t-test	R^2
พฤติกรรมภายนอก (OVB)	0.91	0.03	23.16**	0.82
พฤติกรรมภายใน (CVB)	0.84	0.03	20.11**	0.70

หมายเหตุ : ค่านำหนักองค์ประกอบของความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (OBI) เป็นพารามิเตอร์บังคับ และ ** คือค่า $p < 0.01$

จากตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองตัวแปรแฝงของความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (OBI) ผลปรากฏว่าตัวแปรสังเกตได้สามารถใช้วัดหรืออธิบายความแปรปรวนของตัวแปรแฝงนี้ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 โดยตัวแปรสังเกตได้ พฤติกรรมภายนอก (OVB) มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานสูงสุด (λ = 0.91) รองลงมา ได้แก่ ตัวแปรสังเกตได้ พฤติกรรมภายใน (CVB) (λ = 0.84) ตามลำดับ ทั้งนี้ตัวแปรสังเกตได้ พฤติกรรมภายนอก (OVB) สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรแฝงนี้ได้ 82 % (R^2 = 0.82) รองลงมา ได้แก่ ตัวแปรสังเกตได้ พฤติกรรมภายใน (CVB) ที่สามารถร่วมอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรแฝงได้ 70 % (R^2 = 0.70) ตามลำดับ

ตอนที่ 3 ผลการพัฒนาและตรวจสอบความสอดคล้องของโมเดลเชิงสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐ

3.1 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในโมเดลเชิงสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐ

การนำเสนอผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในโมเดลเชิงสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐ ประกอบด้วยตัวแปรสังเกตได้ 9 ตัวแปร ได้แก่ ความคาดหวังด้านประสิทธิภาพ (PEX) ความคาดหวังด้านความง่ายในการใช้ (EEX) ประสบการณ์ในการใช้งาน (EXP) และสมรรถนะด้านดิจิทัล (DIC) อิทธิพลทางสังคม (SOI) นโยบายขององค์กร (ORG) และกฎหมายและจริยธรรม (LAE) พฤติกรรมภายนอก (OVB) และพฤติกรรมภายใน (CVB)

ตารางที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรสังเกตได้

		ENV			PEF				OBI	
		SOI	ORG	LAE	PEX	EEX	EXP	DIC	OVB	CVB
ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม	SOI	1								
	ORG	0.78**	1							
	LAE	0.78**	0.77**	1						
ปัจจัยด้านบุคคล	PEX	0.52**	0.49**	0.50**	1					
	EEX	0.55**	0.50**	0.54**	0.78**	1				
	EXP	0.56**	0.53**	0.52**	0.78**	0.79**	1			
	DIC	0.54**	0.51**	0.54**	0.73**	0.79**	0.76**	1		
ความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์	OVB	0.76**	0.76**	0.74**	0.51**	0.52**	0.54**	0.50**	1	
	CVB	0.70**	0.69**	0.68**	0.50**	0.50**	0.56**	0.55**	0.75**	1

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 (Bartlett's Test of Sphericity = 3306.650, *df* = 36, $p < .001$ Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy (KMO) = 0.92)

จากตารางที่ 9 พบว่า พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสังเกตได้ อิทธิพลทางสังคม (SOI) นโยบายขององค์กร (ORG) และกฎหมายและจริยธรรม (LAE) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อยู่ในช่วง 0.77-0.78 โดยตัวแปรทุกคู่มี ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 แสดงว่าตัวแปรสังเกตได้ทั้ง 3 ตัวแปร มี ความสัมพันธ์เหมาะสมที่จะนำมาสร้างเป็นตัวแปรแฝงปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม

เมื่อพิจารณา ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสังเกตได้ ปัจจัยด้านบุคคล (PEF) ประกอบด้วยตัวแปรสังเกตได้จำนวน 4 ตัวแปร ได้แก่ ความคาดหวังด้านประสิทธิภาพ (PEX) ความคาดหวังด้านความง่ายในการใช้ (EEX) ประสบการณ์ในการใช้งาน (EXP) และสมรรถนะดิจิทัล (DIC) พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อยู่ในช่วง 0.73-0.79 โดยตัวแปรทุกคู่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 แสดงว่าตัวแปรสังเกตได้ทั้ง 4 ตัวแปร มีความสัมพันธ์เหมาะสมที่จะนำมาสร้างเป็นตัวแปรแฝงปัจจัยด้านบุคคล

เมื่อพิจารณา ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสังเกตได้ พฤติกรรมภายนอก (OVB) และพฤติกรรมภายใน (CVB) พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.75 โดยตัวแปรมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 แสดงว่าตัวแปรสังเกตได้ทั้ง 2 ตัวแปร มีความสัมพันธ์เหมาะสมที่จะนำมาสร้างเป็นตัวแปรแฝง ความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม กับตัวแปรปัจจัยด้านบุคคล พบว่า อิทธิพลทางสังคม (SOI) กับประสบการณ์ในการใช้งาน (EXP) มีความสัมพันธ์สูงสุด มีค่าสัมประสิทธิ์ เท่ากับ 0.56 ส่วนนโยบายขององค์กร (ORG) กับความคาดหวังด้านประสิทธิภาพ (PEX) มีความสัมพันธ์ต่ำที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.49 เมื่อพิจารณา ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม กับความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ พบว่า อิทธิพลทางสังคม (SOI) กับพฤติกรรมภายนอก (OVB) มีความสัมพันธ์สูงสุด มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.76 ส่วนกฎหมายและจริยธรรม (LAE) กับพฤติกรรมภายใน (CVB) มีความสัมพันธ์ต่ำที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.68

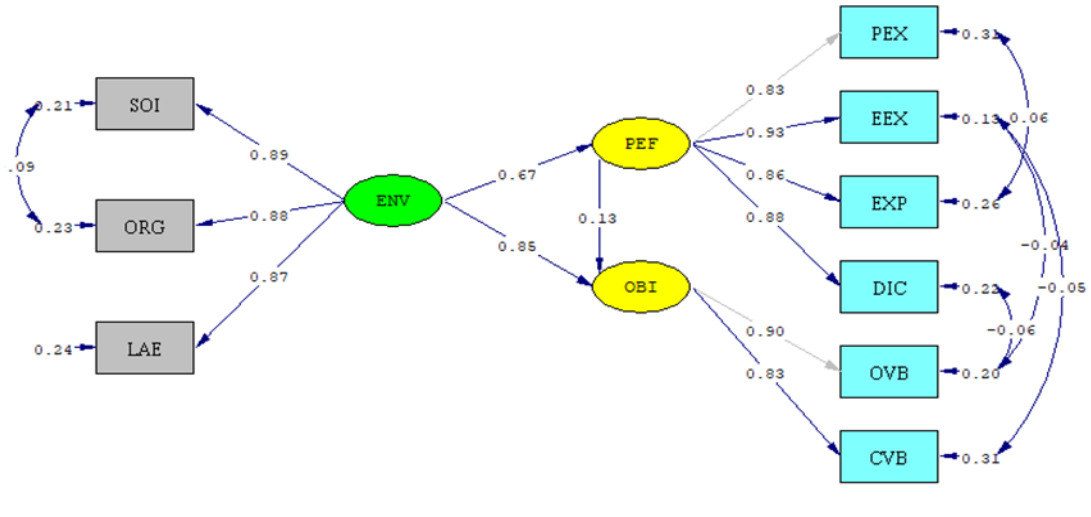
เมื่อพิจารณา Bartlett's Test of Sphericity มีค่าเท่ากับ 3306.65 ($df = 36$, $p < .001$) แสดงว่า เมทริกซ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแตกต่างจากเมทริกซ์เอกลักษณ์อย่างมีนัยสำคัญ และค่า KMO มีค่าเท่ากับ 0.92 แสดงว่าตัวแปรสังเกตได้ทั้งหมดมีความสัมพันธ์กันมากเพียงพอในการนำมา วิเคราะห์อิทธิพล

3.2 ผลการวิเคราะห์โมเดลเชิงสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐ

ตารางที่ 10 ค่าสถิตผลการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรในโมเดลเชิงสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐ

ตัวแปรเหตุ	**ตัวแปรผล**					
	PEF			OBI		
	DE	IE	TE	DE	IE	TE
ENV	0.67**	-	0.67**	0.85**	0.09**	0.94**
PEF	-	-	-	0.13**	-	0.13**
χ^2 = 22.18, df = 19, relative χ^2 = 1.17, *P* = 0.28, RMSEA = 0.02, RMR = 0.01, CFI = 1.00						
ตัวแปร	**SOI**	**ORG**	**LAE**	**PEX**	**EEX**	**EXP**
ความเที่ยง	0.79	0.77	0.76	0.69	0.87	0.74
ตัวแปร	**DIC**	**OVB**	**CVB**			
ความเที่ยง	0.78	0.80	0.69			
สมการโครงสร้างของตัวแปร	**PEF**	**OBI**				
R^2	0.45	0.90				
เมทริกซ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร						
ตัวแปร	**PEF**	**OBI**	**ENV**			
PEF	1.00					
OBI	0.70	1.00				
ENV	0.67	0.94	1.00			

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01



ภาพที่ 1 ผลการตรวจสอบความสอดคล้องของโมเดลเชิงสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐ กับข้อมูลเชิงประจักษ์

จากตารางที่ 10 เมื่อพิจารณาค่าความเที่ยงในการวัดตัวแปรสังเกตได้แต่ละตัว พบว่า ตัวแปรแต่ละตัวมีค่า ความเที่ยง คือ มีค่าความเที่ยงอยู่ระหว่าง 0.69-0.87 โดยตัวแปรที่มีความเที่ยงสูงสุดคือ พความคาดหวังด้านความง่ายในการใช้ (EEX) มีค่าความเที่ยงเท่ากับ 0.87 รองลงมา คือ พฤติกรรมภายนอก (OVB) ค่าความเที่ยงเท่ากับ 0.80 ส่วนตัวแปร ที่มีค่าความเที่ยงต่ำที่สุด คือ ความคาดหวังด้านประสิทธิภาพ (PEX) และพฤติกรรมภายใน (CVB) มีค่าความเที่ยงเท่ากับ 0.69 เท่ากัน

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ (R^2) ของตัวแปรปัจจัยด้านบุคคล (PEF) มีค่าเท่ากับ 0.45 แสดงว่า ตัวแปรปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) อธิบายความแปรปรวนของปัจจัยด้านบุคคล (PEF) ได้ 45 % และค่าสัมประสิทธิ์ การพยากรณ์ (R^2) ของตัวแปรความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (OBI) มีค่าเท่ากับ 0.90 แสดงว่า ตัวแปรปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) และปัจจัยด้านบุคคล (PEF) อธิบายความแปรปรวนของความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (OBI) ได้ 90 %

เมื่อพิจารณาเมทริกซ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแฝง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรมีค่าตั้งแต่ 0.67 ถึง 0.94 โดยตัวแปรแฝงทั้งหมดมีค่าความสัมพันธ์เป็นบวก ตัวแปรที่มี ความสัมพันธ์มากที่สุด คือ ตัวแปรปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) กับตัวแปรความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (OBI) มีค่าความสัมพันธ์เท่ากับ 0.94 รองลงมา คือ ปัจจัยด้านบุคคล (PEF) กับความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (OBI) มีค่าความสัมพันธ์เท่ากับ 0.70 และตัวแปรที่มีค่า ความสัมพันธ์น้อยที่สุด คือ ตัวแปรปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) กับตัวแปรปัจจัยด้านบุคคล (PEF) มีค่าความสัมพันธ์เท่ากับ 0.67

เมื่อพิจารณาขนาดของอิทธิพลรวม (Total Effect) อิทธิพลทางตรง (Direct Effect) และ อิทธิพลทางอ้อม (Indirect Effect) ในรูปคะแนนมาตรฐานของตัวแปรความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (OBI) พบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลรวมสูงที่สุดต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (OBI) ได้แก่ ตัวแปรปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) มีค่าอิทธิพลรวมเท่ากับ 0.94 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 รองลงมาได้แก่ ตัวแปรปัจจัยด้านบุคคล (PEF) มีค่าอิทธิพลรวมเท่ากับ 0.13 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ตามลำดับ ตัวแปรที่มีอิทธิพลทางตรงสูงที่สุดต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (OBI) ได้แก่ ตัวแปรปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) มีค่าอิทธิพลทางตรงเท่ากับ 0.85 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 รองลงมา คือ ตัวแปรปัจจัยด้านบุคคล (PEF) มี มีค่าอิทธิพลทางตรงเท่ากับ 0.67 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ตามลำดับ ตัวแปรที่มีอิทธิพล

ทางอ้อมสูงที่สุดต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (OBI) ได้แก่ ตัวแปรปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) มีอิทธิพลทางอ้อมผ่านปัจจัยด้านบุคคล (PEF) ด้วย ขนาดอิทธิพลเท่ากับ 0.09 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ทั้งนี้ความแปรปรวนของความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐ ได้รับการอธิบายจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) และปัจจัยด้านบุคคล (PEF) ได้ 90 %

เมื่อพิจารณาขนาดของอิทธิพลรวม (Total Effect) อิทธิพลทางตรง (Direct Effect) และ อิทธิพลทางอ้อม (Indirect Effect) ในรูปคะแนนมาตรฐานของตัวแปรปัจจัยด้านบุคคล (PEF) พบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลรวมสูงที่สุดต่อปัจจัยด้านบุคคล (PEF) ได้แก่ ตัวแปรปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) มีค่าอิทธิพลรวมเท่ากับ 0.67 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ตัวแปรที่มีอิทธิพลทางตรงสูงที่สุดต่อปัจจัยด้านบุคคล (PEF) ได้แก่ ตัวแปรปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) มีค่าอิทธิพลทางตรงเท่ากับ 0.67 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ทั้งนี้ความแปรปรวนของปัจจัยด้านบุคคล ได้รับการอธิบายจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) ได้ 45 %

สรุปผล

กลุ่มตัวอย่างจากพยาบาลภาครัฐจำนวน 396 คน ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง 95.45 % อายุ 31–40 ปี 33.84 % มีประสบการณ์ทำงาน 6–10 และ 16–20 ปี เท่ากันที่ 18.69 % และมีความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์อยู่ในระดับค่อนข้างสูง โดยคะแนนเฉลี่ยองค์ประกอบหลักอยู่ระหว่าง 3.25–4.23 (SD 0.25–0.55) ซึ่งผ่านเกณฑ์การแจกแจงปกติจากค่า Sk และ Ku ตามเกณฑ์ ผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์และมีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานอยู่ในระดับเหมาะสม

ผลการตรวจสอบความสอดคล้องของโมเดลเชิงสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐในประเทศไทย พบว่า โมเดลที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ตามเกณฑ์ที่กำหนด ค่า χ^2 = 22.18, df = 19, p = 0.28, χ^2/df = 1.17, RMSEA = 0.02, RMR = 0.01, CFI = 1.00 และจากการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปร พบว่า ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) มีอิทธิพลรวมสูงสุดต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ ประกอบด้วยอิทธิพลทางตรง และอิทธิพลทางอ้อมผ่านปัจจัยด้านบุคคล นอกจากนี้ ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมยังมีอิทธิพลทางตรงต่อปัจจัยด้านบุคคล (PEF) อย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถอธิบายความแปรปรวนของปัจจัยด้านบุคคลได้ 45 % ส่วนปัจจัยด้านบุคคลมีอิทธิพลทางตรงต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ โดยทั้งสองปัจจัยร่วมกันอธิบายความแปรปรวนของความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ได้ถึง 90 %

ตัวแปรที่มีอิทธิพลทางตรงสูงที่สุดต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (OBI) ได้แก่ ตัวแปรปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (ENV) มีค่าอิทธิพลทางตรงเท่ากับ 0.85 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 รองลงมา คือ ตัวแปรปัจจัยด้านบุคคล (PEF) มี มีค่าอิทธิพลทางตรงเท่ากับ 0.67 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ซึ่งมีความสอดคล้องกับแบบจำลองตามสมมติฐาน

อภิปรายผล

ผลการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าโมเดลเชิงสาเหตุที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ โดยมีค่า χ^2 = 22.18, df = 19, p = 0.28, χ^2/df = 1.17, RMSEA = 0.02, RMR = 0.01 และ CFI = 1.00 นอกจากนี้ ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม และ ปัจจัยด้านบุคคล พบว่าความแปรปรวนของความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐได้ 90 % ซึ่งสะท้อนว่าโมเดลที่สร้างขึ้น อธิบายพฤติกรรมการยอมรับปัญญาประดิษฐ์ ในบริบทของพยาบาลภาครัฐได้เป็นอย่างดี เมื่อพิจารณาขนาดอิทธิพล พบว่า ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมมีอิทธิพลรวมสูงที่สุดต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา (TE = 0.94, p < .01) และยังมีอิทธิพลทางตรงในระดับสูง (DE = 0.85, p < .01) รวมทั้งมีอิทธิพลทางอ้อมผ่านปัจจัยด้าน

บุคคล (IE = 0.09, $p < .01$) ผลการวิจัย พบว่า โดยอิทธิพลทางสังคมมีค่าน้ำหนักองค์ประกอบสูงที่สุด ($\lambda = 0.89$) รองลงมาคือนโยบายขององค์กร ($\lambda = 0.88$) และกฎหมายและจริยธรรม ($\lambda = 0.87$) จากผลการวิจัยดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การนำปัญญาประดิษฐ์มาเพื่อให้คำปรึกษาของพยาบาลภาครัฐ ส่งผลมาจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ อิทธิพลทางสังคม การสนับสนุนขององค์กร กฎหมายและจริยธรรม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากบริบทของพยาบาลภาครัฐในประเทศไทย มีการทำงานภายใต้ระเบียบข้อบังคับ และนโยบายของกระทรวงสาธารณสุข และโรงพยาบาลในสังกัดเป็นหลัก หากนโยบายไม่ชัดเจนและขาดการสนับสนุนเรื่องงบประมาณดำเนินการ พยาบาลก็ยังไม่กล้าตัดสินใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ ดังนั้น การสนับสนุนจากผู้บริหาร ผู้บังคับบัญชา และเพื่อนร่วมวิชาชีพ ตลอดจนการมีนโยบายและกรอบจริยธรรมที่ชัดเจน [3] จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นของพยาบาลต่อการใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา

ในขณะเดียวกัน ปัจจัยด้านบุคคลที่ส่งผลต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ ประกอบด้วยความคาดหวังด้านประสิทธิภาพ ความคาดหวังด้านความง่ายในการใช้ ประสบการณ์ในการใช้งาน และสมรรถนะดิจิทัล ขณะที่ปัจจัยด้านบุคคลมีอิทธิพลทางตรงต่อความตั้งใจใช้ปัญญาประดิษฐ์ (TE = 0.13, $p < .01$) โดยตัวแปรที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบสูงที่สุด คือ ความคาดหวังด้านความง่ายในการใช้ ($\lambda = 0.93$) รองลงมา คือสมรรถนะดิจิทัล ($\lambda = 0.88$) และประสบการณ์ในการใช้งาน ($\lambda = 0.86$) ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า หากระบบปัญญาประดิษฐ์ได้รับการออกแบบให้ใช้งานง่าย [8] ไม่ซับซ้อน และสอดคล้องกับกระบวนการทำงานจริงของพยาบาล ซึ่งเป็นวิชาชีพที่ขาดแคลน ขาดอัตรากำลัง มีภาระงานมาก [3] ย่อมมีแนวโน้มส่งเสริมต่อการใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษามากขึ้น

กล่าวโดยสรุป จากผลการวิจัย พบว่า การส่งเสริมการใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษา ควรดำเนินการอย่างบูรณาการ ทั้งในในเชิงนโยบายและปฏิบัติการ โดยองค์กรควรกำหนดนโยบายที่ชัดเจน จัดให้มีระบบสนับสนุนที่เหมาะสม ใช้งานง่าย พัฒนากฎหมายและมาตรฐานจริยธรรมที่เอื้อต่อการปฏิบัติงาน พร้อมทั้งสร้างวัฒนธรรมองค์กรที่สนับสนุนการใช้เทคโนโลยีดิจิทัล ควบคู่กับการพัฒนาสมรรถนะดิจิทัลของพยาบาลอย่างต่อเนื่อง เพื่อเสริมสร้างความมั่นใจ ลดความวิตกกังวล [12] และเพิ่มความพร้อมต่อการใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้คำปรึกษาในบริบทของพยาบาลภาครัฐในประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

1. World Health Organization. Nursing workforce grows, but inequities threaten global health goals [Internet]. Geneva: WHO; 2025 [cited 2026 May 21]. Available from: https://www.who.int/news/item/12-05-2025-nursing-workforce-grows--but-inequities-threaten-global-health-goals
2. International Council of Nurses. State of the world's nursing 2025: investing in education, jobs, leadership and service delivery. Geneva: World Health Organization; 2025. https://www.who.int/publications/i/item/9789240110236
3. กุลนรี หาญพัฒนชัยกูล, นันทวรรณ ตีระวงศา, ชลนกุล คำนึง, ทิพย์รัตน์ อุดเมืองเพีย. การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการปฏิบัติการพยาบาล: ประเด็นปัญหาทางด้านจริยธรรม. วารสารวิชาการสาธารณสุข 2566. 32(5): 962-970. https://thaidj.org/index.php/JHS/article/view/14705
4. Rahimi B, Nadri H, Lotfnezhad Afshar H, Timpka T. A systematic review of the technology acceptance model in health informatics. Appl Clin Inform. 2018; 9(3): 604-634. doi:10.1055/s-0038-1668091

5. Maleki Varnosfaderani S, Forouzanfar M. The role of AI in hospitals and clinics: transforming healthcare in the 21st century. Bioengineering. 2024; 11(4): 337. https://doi.org/10.3390/bioengineering11040337
6. Baraniuk C. The groundbreaking way to search lungs for signs of COVID-19 [Internet]. 2020 [cited 2026 May 21]. Available from: https://www.bbc.com/news/business-52483082
7. Wongpatikaseree K, Yomaboot P, Hnoohom N. AI psychological intervention open platform for improving mental health service using artificial intelligent conversation agent in Thailand. Health Systems Research Institute Report. 2024:1-45. https://kb.hsri.or.th/dspace/handle/11228/6138
8. Davis FD. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. MIS Q. 1989; 13(3): 319-340. https://doi.org/10.2307/249008
9. Venkatesh V, Morris MG, Davis GB, Davis FD. User acceptance of information technology: toward a unified view. MIS Q. 2003; 27(3): 425-478. https://doi.org/10.2307/30036540
10. Taherdoost H. A review of technology acceptance and adoption models and theories. Procedia Manuf. 2018; 22: 960-967. Available from: https://ssrn.com/abstract=3206598
11. Hair JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE. Multivariate data analysis. 8th ed. Andover: Cengage; 2019. p.100-125. https://researchdiscovery.drexel.edu/esploro/outputs/book/Multivariate-data-analysis/991019295303204721
12. บุหงา ชัยสุวรรณ, พรรณพิลาศ กุลดิลก, ชัชญา สกุณา. สถานการณ์ แนวโน้ม และความต้องการความรู้และทักษะปัญญาประดิษฐ์ทางการสื่อสารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของบุคลากรวัยทำงานในประเทศไทย. วารสารวิชาการมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 2565. 30(1): 104-126. https://so06.tci-thaijo.org/index.php/husojournal/article/view/253233/172408

บทความวิจัย (Research Article)

ผลการใช้แหนแดงอบแห้งทดแทนกากถั่วเหลืองในอาหารปลายี่สกเทศ

Effects of Dried *Azolla* Meal as a Substitute for Soybean Meal in Diets of *Labeo rohita*

อภิรัตน์ เอกชาติปัญญา[1] ณัทธิยา ชำนาญค้า[1] สุกัญญา คำหล้า[1] พัชราวลัย ศรียะศักดิ์[1] สุพันธ์ณี สุวรรณภักดี[1] และ นัยนา เสนาศรี[1*]

Apirat Eakchatpana[1], Nattiya Chumnanka[1], Sugunya Kumla, Patcharawalai Sriyasak[1],
Supannee Suwanpakdee[1] and Naiyana Senasri[1*]

[1]สาขาประมง คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

[1]Fisheries Department, Faculty of Science, Rajamamgala University of Technology Isan Sakonnakhon Campus

*Corresponding author: naiyana.se@rmuti.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
31 มีนาคม 2569	26 มิถุนายน 2569	26 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแหนแดง (*Azolla pinnata*) อบแห้งทดแทนจากกากถั่วเหลืองในอาหารปลายี่สกเทศ (*Labeo rohita*) การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ชุดทดลองละ 3 ซ้ำ สูตรการเตรียมอาหารที่มีแหนแดงอบแห้งเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนจากกากถั่วเหลืองต่างระดับที่ 0, 20, 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ มีองค์ประกอบโปรตีนในอาหาร 29.42, 29.37, 27.77 และ 27.15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การทดลองใช้ปลายี่สกเทศน้ำหนักเฉลี่ย 4.91 กรัม ทำการเลี้ยง 90 วัน ในกระชังขนาด 2 × 2 × 1 เมตร อัตราปล่อย 100 ตัวต่อกระชัง การศึกษา พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยเท่ากับ 20.91±3.76, 19.54±2.69, 21.37±2.74 และ 21.95±1.78 กรัม ตามลำดับ อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน เท่ากับ 0.23±0.06, 0.20±0.02, 0.28±0.07 และ 0.25±0.05 กรัมต่อวัน ตามลำดับ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ เท่ากับ 1.82±0.25, 1.70±0.13, 2.01±0.27 และ 1.90±0.19 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน อัตราการรอดตาย 41.00±3.06, 46.67±2.51, 56.00±19.67 และ 47.33±4.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ เท่ากับ 2.40±0.37, 2.61±0.25, 2.18±0.34 และ 2.29±0.25 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการใช้อาหารเท่ากับ 0.42±0.06, 0.38±0.03, 0.46±0.07 และ 0.43±0.05 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการใช้โปรตีนในสูตรอาหารทดลองของปลายี่สกเทศ เท่ากับ 1.36±0.19, 1.31±0.13, 1.67±0.26 และ1.66±0.19 ตามลำดับ แต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยผลการศึกษา พบว่า กลุ่มปลาที่ได้รับอาหารที่มีการทดแทนกากถั่วเหลืองด้วยแหนแดงในระดับ 40 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มให้อัตราการรอดตายสูงกว่ากลุ่มอื่นและไม่ส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง ผลการศึกษครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า แหนแดงอบแห้งสามารถใช้เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกเพื่อทดแทนกากถั่วเหลืองในอาหารปลายี่สกเทศได้ถึงระดับ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบสูตรอาหารกลุ่มอื่นที่มีโปรตีนสูงกว่า โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตและการใช้ประโยชน์อาหาร

คำสำคัญ: ปลายี่สกเทศ, แหนแดง, กากถั่วเหลือง, โปรตีนทางเลือก

Abstract

This study aimed to evaluate the effectiveness of dried Azolla (*Azolla pinnata*) as a replacement for soybean meal in the diets of rohu fish (*Labeo rohita*). The experiment consisted of four dietary treatments with three replicates per treatment. Experimental diets were formulated by replacing soybean meal protein with dried Azolla at levels of 0, 20, 40, and 60%, resulting in crude protein contents of 29.42, 29.37, 27.77, and 27.15%, respectively. Rohu juveniles with an average initial weight of 4.91 g were reared for 90 days in cages (2 × 2 × 1 m) at a stocking density of 100 fish per cage. At the end of the experiment, the average weight gain was 20.91 ± 3.76, 19.54 ± 2.69, 21.37 ± 2.74, and 21.95 ± 1.78 g for the 0, 20, 40, and 60% replacement groups, respectively. The average daily gain was 0.23 ± 0.06, 0.20 ± 0.02, 0.28 ± 0.07, and 0.25 ± 0.05 g day^{-1}, while the specific growth rate was 1.82 ± 0.25, 1.70 ± 0.13, 2.01 ± 0.27, and 1.90 ± 0.19% day^{-1}, respectively. Survival rates were 41.00 ± 3.06, 46.67 ± 2.51, 56.00 ± 19.67, and 47.33 ± 4.10%, respectively. Feed conversion ratios were 2.40 ± 0.37, 2.61 ± 0.25, 2.18 ± 0.34, and 2.29 ± 0.25, while feed efficiency values were 0.42 ± 0.06, 0.38 ± 0.03, 0.46 ± 0.07, and 0.43 ± 0.05, respectively. The protein efficiency ratio was 1.36 ± 0.19, 1.31 ± 0.13, 1.67 ± 0.26, and 1.66 ± 0.19, respectively No significant differences were observed among treatments for growth performance, feed utilization, or survival ($p > 0.05$). However, fish fed the diet containing 40% dried Azolla exhibited a tendency toward higher survival compared with the other treatments without any adverse effects on growth performance. The findings indicate that dried Azolla can be used as an alternative protein source to replace soybean meal in rohu diets at levels up to 40% without negatively affecting growth performance or feed utilization, despite having a lower dietary protein content than some of the other experimental diets.

Keywords: Rohu, Azolla, Soybean meal, Alternative protein

บทนำ

ปลายี่สกเทศ หรือปลาโรฮู่ (*Labeo rohita*) เป็นปลาน้ำจืดขนาดใหญ่ชนิดหนึ่ง จัดเป็นปลาพื้นเมืองของประเทศอินเดีย และถูกนำเข้ามาเลี้ยงในประเทศไทยในช่วงปี พ.ศ. 2510–2511 โดยจัดอยู่ในกลุ่มปลาคาร์พอินเดีย ซึ่งประกอบด้วยปลายี่สกเทศ ปลานวลจันทร์เทศยิ่งไปกว่านั้นยังรวมถึงปลานิลด้วย [1] ซึ่งปัจจุบันปลายี่สกเทศถือเป็นปลาน้ำจืดเศรษฐกิจที่มีความสำคัญและได้รับความนิยมบริโภคอย่างแพร่หลาย ปลายี่สกเทศมีลักษณะเด่นหลายประการ ได้แก่ สามารถเลี้ยงได้ง่าย มีอัตราการเจริญเติบโตเร็ว ทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี และมีรสชาติเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค อีกทั้งยังสามารถนำไปแปรรูปและประกอบอาหารได้หลากหลายรูปแบบ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าปลาชนิดนี้จะมีศักยภาพสูงในการผลิต แต่ปริมาณผลผลิตทั้งจากธรรมชาติและการเพาะเลี้ยงยังคงไม่เพียงพอต่อความต้องการบริโภคของประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในด้านการจัดการอาหารซึ่งเป็นต้นทุนหลักของการผลิตจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อเพิ่มผลผลิต ลดต้นทุน และตอบสนองต่อความต้องการของตลาดได้อย่างยั่งยืน

ในปัจจุบัน กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [2] รายงานผลการจับสัตว์น้ำทั้งหมดจำแนกตามวิธีการประมง 2564 พบว่า การจับสัตว์น้ำจืดคิดเป็นร้อยละ 4.7 ของการทำการประมงทั้งหมด หรือประมาณ 112,604 ตัน โดยเป็นการจับจากแหล่งน้ำประเภทหนอง บึง และแหล่งน้ำอื่น ๆ มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 38.19 รองลงมาคือแหล่งน้ำประเภทแม่น้ำ ลำคลอง และห้วย ร้อยละ 36.16 อ่างเก็บน้ำ ร้อยละ 23.85 และบ่อล่อ ร้อยละ 0.49 เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของปริมาณ

การจับสัตว์น้ำจืดในแต่ละภูมิภาค พบว่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีปริมาณการจับจากธรรมชาติมากที่สุด 59,432.18 ตัน (ร้อยละ 52.78) รองลงมาคือภาคเหนือ 30,802.09 ตัน (ร้อยละ 27.35) และภาคตะวันตกมีปริมาณการจับน้อยที่สุด 4,889.43 ตัน (ร้อยละ 4.34) อย่างไรก็ตาม ผลผลิตจากแหล่งน้ำจืดทุกประเภทมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงปี พ.ศ. 2554–2564 ซึ่งมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย เช่น ความต้องการบริโภคที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและภูมิอากาศ การเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำ การรุกรานของสัตว์น้ำต่างถิ่น รวมถึงการทำการประมงเกินศักยภาพการผลิต (overfishing) ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อความหลากหลายทางชีวภาพและความสมดุลของระบบนิเวศน้ำจืด ทำให้ปริมาณสัตว์น้ำในธรรมชาติลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น การส่งเสริมและพัฒนาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดจึงมีบทบาทสำคัญในการทดแทนผลผลิตจากธรรมชาติ และรองรับความต้องการบริโภคที่เพิ่มขึ้นในอนาคตได้อย่างยั่งยืน

แม้ว่าในปัจจุบัน กรมประมงจะดำเนินการส่งเสริมการเพาะเลี้ยงและขยายพันธุ์ปลายี่สกเทศอย่างต่อเนื่อง และจัดให้เป็นหนึ่งในปลาน้ำจืดเศรษฐกิจที่ได้รับความนิยมของผู้บริโภค แต่ยังไม่มีรายงานว่าสามารถขยายพันธุ์ได้เองตามธรรมชาติในแหล่งน้ำจืดของประเทศไทย [3] ดังนั้น ปลายี่สกเทศจึงยังคงต้องอาศัยการเพาะพันธุ์และการเลี้ยงในระบบที่มีการจัดการอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีขนาดและคุณภาพตรงตามความต้องการของตลาด อย่างไรก็ตาม การเพาะเลี้ยงปลายี่สกเทศมีต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง โดยเฉพาะต้นทุนค่าอาหารซึ่งคิดเป็นสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 60 ของต้นทุนทั้งหมด [4] ทั้งนี้ แหล่งโปรตีนในอาหารสัตว์น้ำถือเป็นองค์ประกอบหลักที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการผลิต โดยปลาป่นเป็นแหล่งโปรตีนที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูงและมีกรดอะมิโนจำเป็นครบถ้วน อย่างไรก็ตาม ความต้องการใช้ปลาป่นที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับปริมาณการผลิตที่ลดลงและข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้ราคาปลาป่นมีแนวโน้มสูงขึ้นและมีความผันผวน [5,6] ด้วยเหตุนี้ จึงมีความพยายามในการพัฒนาและค้นหาแหล่งโปรตีนทดแทนที่มีต้นทุนต่ำและมีคุณค่าทางโภชนาการเหมาะสมมาใช้ในสูตรอาหารสัตว์น้ำ โดยโปรตีนจากพืช เช่น กากถั่วเหลือง ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในฐานะวัตถุดิบทางเลือก เนื่องจากมีราคาต่ำกว่าปลาป่นและมีองค์ประกอบกรดอะมิโนที่ค่อนข้างเหมาะสม อย่างไรก็ตาม กากถั่วเหลืองยังคงมีต้นทุนที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบจากพืชชนิดอื่น และมีแนวโน้มราคาผันผวนตามภาวะตลาดโลก ดังนั้น การค้นหาแหล่งโปรตีนทางเลือกใหม่ที่มีราคาถูก หาได้ง่ายในท้องถิ่น และสามารถใช้ทดแทนกากถั่วเหลืองได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นแนวทางสำคัญในการลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มความยั่งยืนของระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระยะยาว

แหนแดง (*Azolla spp.*) เป็นพืชน้ำในกลุ่มเฟิร์นชนิดลอยน้ำ พบได้ทั่วไปในเขตร้อนและเขตอบอุ่น โดยเจริญเติบโตลอยอยู่บนผิวน้ำที่มีน้ำขัง โครงสร้างของแหนแดงประกอบด้วยลำต้น ราก และใบ โดยลำต้นมีขนาดประมาณ 0.5–0.7 เซนติเมตร และสามารถยาวได้ถึง 40 เซนติเมตร มีการแตกกิ่งออกจากลำต้น ใบเรียงสลับตามกิ่งและแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ใบบน (upper lobe) และใบล่าง (lower lobe) ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกันและไม่มี ก้านใบ ใบล่างมีลักษณะโปร่งแสงและมีคลอโรฟิลล์น้อย ส่วนใบบนมีสีเขียวและมีคลอโรฟิลล์เป็นองค์ประกอบหลัก ขณะที่รากมีลักษณะเป็นเส้นสีขาว แตกออกจากโคนลำต้นและห้อยลงในน้ำ ลักษณะเด่นของแหนแดงคือบริเวณช่องว่างในใบส่วนบน ซึ่งเป็นที่อยู่อาศัยของไซยาโนแบคทีเรีย *Anabaena azollae* ที่สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศ (nitrogen fixation) ได้ ทำให้แหนแดงมีปริมาณไนโตรเจนสูงประมาณ 2–4.5% ของน้ำหนักแห้ง [7,8,9] ส่งผลให้แหนแดงเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยประกอบด้วยสารสำคัญ เช่น โปรตีน ไขมัน และเซลลูโลส อีกทั้งยังสามารถเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ได้ดีจากการใช้ไนโตรเจนที่ตรึงได้ อย่างไรก็ตาม เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น ความเข้มแสงสูงเกินไป หรือปริมาณธาตุอาหารไม่เพียงพอ แหนแดงจะเปลี่ยนสีจากเขียวเป็นสีน้ำตาลอมแดง [10]ปัจจุบันแหนแดงที่พบทั่วโลกมีประมาณ 7 ชนิด ได้แก่ *A. filiculoides, A. caroliniana, A. mexicana, A. rubra, A. microphylla, A. nilotica* และ *A. pinnata* [11] สำหรับในประเทศไทยนิยมเพาะเลี้ยง 2 ชนิด ได้แก่ *A. pinnata* ซึ่งเป็นพันธุ์พื้นเมือง และ *A. microphylla* ซึ่งถูกนำเข้ามาเพื่อปรับปรุงพันธุ์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น สามารถตรึงไนโตรเจนได้มาก และเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมของประเทศไทย [12] โดยทั่วไปแหนแดงสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพน้ำที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 4.5–7.5 [13] จึงเหมาะสมต่อการนำมาใช้ประโยชน์ ในด้าน

การเกษตรและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยใช้เป็นวัตถุดิบทางเลือกด้านโปรตีนที่มีศักยภาพสูง นอกจากนี้ แหนแดงยังมีข้อดีในด้านการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว สามารถเพิ่มปริมาณชีวมวลได้ภายในระยะเวลาอันสั้น ทำให้สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอาหารสัตว์น้ำได้อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังมีต้นทุนการผลิตต่ำและสามารถเพาะเลี้ยงได้ง่ายในระดับฟาร์ม จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ช่วยลดต้นทุนการผลิตและส่งเสริมความยั่งยืนของระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ แหนแดงยังมีองค์ประกอบทางโภชนาการที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอาหารสัตว์น้ำ โดยมีรายงานว่ามีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 18.6–20.4 ไขมันร้อยละ 3.3–4.2 เส้นใยร้อยละ 10.3–15.8 และเถ้าร้อยละ 15.5–18.5 [1] อีกทั้งยังมีปริมาณธาตุอาหารสำคัญ เช่น ไนโตรเจนและโพแทสเซียมรวมในระดับสูง โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 4.69 และ 5.01 ตามลำดับ [14] นอกจากนี้ แหนแดงยังอุดมไปด้วยกรดอะมิโนจำเป็นหลายชนิด เช่น ไลซีน เมไทโอนีน และทรีโอนีน ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ รวมถึงมีวิตามินและแร่ธาตุที่จำเป็น เช่น วิตามินเอ วิตามินบีรวม แคลเซียม ฟอสฟอรัส และธาตุเหล็ก ซึ่งช่วยส่งเสริมการทำงานของระบบต่าง ๆ ในร่างกายสัตว์น้ำ อีกทั้งยังพบว่าสารประกอบในแหนแดงมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และมีรงควัตถุธรรมชาติ เช่น แคโรทีนอยด์ ที่ช่วยเสริมสร้างภูมิคุ้มกันและเพิ่มคุณภาพของเนื้อสัตว์ [15,16,17]และยังมีงานวิจัยที่สนับสนุนการใช้แหนแดงในสูตรอาหารสัตว์น้ำอย่างต่อเนื่อง อนุรักษ์และคณะ [18] รายงานว่าสามารถใช้แหนแดงในอาหารปลานิลแปลงเพศ (*Oreochromis niloticus*) ได้ในระดับสูงถึงร้อยละ 26 โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโต ขณะที่การศึกษาของ Fiogbe et al. [19] พบว่าการเสริมแหนแดงในระดับร้อยละ 40 ของน้ำหนักแห้ง ส่งผลให้ปลามีการเจริญเติบโตดีที่สุด นอกจากนี้ จากการศึกษาของ Refaey et al. [20] พบว่า การใช้แหนแดงสด (*Azolla pinnata*) เป็นอาหารเสริมในปลานิล (*Oreochromis niloticus*) ในระดับ 10–40% ของอาหาร สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโต การทำงานของเอนไซม์ย่อยอาหาร และสุขภาพลำไส้ของปลาได้ โดยไม่ส่งผลกระทบเชิงลบต่ออัตราการรอดตายและคุณภาพเนื้อปลา นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้แหนแดงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ การใช้ประโยชน์อาหาร และมีผลดีต่อระบบภูมิคุ้มกันและสถานะทางสรีรวิทยาของปลา และ Yilmaz, E et al. [21] พบว่า การเสริมแหนแดงในระดับที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหาร โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการกินอาหารและอัตราการรอดตายของปลา

อย่างไรก็ตาม หากใช้ในระดับที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้การเจริญเติบโตลดลง ซึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณเส้นใย (fiber) ที่สูงในแหนแดง นอกจากนี้ แหนแดงยังมีบทบาทสำคัญในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบยั่งยืน เนื่องจากสามารถดูดซับธาตุอาหารส่วนเกินและสารมลพิษในน้ำได้ดี จึงสามารถใช้ร่วมกับระบบบำบัดน้ำหรือการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบผสมผสาน (integrated aquaculture) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถเพาะเลี้ยงได้ง่าย ในระดับฟาร์ม ทำให้เหมาะสมสำหรับเกษตรกรรายย่อยในการลดต้นทุนค่าอาหาร [22,23] ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า แหนแดงมีศักยภาพสูงในการใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนแหล่งโปรตีนแบบดั้งเดิม เช่น ปลาป่นหรือกากถั่วเหลือง อย่างไรก็ตาม ระดับการใช้ที่เหมาะสมยังคงแตกต่างกันไปตามชนิดของปลา รูปแบบการเลี้ยง และการแปรรูปแหนแดง [23,24] ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาระดับการใช้ที่เหมาะสมในปลายี่สกเทศ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับสภาพการเลี้ยงในประเทศไทย จากข้อมูลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าแหนแดงเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการใช้ทดแทนแหล่งโปรตีนจากกากถั่วเหลือง ในสูตรอาหารสัตว์น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านคุณค่าทางโภชนาการและความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเกี่ยวกับระดับการใช้ที่เหมาะสมของแหนแดงในอาหารปลายี่สกเทศยังมีอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะในด้านผลกระทบต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์อาหาร และอัตราการรอดตายของปลา

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้แหนแดงอบแห้งในระดับต่างๆ เพื่อทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหาร ต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์อาหาร และอัตราการรอดตายของปลายี่สกเทศ ทั้งนี้ผลการศึกษาที่ได้จะสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาและปรับปรุงสูตรอาหารสัตว์น้ำที่มีต้นทุนต่ำใช้วัตถุดิบในท้องถิ่นและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตลอดจนส่งเสริมความยั่งยืนของระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระยะยาว

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของอาหารสูตรผสมแหนแดงต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์อาหาร และอัตราการรอดตายของปลายี่สกเทศ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (completely randomized design) เพื่อศึกษาผลของการใช้ประโยชน์โปรตีนจากแหนแดงอบแห้งในสูตรอาหารปลายี่สกเทศที่ระดับแตกต่างกัน ในการทดลองใช้ลูกปลายี่สกเทศ จำนวน 300 ตัวต่อชุดการทดลอง (ซ้ำละ 100 ตัว) โดยแบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลอง (treatment) ในแต่ละชุดการทดลองมี 3 ซ้ำ ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 สูตรอาหารที่มีแหนแดง 0 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มควบคุม)

ชุดการทดลองที่ 2 สูตรอาหารที่มีแหนแดงเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนกากถั่วเหลือง 20 เปอร์เซ็นต์

ชุดการทดลองที่ 3 สูตรอาหารที่มีแหนแดงเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนกากถั่วเหลือง 40 เปอร์เซ็นต์

ชุดการทดลองที่ 4 สูตรอาหารที่มีแหนแดงเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนกากถั่วเหลือง 60 เปอร์เซ็นต์

2. การเตรียมการทดลอง

เตรียมกระชังไนล่อนขนาด 16 ช่องตา กว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร ลึก 1 เมตร จำนวน 12 กระชัง วางกระชังในบ่อเลี้ยงปลาขนาด 4,800 ตารางเมตร ระดับความสูงของน้ำในบ่อวางกระชัง 3.5 เมตร

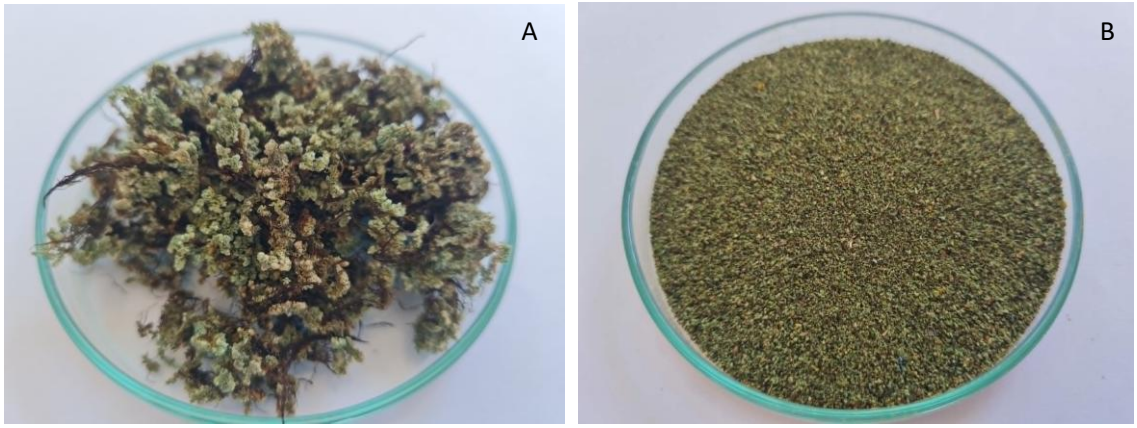
2.1 การเตรียมสัตว์ทดลอง

การศึกษาผลของการใช้ประโยชน์โปรตีนจากแหนแดงอบแห้งทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารปลายี่สกเทศในระดับแตกต่างกัน โดยทำการเพาะเลี้ยงและอนุบาลลูกปลา 3 เดือน ทำการสุ่มนำมาทดลอง โดยลูกปลามีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 4.86-4.98 กรัม และมีความยาวเริ่มต้น 7.43-7.69 เซนติเมตร โดยคัดเลือกปลาที่มีขนาดใกล้เคียงกันจำนวน 1,800 ตัว จากนั้นสุ่มตัวอย่างปลาจำนวน 472 ตัว (คิดเป็นร้อยละ 26.22) เพื่อตรวจวิเคราะห์ตามวิธีการของ Ahouasou [25] สำหรับปลาส่วนที่เหลือถูกสุ่มปล่อยลงในกระชังทดลองที่ระดับความหนาแน่น 25 ตัวต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นอัตราการปล่อยที่เหมาะสมตามรายงานของ นเรศ และคณะ [26]

2.2 การเตรียมอาหารทดลอง

การเตรียมอาหารทดลองสำหรับการศึกษาผลของการใช้ประโยชน์โปรตีนจากแหนแดงอบแห้ง (อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) ในสูตรอาหารปลายี่สกเทศที่ระดับแตกต่างกัน โดยนำวัตถุดิบแหนแดงอบแห้งมาใช้ทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารตามระดับที่กำหนดตามชุดการทดลอง ดังแสดงใน Table 1 จากนั้นนำวัตถุดิบทั้งหมดมาผสมให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอ และเติมน้ำในปริมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักอาหาร เพื่อให้เหมาะสมต่อการขึ้นรูป สำหรับผสมอาหารจะนำไปอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดชนิดอาหารลอยน้ำ โดยใช้หน้าแว่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำอาหารที่อัดเม็ดแล้วไปผึ่งลมให้แห้งจนมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 4.92–7.74 ใส่ตู้เย็นเก็บไว้ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

จากนั้นทำการสุ่มตัวอย่างอาหารที่นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (proximate composition) ตามวิธีของ AOAC [27] เพื่อประเมินคุณค่าทางโภชนาการของอาหารทดลองแต่ละสูตร โดยแหนแดงที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ (Figure 1) ในการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนะ พบว่า มีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีนร้อยละ 22.02 ไขมันร้อยละ 2.02 ความชื้นร้อยละ 5.93 เถ้าร้อยละ 13.63 และเส้นใยร้อยละ 8.37 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแหนแดงในการเป็นแหล่งโปรตีนจากพืชสำหรับใช้ในอาหารสัตว์น้ำ



A: Azolla (*Azolla pinnata*) after drying B: Finely ground dried Azolla (*Azolla pinnata*)

Figure 1 Dried Azolla (*Azolla pinnata*) used in the experimental diets

Table 1 Formulation of experimental diet and nutrient composition

Ingredients	Level of Azolla supplementation in diet			
	0%	20%	40%	60%
Fish meal (protein 58%)	19	19	19	19
Soybean meal (protein 45.5 %)	32	25.6	19.2	12.8
Corn (protein 8.2 %)	10	10	10	10
Rice bran (protein 12.1 %)	32	32	32	32
Wheat flour (protein 12.7 %)	5	5	5	5
Azolla (protein 22.02 %)	0	6.4	12.8	19.2
Soya oil	1	1	1	1
Premix	1	1	1	1
Total	**100**	**100**	**100**	**100**
Nutrient composition (%)				
Crude protein	29.42	29.37	27.77	27.15
Fat	1.09	1.03	0.39	0.30
Fiber	13.76	12.03	12.36	10.70
Moisture	10.50	10.78	10.83	11.89
Ash	23.26	24.71	25.25	26.81

2.3 การให้อาหาร

ให้อาหารทดลองตามสูตรที่กำหนดวันละ 2 ครั้ง เวลา 08.00 น. และ 16.00 น. ในปริมาณร้อยละ 3–5 ของน้ำหนักปลาในแต่ละชุดทดลอง โดยกำหนดระยะเวลาการเลี้ยงปลายี่สกเทศเป็นเวลา 90 วัน และมีการปรับปริมาณการให้

อาหารทุก ๆ 15 วันตามการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัวปลา ตลอดระยะเวลาการทดลองมีการบันทึกปริมาณอาหารที่ให้ในแต่ละวันอย่างสม่ำเสมอ และงดการให้อาหารในวันที่มีการสุ่มตัวอย่างเพื่อชั่งน้ำหนักและวัดความยาวปลา

การติดตามการเจริญเติบโตดำเนินการทุก 15 วัน โดยสุ่มปลายี่สกเทศ 30 ตัว จากแต่ละกระชังมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้าความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง หน่วยเป็นกรัม และวัดความยาวลำตัวด้วยไม้บรรทัด หน่วยเป็นเซนติเมตร ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์อาหาร และอัตราการรอดตายของปลาในแต่ละชุดการทดลอง

2.4 การตรวจวัดค่าคุณภาพน้ำ

ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทุก ๆ 15 วันตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้

1) ค่าอุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส) ด้วยเครื่องวัดอัตโนมัติ รุ่น SOLOMAT 520c

2) ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) วัดด้วยเครื่อง DO meter รุ่น AZ Instrument 86023

3) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) วัดด้วยเครื่อง pH meter รุ่น SOLOMAT 520c

4) วัดค่าปริมาณแอมโมเนียรวม (Ammonia-nitrogen; TAN) ดำเนินการตามวิธี Nessler โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น HACH DR/2000

3. การเก็บข้อมูลวิเคราะห์

นำข้อมูลที่บันทึกในการทดลอง เพื่อประเมินหาค่าต่างๆ ได้แก่ น้ำหนักตัว ความยาวลำตัว อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตรารอดตาย ดังนี้

3.1 น้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น (Weight gain, WG; กรัม)

$$\text{WG (กรัม)} = \frac{\text{น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย (กรัม)}}{\text{น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น (กรัม)}}$$

3.2 อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (Average Daily Gain, ADG; กรัมต่อวัน)

$$\text{ADG (กรัมต่อวัน)} = \frac{\text{(น้ำหนักเฉลี่ยปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง– น้ำหนักเฉลี่ยปลาเริ่มต้น)}}{\text{จำนวนวันที่ทำการทดลอง}}$$

3.3 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate, SGR; เปอร์เซ็นต์/วัน)

$$\text{SGR} = \frac{\text{(In น้ำหนักปลาสั้นสุดการทดลอง) – (In น้ำหนักปลาเริ่มต้น)}}{\text{จำนวนวันที่ทำการทดลอง}} \times 100$$

3.4 อัตรารอดตาย (survival rate, SR; เปอร์เซ็นต์)

$$SR = \frac{\text{จำนวนปลาสิ้นสุดการทดลอง}}{\text{จำนวนปลาเริ่มต้นการทดลอง}} \times 100$$

3.5 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (feed conversion ratio, FCR)

$$FCR = \frac{\text{น้ำหนักอาหาร (แห้ง) ที่ปลากิน}}{\text{น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้นเนื้อ}}$$

3.6 ประสิทธิภาพของอาหาร (feed efficiency ratio, FER)

$$FER = \frac{\text{น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้น}}{\text{น้ำหนักอาหาร (แห้ง) ที่ปลากิน}}$$

3.7 ประสิทธิภาพของโปรตีนในอาหาร (Protein efficiency ratio, PER)

$$PER = \frac{\text{น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้น}}{\text{น้ำหนักของโปรตีนที่ปลากิน}}$$

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เปรียบเทียบค่า อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตรารอดตาย ของปลายี่สกเทศในแต่ละชุดการทดลอง โดยวิธีการวิเคราะห์ความผันแปร (Analysis of Variance: Anova) และเมื่อพบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย จะวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของรายคู่ที่เป็นอิสระต่อกัน (T-Test) เมื่อการศึกษากำหนดระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อพบความแตกต่างของกลุ่มทดลอง จะใช้วิธี Duncan’s New Multiple Range Test (DMRT) เพื่อหาคู่ความแตกต่างด้วยวิธีทางสถิติทั้งหมด โดยใช้ IBM SPSS Statistics 22

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลศึกษาการเจริญเติบโตของปลายี่สกเทศที่ได้รับอาหารผสมแหนแดงในระดับต่างกัน

จากการศึกษาผลของแหนแดงอบแห้งทดแทนกากถั่วเหลืองในระดับที่แตกต่างกันต่อการเจริญเติบโตของปลายี่สกเทศ เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการทดลอง 90 วัน พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารผสมแหนแดงอบแห้งในทุกระดับการทดแทนมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น (Weight Gain; WG) เมื่อปลาได้รับอาหารผสมแหนแดงเป็นเวลา 15 วัน พบว่า ปลามีน้ำหนักเพิ่มขึ้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (Table 2) โดยปลามีน้ำหนักเพิ่มขึ้นสูงสุดในสูตรที่ใช้แหนแดงทดแทนกากถั่วเหลืองในกลุ่มควบคุม เท่ากับ 8.70±0.79 กรัม และต่ำสุดในกลุ่มใช้แหนแดงทดแทน 60% เท่ากับ 7.39±0.41 กรัม หลังจากนั้นเลี้ยงปลาเป็นเวลา 30 วัน พบว่า ปลาได้รับอาหารผสมแหนแดงทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารมีน้ำหนักปลาเพิ่มขึ้นแต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) น้ำหนักอยู่ในช่วง 8.40±0.34-9.05±0.42 กรัม ในขณะที่ปลาได้รับอาหารผสมแหนแดงเป็นเวลา 45 วัน น้ำหนักเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยน้ำหนักปลาอยู่ระหว่าง 9.40±0.67-10.96±1.24 กรัม และไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเลี้ยงปลาครบ 2 เดือน (60 วัน) น้ำหนักปลาเพิ่มขึ้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ในช่วง 13.32±0.67 -15.84±1.27 กรัม (Table 2) เลี้ยงปลาต่อเป็นระยะเวลา 75 วัน พบว่าน้ำหนักปลาเพิ่มขึ้น แต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยน้ำหนักอยู่ในช่วง 16.17±1.20-18.97±3.41 กรัม (Table 2) และเมื่อเลี้ยงปลาครบ 90 วัน ปลาน้ำหนักเพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 19.54±2.69-21.95±1.78 กรัม (Table 2) แต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปลาที่ได้รับอาหารสูตรทดแทนกากถั่วเหลืองด้วยแหนแดงอบแห้งในระดับ 40% มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นสูงกว่ากลุ่มทดลองอื่น โดยเริ่มสังเกตได้ตั้งแต่ระยะการเลี้ยง 45 วัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเลี้ยงที่ยาวนานขึ้น (Table 2) อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างดังกล่าวยังไม่ชัดเจน จึงอาจกล่าวได้ว่าการใช้แหนแดงอบแห้งทดแทนกากถั่วเหลืองในระดับที่ศึกษายังไม่ส่งผลต่อการเพิ่มน้ำหนักของปลายี่สกเทศ ซึ่งแตกต่างจากการทดลองของ Tiwari et al. [28] ทดลองศึกษาการใช้แหนแดง (*Azolla*) ในอาหารของลูกปลายี่สกเทศ (*Labeo rohita*) ที่พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ของปลายี่สกเทศในการเจริญเติบโตทั้งเปอร์เซ็นต์การเพิ่มน้ำหนักและเปอร์เซ็นต์การเพิ่มความยาว และ แตกต่างจากการทดลองของ Kumari et al. [29] พบว่า การเสริมแหนแดง (*Azolla*) ในอาหารปลามีผลดีต่อการเจริญเติบโตของปลา โดยชุดการทดลองที่ได้รับแหนแดงมีค่าน้ำหนักเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การเพิ่มน้ำหนัก

อย่างไรก็ตามการทดลองในครั้งนี้ปลายังคงสามารถเจริญเติบโตได้ อาจเนื่องมาจากปลายี่สกเทศสามารถใช้ประโยชน์จากสารอาหารในแหนแดงได้ในระดับหนึ่ง และแหนแดงยังคงมีคุณค่าทางโภชนาการเพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของปลาในช่วงการทดลองนี้

ผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้แหนแดงอบแห้งสามารถทดแทนกากถั่วเหลืองในอาหารปลายี่สกเทศได้ในระดับสูงถึง 40–60 เปอร์เซ็นต์ ไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของปลาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารสูตรซึ่งมีปริมาณโปรตีนสูงกว่า (Table 1) ทั้งนี้ แม้ว่าระดับโปรตีนในสูตรอาหารที่มีการทดแทนแหนแดงจะลดลง แต่ปลายังคงมีการเจริญเติบโตใกล้เคียงกับกลุ่มควบคุม สะท้อนให้เห็นว่าแหนแดงมีคุณค่าทางโภชนาการและสามารถใช้ประโยชน์เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกในอาหารสัตว์น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การใช้แหนแดงยังอาจช่วยลดต้นทุนการผลิตอาหารสัตว์น้ำและส่งเสริมการใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติที่มีความยั่งยืนต่อระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอีกด้วย

Table 2 Average body weight (g) of *Labeo rohita* fed diets with different levels of *Azolla* as a replacement for soybean meal

Unit : (g)

Days	Level of Azolla supplementation in diet				p-value
	0%	20%	40%	60%	
15	8.70±0.79[a]	8.15±0.44[ab]	7.77±0.25[ab]	7.39±0.41[b]	0.069
30	9.05±0.42	8.40±0.34	8.99±0.46	8.84±0.01	0. 192
45	9.51±0.58	9.40±0.67	10.96±1.24	10.67±0.34	0. 091
60	14.19±2.08	13.32±0.67	15.84±1.27	15.32±0.39	0. 151
75	16.58±2.67	16.17±1.20	18.97±3.41	18.34±1.30	0. 442
90	20.91±3.76	19.54±2.69	21.37±2.74	21.95±1.78	0. 761

Noted: Values expressed in mean ± SD. Different superscript letters within a row are significantly different ($P < 0.05$).

จากการศึกษาความยาวเฉลี่ยของปลายี่สกเทศเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการทดลอง พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารผสมแหนแดงอบแห้ง ซึ่งใช้ทดแทนกากถั่วเหลืองในทุกระดับการทดลอง มีการเจริญเติบโตด้านความยาวลำตัวเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเลี้ยง แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ทุกชุดการทดลอง โดยเมื่อเลี้ยงปลาเป็นระยะเวลา 15 วัน พบว่า ความยาวลำตัวของปลาในกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารสูตรควบคุมมีความยาวลำตัวเฉลี่ยสูงสุด ในช่วง 7.9±1.78 - 9.9±8.47 เซนติเมตร หลังจากนั้นเมื่อเลี้ยงปลาเป็นระยะเวลา 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน พบว่า ความยาวลำตัวของปลาในทุกชุดการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (Table 3) ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาของ แตกต่างจากการทดลองของ Tiwari et al. [28] ทดลองศึกษาการใช้แหนแดง (*Azolla*) ในอาหารของลูกปลายี่สกเทศ (*Labeo rohita*) ที่พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ของปลายี่สกเทศในการเจริญเติบโตในด้านเปอร์เซ็นต์การเพิ่มความยาวลำตัวเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามการทดลองครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่า การใช้แหนแดงอบแห้งทดแทนกากถั่วเหลืองในระดับที่ศึกษานั้น ไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตด้านความยาวของปลายี่สกเทศ ทั้งนี้ ปลาทุกกลุ่มทดลองมีแนวโน้มความยาวลำตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการเลี้ยงที่ยาวนานขึ้น สะท้อนให้เห็นว่าปลายังคงสามารถใช้ประโยชน์จากสารอาหารในอาหารทดลองเพื่อการเจริญเติบโตได้อย่างเหมาะสม

Table 3 Average Length (cm) of *Labeo rohita* Fed Diets Containing *Azolla* as a Protein Source Replacing Soybean Meal at Different Levels

Unit : (cm)

Days	Level of Azolla supplementation in diet				p-value
	0%	20%	40%	60%	
15	9.6±2.25	9.9±8.47	8.25±1.36	7.9±1.78	0.069
30	9.5±2.10	9.3±2.49	9.8±1.65	9.3±1.49	0.192
45	10.6±2.34	10.3±2.78	11.4±1.99	10.8±1.76	0.091
60	13.6±2.54	12.8±2.84	15.1±2.43	13.8±1.93	0.151
75	16.6±2.82	15.3±2.93	18.7±3.00	16.8±2.19	0.442
90	19.6±3.17	17.7±3.05	20.6±3.32	19.8±2.51	0.761

เมื่อสิ้นสุดการทดลองการเลี้ยงปลายี่สกเทศที่เลี้ยงด้วยสูตรอาหารที่มีแหนแดงเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนกากถั่วเหลือง 0 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ พบว่า อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน เท่ากับ 0.23±0.06 0.20±0.02 0.28±0.07 และ 0.25±0.05 กรัมต่อวัน ตามลำดับ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$ (Table 4) ขณะที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR) ของปลายี่สกเทศมีค่า เท่ากับ 1.82±0.25 1.70±0.13 2.01±0.27 และ 1.90±0.19 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) สอดคล้องกับการศึกษาของ อนุรักษ์ และคณะ [18] รายงานการใช้แหนแดงเลี้ยงปลานิล ในสัปดาห์ที่ 2 โดยปลาที่มี SGR มากที่สุด คือ ปลาที่ได้รับอาหารควบคุม ไม่แตกต่างกับปลาที่ได้รับอาหารผสมแหนแดง และจากการรายงานของ Fiogbe et.al. [19] พบว่า การผสมแหนแดงมากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ในสูตรอาหารปลาจะทำให้การเจริญเติบโตของปลาลดลง เนื่องจากแหนแดงเพิ่มขึ้นจะมีผลต่ออัตราการย่อยอาหารของปลา ซึ่งการทดลองครั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่า ปลามีประสิทธิภาพการใช้อาหารค่อนข้างต่ำ (Table 4) ส่งผลให้การนำสารอาหารไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตไม่เต็มประสิทธิภาพ จึงส่งผลต่อค่าการเจริญเติบโต ได้แก่ ค่า WG ADG และ SGR ที่ลดลงหรือมีค่าต่ำกว่าที่คาดการณ์ไว้ ทั้งนี้อาจเกี่ยวข้องกับคุณภาพของวัตถุดิบ ความน่ากินของอาหาร หรือความสามารถในการย่อยและดูดซึมสารอาหารของปลาในแต่ละสูตรอาหารทดลอง

นอกจากนี้ ปลายี่สกเทศที่ได้รับอาหารผสมแหนแดงในทุกระดับการทดแทนมีอัตราการรอดตายไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยมีค่าเท่ากับ 41.00±3.06 , 46.67±2.51, 56.00±19.67 และ 47.33±4.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Table 4) อย่างไรก็ตาม พบว่า กลุ่มปลายี่สกเทศที่ได้รับอาหาร ซึ่งมีการใช้แหนแดงทดแทนโปรตีนจากกากถั่วเหลืองในระดับ 40% มีแนวโน้มให้อัตราการรอดตายสูงกว่ากลุ่มการทดลองอื่นๆ ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาของ El-Sayed [30] ศึกษาผลของการใช้แหนแดง (*Azolla*) ทดแทนปลาป่นในสูตรอาหารต่อการเจริญเติบโตของปลานิลวัยอ่อนและปลานิลโตเต็มวัย พบว่า การเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารของปลาที่ได้รับอาหารสูตรควบคุมสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารผสมแหนแดงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของปลามีแนวโน้มลดลงตามระดับ การใช้แหนแดงที่เพิ่มขึ้นในสูตรอาหาร ปลานิลวัยอ่อนสามารถใช้ประโยชน์จากแหนแดงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ยังพบอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อและประสิทธิภาพของอาหารของปลายี่สกเทศเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ปลายี่สกเทศที่เลี้ยงด้วยสูตรอาหารซึ่งมีการใช้แหนแดงเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนกากถั่วเหลืองในระดับ 0, 20, 40 และ 60% มีค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อและประสิทธิภาพของอาหารไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยมีค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อเท่ากับ 2.40±0.37, 2.61±0.25, 2.18±0.34 และ 2.29±0.25 ตามลำดับ และมีค่าประสิทธิภาพของอาหารเท่ากับ 0.42±0.06, 0.38±0.03, 0.46±0.07 และ 0.43±0.05 ตามลำดับ (Table 4)

สอดคล้องกับการรายงานของ Tiwari et al. [28] ศึกษาศักยภาพของแหนแดง (*Azolla*) ในการเป็นสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของลูกปลายี่สกเทศ (*Labeo rohita*) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) ระหว่างชุดการทดลองทั้งหมดในช่วงระยะเวลา 0–45 วัน และในช่วงระยะเวลา 45–60 วัน พบว่า ค่า FCR แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างชุดการทดลอง ($p>0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาที่เลี้ยงและกินอาหารของปลามีผลต่อการเจริญเติบโตและอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ นอกจากนี้ พบว่า ปลายี่สกเทศที่ได้รับอาหารผสมแหนแดงในทุกระดับการทดแทนมีค่าประสิทธิภาพของโปรตีนในอาหารเท่ากับ 1.36±0.19, 1.31±0.13, 1.67±0.26 และ 1.66±0.19 ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (Table 4) เป็นไปได้ว่าปลายี่สกมีความสามารถในการย่อยอาหารที่ผสมแหนแดงได้น้อย จึงส่งผลต่ออัตราการย่อยอาหารและอัตราการเจริญเติบโตลดลง สอดคล้องกับ Ogino [31] พบว่า การเสริมแหนแดงในอาหารปลาปลาคาร์ฟและปลาเทราท์ในระดับที่สูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการย่อยอาหารและอัตราการเจริญเติบโตลดลง เนื่องจากในแหนแดงจะมีคาร์โบไฮเดรตจากพืชอยู่มาก ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแป้งและเซลลูโลส [32] เพราะในเซลลูโลสจะไม่ถูกย่อยโดยปลา

Table 4 Growth Rate of *Labeo rohita* Fed Diets Containing *Azolla* as a Protein Source Replacing Soybean Meal at Different Levels

Parameters	Level of Azolla supplementation in diet				p-value
	0%	20%	40%	60%	
Average Daily Gain (ADG)	0.23±0.06	0.20±0.02	0.28±0.07	0.25±0.05	0.43
Specific Growth Rate (%/Day)	1.82±0.25	1.70±0.13	2.01±0.27	1.90±0.19	0.36
Survival Rate (%)	41.00±3.06	46.67±2.51	56.00±19.67	47.33±4.10	0.40
Feed Conversion Ratio (FCR)	2.40±0.37	2.61±0.25	2.18±0.34	2.29±0.25	0.41
Feed Efficiency Ratio (FER)	0.42±0.06	0.38±0.03	0.46±0.07	0.43±0.05	0.44
Protein Efficiency Ratio (PER)	1.36±0.19	1.31±0.13	1.67±0.26	1.66±0.19	0.11

จากการเปรียบเทียบต้นทุนค่าอาหารในการเลี้ยงปลายี่สกเทศเป็นระยะเวลา 90 วัน พบว่า การใช้แหนแดงอบแห้งทดแทนกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารสามารถช่วยลดต้นทุนค่าอาหารได้อย่างต่อเนื่องตามระดับการทดแทนที่เพิ่มขึ้น (Table 5) โดยสูตรอาหารควบคุมที่ไม่มีการใช้แหนแดงมีต้นทุนค่าอาหารสูงสุด เท่ากับ 124.78 บาท/กิโลกรัม ขณะที่สูตรอาหารที่ใช้แหนแดงทดแทนกากถั่วเหลืองในระดับร้อยละ 20, 40 และ 60 มีต้นทุนค่าอาหารลดลงเหลือ 119.38, 114.08 และ 108.79 บาท/กิโลกรัม ตามลำดับ

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การใช้แหนแดงอบแห้งเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนกากถั่วเหลืองสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตอาหารปลาได้ โดยเฉพาะในระดับการทดแทนที่สูงขึ้น ทั้งนี้ แม้ว่าต้นทุนค่าอาหารจะลดลง แต่ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตและการใช้ประโยชน์อาหารของปลายังคงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม จึงสะท้อนให้เห็นว่าแหนแดงมีศักยภาพในการเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์น้ำทางเลือกที่ช่วยลดต้นทุนและส่งเสริมความยั่งยืนในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าผลการทดลองจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่สูตรที่ทดแทนแหนแดงในระดับ 40% แสดงแนวโน้มที่ดีที่สุดทั้งด้านประสิทธิภาพการเจริญเติบโตและความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

Table 5 Comparison of Feed Cost for *Labeo rohita* Fed Diets Containing Different Levels of *Azolla* Meal as a Soybean Meal Substitute for 90 Days in Cage Culture

Parameters	Sample fish	Amount of food (kilograms)	Price per kilogram (Baht)	Total (Baht)
Diet containing 0% *Azolla* meal	100	5.03	24.79	124.78
Diet containing 20% *Azolla* meal replacing soybean meal	100	5.03	23.73	119.38
Diet containing 40% *Azolla* meal replacing soybean meal	100	5.03	22.68	114.08
Diet containing 60% *Azolla* meal replacing soybean meal	100	5.03	21.63	108.79

จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการทดลอง พบว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลาน้ำจืดและสามารถสนับสนุนการเจริญเติบโตของปลาได้เป็นอย่างดี โดยค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) อยู่ในช่วง 3.3–4.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Figure 2) ซึ่งแม้จะอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่าที่เหมาะสมทั่วไป แต่ยังคงสูงกว่าค่าขั้นต่ำที่ปลาน้ำจืดสามารถดำรงชีวิตได้ (ไม่ต่ำกว่า 3 มิลลิกรัมต่อลิตร) จึงไม่ก่อให้เกิดภาวะเครียดหรือผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของปลาอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปลามีการปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมในระบบการเลี้ยงได้ดี [33,34]

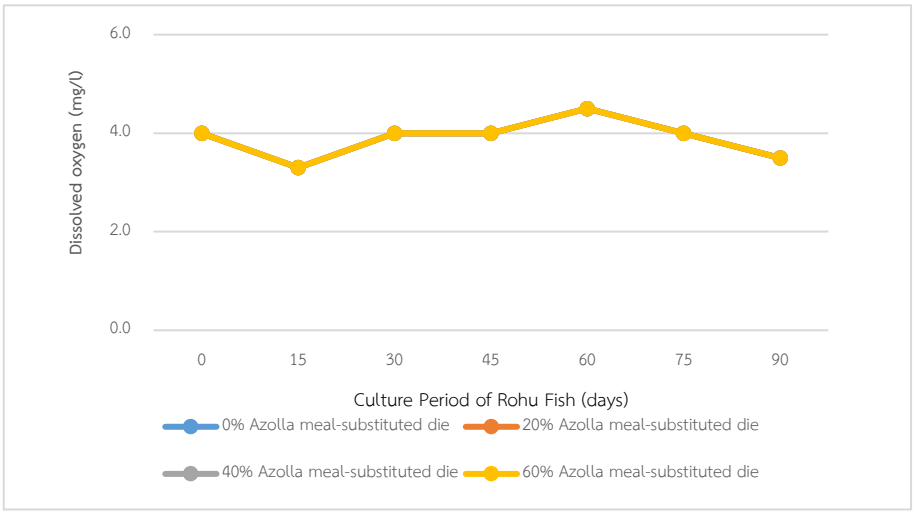


Figure 2 Dissolved oxygen levels in the culture ponds of *Labeo rohita* during different rearing periods

อุณหภูมิของน้ำในระหว่างการทดลองอยู่ในช่วง 26.0–30.5 °C (Figure 3) ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลาน้ำจืดเขตร้อน โดยเฉพาะปลากลุ่มคาร์พที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิประมาณ 25–32 °C อุณหภูมิในช่วงดังกล่าวยังส่งผลให้กระบวนการย่อยอาหารและการเผาผลาญพลังงานของปลาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ [34]

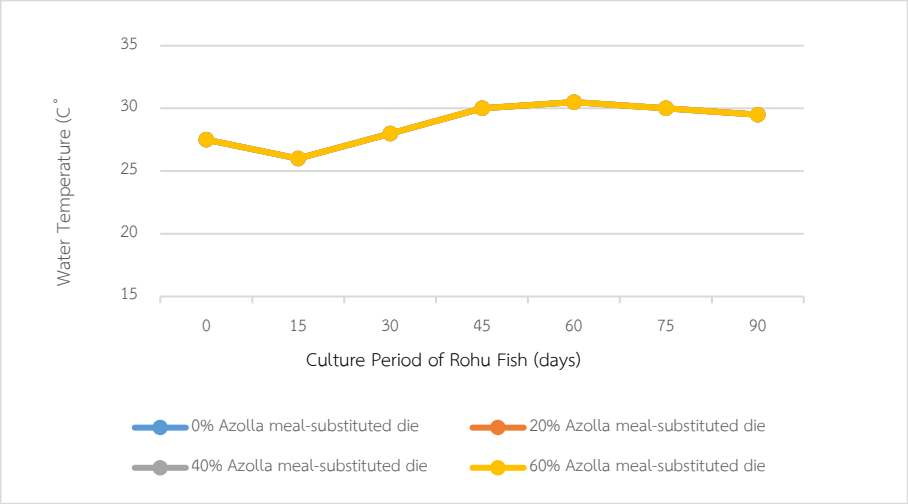


Figure 3 Water temperature in the culture ponds of *Labeo rohita* during different rearing periods

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 6.8–7.7 (Figure 4) ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงปลาน้ำจืด โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วง pH 6.5–8.5 ที่เอื้อต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของปลา และช่วยลดความเป็นพิษของแอมโมเนียในรูปที่เป็นอันตราย (NH_3) ส่งผลให้ปลาสามารถดำรงชีวิตและเจริญเติบโตได้อย่างมีประสิทธิภาพ [35,36]

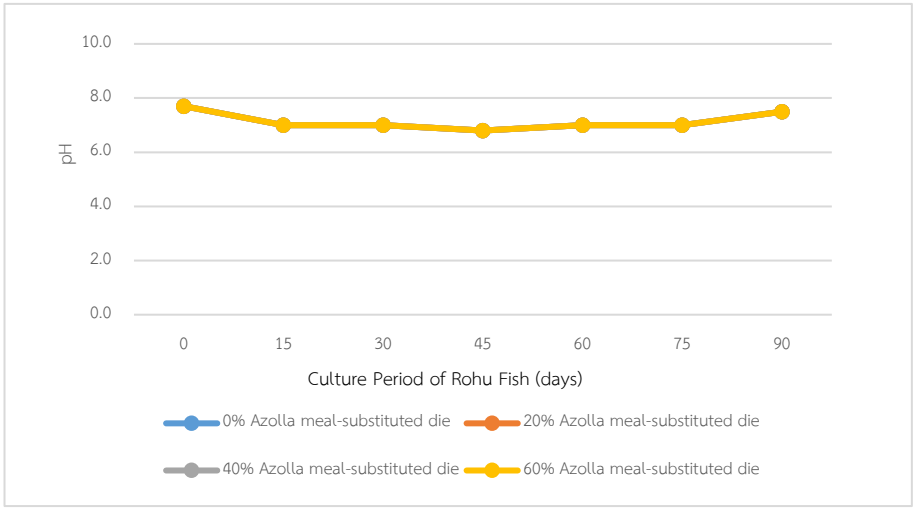


Figure 4 pH in the culture ponds of *Labeo rohita* during different rearing periods

สำหรับค่าปริมาณแอมโมเนียรวม (Total Ammonia Nitrogen; TAN) อยู่ในช่วง 0.05–0.14 มิลลิกรัมต่อลิตร (Figure 5) ซึ่งอยู่ในระดับที่ปลอดภัยและไม่เกินค่าที่แนะนำสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยการควบคุมค่า TAN ให้อยู่ในระดับต่ำมีความสำคัญต่อการลดความเสี่ยงจากการสะสมของแอมโมเนียที่อาจส่งผลกระทบต่อเหงือก ระบบหายใจ และการเจริญเติบโตของปลา [33,37] ค่าที่ตรวจวัดได้ในงานวิจัยนี้จึงสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบการจัดการน้ำที่สามารถควบคุมของเสียได้อย่างเหมาะสม

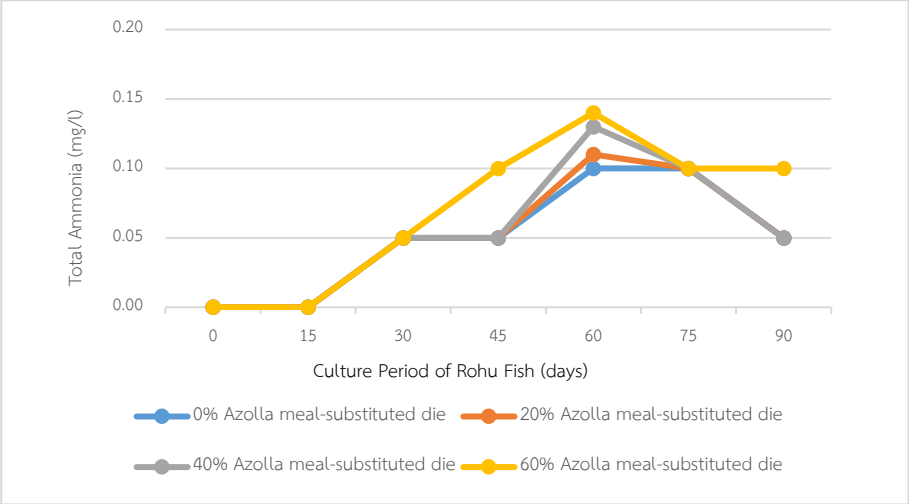


Figure 5 Total Ammonia in the culture ponds of *Labeo rohita* during different rearing periods

โดยสรุป คุณภาพน้ำในระบบการทดลองนี้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมและมีเสถียรภาพตลอดระยะเวลาการทดลอง จึงไม่เป็นปัจจัยจำกัดต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์อาหารของปลา ทั้งนี้ ความเหมาะสมของคุณภาพน้ำยังช่วยสนับสนุนให้สามารถประเมินผลของแหนแดงในฐานะแหล่งโปรตีนทดแทนได้อย่างชัดเจน โดยลดอิทธิพลแทรกซ้อนจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ทำให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการเลี้ยงจริงได้

สรุปผล

การศึกษาครั้งนี้สรุปได้ว่า การใช้แหนแดงอบแห้งทดแทนกากถั่วเหลืองในระดับ 40% เป็นระดับที่เหมาะสมสำหรับใช้ในอาหารปลายี่สกเทศ เนื่องจากสามารถลดต้นทุนค่าอาหารได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์อาหารของปลา อีกทั้งยังมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์น้ำทางเลือกที่ยั่งยืนใน เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอาหารในกลุ่มควบคุม สะท้อนให้เห็นว่าปลายี่สกเทศสามารถใช้ประโยชน์จากแหนแดงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ในระดับการทดแทนที่ค่อนข้างสูง นอกจากนี้ การใช้แหนแดงยังช่วยลดการพึ่งพาวัตถุดิบโปรตีนเชิงพาณิชย์ เช่น กากถั่วเหลือง ซึ่งมีต้นทุนสูงและมีความผันผวนด้านราคา ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนการผลิตอาหารปลาได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในกรณีที่มีการเพาะเลี้ยงแหนแดงเพื่อใช้ภายในฟาร์ม ซึ่งจะช่วยเพิ่มความคุ้มค่าในการผลิตและลดต้นทุนด้านวัตถุดิบจากภายนอก ในด้านการประยุกต์ใช้ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำแหนแดงไปใช้เป็นวัตถุดิบในสูตรอาหารปลายี่สกเทศในระดับเชิงพาณิชย์ อีกทั้งยังมีส่วนสนับสนุนการพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างยั่งยืน เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่สามารถผลิตได้ในท้องถิ่น ใช้ทรัพยากรต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาต่อยอดในด้านระดับการใช้ที่เหมาะสมในระยะยาว คุณภาพเนื้อปลา ตลอดจนผลกระทบต่อสุขภาพปลาและระบบภูมิคุ้มกัน เพื่อเพิ่มความครอบคลุมของข้อมูลและรองรับการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณาจารย์ หลักสูตรเทคโนโลยีการประมง สาขาประมง คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ในการสนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ในการวิเคราะห์ผลงานในการทำวิทยานิพนธ์ และขอบพระคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดมุกดาหาร กรมประมง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการทดลอง ในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. สุจิต ภิญโญยิ่ง. 2519. แนะนำปลายี่สกเทศ. รายงานการประชุมทางวิชาการเกษตรศาสตร์และชีววิทยาแห่งชาติ ครั้งที่ 15 สาขาสัตว์. 1-5. https://agkb.lib.ku.ac.th/KUCON/Detail/1579
2. กลุ่มสถิติการประมง กองนโยบายและแผนพัฒนาการประมง กรมประมง. สถิติการประมงแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2564 (Fisheries Statistics of Thailand 2021). 2565. เอกสารเผยแพร่ ฉบับที่ 14/2565. https://www4.fisheries.go.th/local/file_document/20221129154933_1_file.pdf
3. Liu, X. Olden, J. D., Wu, R., Ouyang, S., Wu, X. 2022. Dam Construction Impacts Fish in a Subtropical River Network. China Diversity. 14(6): 476. https://doi.org/10.3390/d14060476
4. Daniel, N. 2018. A review on replacing fish meal in aqua feeds using plant protein sources. International Journal of Fisheries and Aquatic Studies, 6(2), 164-179. https://www.fisheriesjournal.com/archives/2018/vol6issue2/PartC/6-1-35-823.pdf
5. Shepherd, C. J., Jackson, A. J. 2013. Global fishmeal and fish-oil supply: inputs, outputs and marketsa. Journal of Fish Biology, 83(4), 1046-1066. https://doi.org/10.1111/jfb.12224
6. Oliva-Teles, A., Enes, P., Peres, H. 2015. 8-Replacing fishmeal and fish oil in industrial aquafeeds for carnivorous fish. In Feed and feeding practices in aquaculture. (pp. 203-233). Portugal: Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100506-4.00008-8
7. Bocchi, S., A. Malgioglio. 2010. Azolla-anabaena as a Biofertilizer for Rice Paddy Fields in the Po Valley, a Temperate Rice Area in Northern Italy. International Journal of Agronomy. 1: 1-5. https://doi.org/10.1155/2010/152158
8. Watanabe, I., C. Ramirez. 1990. Phosphorus and nitrogen contents of Azolla grown in the Philippines. Soil Science and Plant Nutrition. 36(2): 319-331. https://doi.org/10.1080/00380768.1990.10414998
9. Chen, XY., Zhou, J., Luo, L. P., Han, B., Li, F., Chen, J. Y., Zhu, Y. F., Chen, W., Yu, X. P. 2015. Black rice anthocyanins suppress metastasis of breast cancer cells by targeting RAS/RAF/MAPK pathway. BioMed Research International, 2015, 1-11. https://doi.org/10.1155/2015/414250
10. Sadeghi, R, R Zariami, K Sabetraftar, and P.V. Damme. 2013. A review of some ecological factors affecting growth of *Azolla spp*. Caspian Journal of Environmental Sciences. 11(1): 65-76. https://cjes.guilan.ac.ir/article_1207_279.html

11. Yadav, R. K., Abraham, G., Singh, Y. V., & Singh, P. K. 2014. Advancements in the utilization of Azolla-anabaena system in relation to sustainable agricultural practices. In Proc. Indian Natl. Sci. Acad Vol.80, No. 2, pp.301-316. https://doi.org/10.16943/ptinsa/2014/v80i2/55108
12. ประยูร สวัสดี, บรรหาร แตงฉ่ำ. 2545. แหนแดง ชีววิทยาและการใช้ประโยชน์. เอกสารวิชาการ ปุ๋ยชีวภาพ. 163-212. https://kukr.lib.ku.ac.th/KUCON/Detail/1812
13. Cary. P.R., and P.G.J. Weerts. 1992. Growth and nutrient composition of *A. pinnota R. Brown and A. filiculoides* Lamarck as affected by water temperature, nitrogen and phosphorus supply, light intensity and pH. Aquatic Botany. 43: 163-180. https://doi.org/10.1016/0304-3770(92)90041-G
14. ศิริลักษณ์ แก้วสุรลิขิต, ประไพ ทองระอา. 2557. การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแหนแดงที่ใช้เป็นวัสดุสำหรับการผลิตปุ๋ยชีวภาพละลายฟอสเฟต. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ กรมวิชาการเกษตร.
15. Lumpkin, T. A., Plucknett, D. L. 1980. Azolla: Botany, physiology, and use as a green manure. *Economic Botany*, 34(2), 111-153. https://link.springer.com/article/10.1007/BF02858627
16. Alalade, O. A., Iyayi, E. A. 2006. Chemical composition and feeding value of Azolla (*Azolla pinnata*) meal for egg-type chicks. *International Journal of Poultry Science*, 5(2), 137-141. https://doi.org/10.3923/ijps.2006.137.141
17. Becker, E. W. 2007. Microalgae as a source of protein. *Biotechnology Advances*, 25(2), 207-210. 10.1016/j.biotechadv.2006.11.002
18. อนุรักษ์ เขียวขจรเขต, อมรรัตน์ วันอังคาร, กุลยาภัสร์ วุฒิจารี, ณัฐมนตรี คงกระพันธ์, ณัฐพงศ์ วงศ์ใหญ่. 2555. การใช้ประโยชน์จากแหนแดงอบแห้งในอาหารปลานิลแปลงเพศ (*Oreochromis niloticus Linn.*). วารสารแก่นเกษตร, 40 (ฉบับพิเศษ 2), 518–521. https://cads.arda.or.th/th/documents/research/99ac0831-084e-4263-a633-bd7e186cf7f9
19. Fiogbé, E. D., Micha, J. C., Van Hove, C. 2004. Use of a natural aquatic fern, *Azolla microphylla*, as a main component in food for the omnivorous-phytoplanktonophagous tilapia, Oreochromis niloticus L. Journal of Applied Ichthyology. 20(6): 517–520. https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2004.00562.x
20. Refaey, M. M., A. I., Mehrim, O, A., Zenhom, H, A., Areda, J, A., Ragaza, M, S., Hassaan. 2023. Fresh Azolla, *Azolla pinnata* as a Complementary Feed for *Oreochromis niloticus*: Growth, Digestive Enzymes, Intestinal Morphology, Physiological Responses, and Flesh Quality. Aquaculture Nutrition, 28, 1-13. https://doi.org/10.1155/2023/1403704
21. Yılmaz, E., Akyurt, İ., & Günal, G. (2004). Use of duckweed, Lemna minor, as a protein feedstuff in practical diets for common carp, Cyprinus carpio, fry. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 4(2), 105-109. https://www.trjfas.org/uploads/pdf_238.pdf
22. Leterme, P., Londoño, A. M., Ordoñez, D. C., Rosales, A., Estrada, F., Bindelle, J., Buldgen, A. 2010. Nutritional value and intake of aquatic ferns (*Azolla filiculoides* Lam. and *Salvinia molesta* Mitchell.) in sows. Animal Feed Science and Technology. 155: 55-64. doi:10.1016/j.anifeedsci.2009.10.002
23. Hasan, M. R., Chakrabarti, R. 2009. Use of algae and aquatic macrophytes as feed in small-scale aquaculture: A review (FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 531). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/3/i1141e/i1141e.pdf

24. Abou, Y., Fiogbé, E. D., & Micha, J. C. 2007. Effects of stocking density on growth, yield, and profitability of farming Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L., fed *Azolla-diet*, in earthen ponds. Aquaculture Research, 38(6), 595-604. doi.org https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01700.x
25. Ahouansou Montcho, S. 2011. Diversity and Exploitation of Fish from the Pendjari River (Benin, West Africa). Doctor's Thesis: University of Abomey-Calavi, 234 p. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2072932
26. นเรศ นาเมืองรักษ์, ชลธิชา พิชคำ, อนุพงษ์ สนิทชน, นัยน์ปพร ศาลาแก้ว. 2563. ศึกษาการเลี้ยงปลายี่สกเทศในกระชัง ให้ได้ขนาด 100 กรัม ด้วยความหนาแน่นสูง. เอกสารวิชาการฉบับที่ -/2563 กองวิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด กรมประมง. https://www4.fisheries.go.th/local/file_document/20200916105903_1_file.pdf
27. AOAC INTERNATIONAL. 2019. Official Methods of Analysis of AOAC International. 21st ed. AOAC International, Rockville, MD, USA. Available from: AOAC Official Methods of Analysis.
28. Tiwari, P. K., Vyas, V., Dubey, S., Singh, S. M., Pandey, S., Banchhod, S., Kshatri, A. S., Singh, P. 2024. The potential effects of *Azolla* as a growth promoter for *Labeo rohita* fingerlings. *Asian* Journal of Current Research. 9(2): 173-178. https://doi.org/10.56557/AJOCR/2024/v9i28678
29. Kumari, R., Ojha, M.L., Saini V.P., Sharma, S.K. 2017. Effect of Azolla supplementation on growth of rohu (*Labeo rohita*) fingerlings. Journal of Entomology and Zoology Studies, 5(4): 1116-1119. https://www.entomoljournal.com/archives/2017/vol5issue4/PartO/5-4-54-783.pdf
30. EL-SAYED, A.F.M. 1992. Effects of substituting fish meal with Azolla pinnata in practical diets for fingerling and adult Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). Aquaculture Research, 23: 167-173. https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.1992.tb00607.x
31. Ogino, C. 1980. Requirements of carp and rainbow trout for essential amino acids. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 46(2): 171-174. https://doi.org/10.2331/suisan.46.171
32. De Silva SS, Anderson TA. 1995. Fish Nutrition in Aquaculture. Chapman & Hall Aquaculture, London. UK. 319 p. https://catalogue.nla.gov.au/catalog/555173
33. Boyd, C. E. 1998. *Water quality for pond aquaculture*. Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3011416
34. Boyd, C. E. 2015. *Water quality: An introduction* (2nd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17446-4
35. Boyd, C. E., Tucker, C. S. 1998. *Pond Aquaculture Water Quality Management*. Springer, New York, USA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5407-3
36. Lawson, T. B. 1995. Fundamentals of aquacultural engineering. Springer Science & Business Media. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0479-1
37. Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. 2010. *Recirculating Aquaculture*. 2nd ed. Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, New York, USA. https://www.amazon.com/Recirculating-Aquaculture-M-B-Timmons-Ebeling/dp/0971264627

บทความวิจัย (Research Article)

พฤติกรรมการตอบสนองของระบบการควบคุมแบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัดด้วยตัวควบคุมพี พีไอ พีดี และพีไอดี

Response Behavior of a Control System for a Single-Beam Twin-Propeller Vertical Balancing Flight Model Using a P, PI, PD, and PID Controller

สมเจตน์ บุญชื่น[1] ชาญณรงค์ ท้าวอาสา[1] วรณัฏฐ์ ช้างต่อ[1] ณัฐวุฒิ คำเหลือง[1] ทวีศักดิ์ วรจักร์[1] พจน์ ชัยอ้าย[1] นัฐพงษ์ เนินชัด[1] ธนภูมิ เฟื่องเพียร[1] และ อุมาพร จันธิมา[2*]

Somjate Bunchuen[1], Channarong Thaoarsa[1], Woranat Changto[1], Nattawut Kamlueng[1], Thaweesak Worachak[1], Poth Chaiaye[1], Nattapong Nernchad[1], Thanapoom Fuangpian[1] and Umaporn Chanthima[2*]

[1]*คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์*

[1]*Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University*

[2]*คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ศิลปะและการออกแบบ มหาวิทยาลัยนเรศวร*

[2]*Faculty of Architecture, Art and Design, Naresuan University*

*Corresponding author; email: umapornc@nu.ac.th

วันที่รับบทความ (Received) 8 มิถุนายน 2569 | วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised) 13 กรกฎาคม 2569 | วันที่ตอบรับบทความ (Accepted) 14 กรกฎาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด และเปรียบเทียบพฤติกรรมการตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมสี่รูปแบบ ได้แก่ พี พีไอ พีดี และพีไอดี การทดลองกำหนดตำแหน่งสมดุลของคานที่ 90 องศา จากนั้นทดสอบการตอบสนองที่มุมอ้างอิง 110 องศา 120 องศา และ 130 องศา โดยประเมินจากค่าโอเวอร์ชูต เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว และค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว ผลการทดลองที่มุมอ้างอิง 110 องศา พบว่าตัวควบคุมแบบพีดีให้ผลดีที่สุดด้านโอเวอร์ชูต โดยมีค่าโอเวอร์ชูต 0.50% เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 2.01 วินาที และค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว 0.55 องศา ขณะที่ตัวควบคุมแบบพีไอดีมีค่าโอเวอร์ชูต 1.86% เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 2.43 วินาที และค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว 1.90 องศา ที่มุมอ้างอิง 120 องศา ตัวควบคุมแบบพีดีให้ค่าโอเวอร์ชูตต่ำที่สุด 0.41% เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 4.02 วินาที และค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว 0.45 องศา สำหรับมุมอ้างอิง 130 องศา ตัวควบคุมแบบพีดีมีค่าโอเวอร์ชูต 3.73% เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 1.15 วินาที และค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว 4.10 องศา ตัวควบคุมแบบพีไอดีมีค่าโอเวอร์ชูต 6.04% เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 2.97 วินาที และค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว 3.20 องศา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบพีดีเหมาะสมที่สุดด้านการลดโอเวอร์ชูตและการตอบสนองที่รวดเร็ว ส่วนตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว

คำสำคัญ: ระบบควบคุม, ตัวควบคุมพีไอ, ตัวควบคุมพีไอดี, คานเดี่ยวสองใบพัด, บินทรงตัวในแนวดิ่ง

Abstract

This research aims to develop a single-beam twin-propeller vertical balancing flight model and compare the response behaviors of the system controlled by four controller types: P, PI, PD, and PID controllers. In the experiments, the beam equilibrium position was set to 90°. The response tests were then conducted at reference angles of 110°, 120°, and 130°. The system performance was evaluated in terms of overshoot, settling time, and steady-state error. At the reference angle of 110 °, the PD controller provided the best overshoot performance, with an overshoot of 0.50%, a settling time of 2.01 s, and a steady-state error of 0.55 °. Meanwhile, the PID controller produced an overshoot of 1.86%, a settling time of 2.43 s, and a steady-state error of 1.90 °. At the reference angle of 120 °, the PD controller achieved the lowest overshoot of 0.41%, with a settling time of 4.02 s and a steady-state error of 0.45 °. At the reference angle of 130 °, the PD controller produced an overshoot of 3.73%, a settling time of 1.15 s, and a steady-state error of 4.10 °. The PID controller produced an overshoot of 6.04%, a settling time of 2.97 s, and a steady-state error of 3.20 °. The experimental results show that the PD controller is the most suitable for reducing overshoot and achieving a fast response, while the PID controller can compensate for steady-state error.

Keywords: control system, PD controller, PID controller, single-beam twin-propeller, vertical balancing fli

บทนำ

ในปัจจุบันระบบควบคุมอัตโนมัติมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม เมคคาทรอนิกส์ หุ่นยนต์ อากาศยานไร้คนขับ และระบบอุตสาหกรรม เนื่องจากจำเป็นต้องควบคุมตัวแปรทางกายภาพ เช่น ตำแหน่ง ความเร็ว มุม องศา แรง อุณหภูมิ และระดับความสูงให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดอย่างมีเสถียรภาพ หลักการที่นิยมใช้ควบคุมตัวแปรดังกล่าวคือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์หรือระบบสมองกลฝังตัวได้ ตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional–Integral–Derivative Controller, PID)เป็นตัวควบคุมระบบที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง งานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมความสูงของเครื่องบินสี่ใบพัดขนาดเล็กพบว่าการใช้ตัวควบคุมร่วมกับตัวสังเกตคาลมานช่วยปรับปรุงความสามารถในการควบคุมระดับเพดานบินได้ดีขึ้น [1] ขณะที่งานวิจัยด้านการควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบพีไอดีสามารถทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ตอบสนองต่อค่ากำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2] นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาตัวควบคุมพีไอและพีไอดีร่วมกับบอร์ดอีเอสพีสามสองในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสร่วมกับตัวกรองคาลมาน [3]

ตัวควบคุมแบบพีดีและพีไอดีมีบทบาทสำคัญในงานควบคุมระบบที่เกี่ยวข้องกับการทรงตัว เนื่องจากระบบทรงตัวมีความไม่เสถียรและตอบสนองไวต่อสิ่งรบกวน งานวิจัยที่เสนอการออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์ดุลยภาพด้วยตัวควบคุมพื้นฐานโดยใช้ MATLAB/Simulink แสดงให้เห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมสามารถทำให้ระบบที่ไม่เสถียรสามารถรักษาสมดุลได้ [4] สอดคล้องกับงานวิจัยการออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์ดุลยภาพด้วยตัวควบคุมพีดีและแอลคิวอาร์ ซึ่งพบว่าพจน์อนุพันธ์มีส่วนช่วยลดการแกว่งและเพิ่มเสถียรภาพของระบบ [5] แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยนี้โดยการนำเซนเซอร์วัดมุมเป็นสัญญาณป้อนกลับเพื่อควบคุมการบินเป็นแรงยกจากใบพัดทั้งสองด้าน หากแรงยกสองด้านไม่สมดุล คานจะเกิดการเอียงขึ้นหรือลงทันที

สำหรับระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์และใบพัด งานวิจัยเกี่ยวกับอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุนสี่ใบพัดได้นำเสนอระบบควบคุมทิศทางแรงขับเสริมเพื่อเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแรงขับของใบพัดมีผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่และเสถียรภาพของอากาศยานโดยตรง [6] งานวิจัยที่สร้างแบบจำลองและจำลองคุณลักษณะทางพลวัตของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก เพื่อศึกษาความมีเสถียรภาพ การควบคุม และการตอบสนองต่อสัญญาณควบคุม ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติได้ [7] นอกจากนี้ การออกแบบระบบควบคุมอากาศยานไร้คนขับยังต้องพิจารณาสมรรถนะของระบบควบคุมทั้งในด้านเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว ค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว และความพยายามในการควบคุม โดยมีงานวิจัยที่ออกแบบระบบควบคุมวงในของอากาศยานไร้คนขับแบบปีกตรึงด้วยตัวควบคุมพีไอดี และใช้กระบวนการหาค่าเหมาะที่สุดในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม [8] สำหรับระบบอากาศยานที่ใช้ใบพัดเป็นแหล่งสร้างแรงยก งานวิจัยด้านการออกแบบและควบคุมอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดได้แสดงให้เห็นว่าการจัดวางใบพัด ทิศทางแรงขับ และโครงสร้างตัวควบคุมมีผลต่อความสามารถในการควบคุมการเคลื่อนที่และเสถียรภาพของอากาศยาน โดยเฉพาะงานออกแบบอากาศยานไร้คนขับแบบ 5 ใบพัดหมุนที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีแบบไม่เชิงเส้น และการจัดสรรแรงขับของโรเตอร์เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ต้องการ [9] สำหรับการนำเสนอการควบคุมระบบ Twin Rotor MIMO System (TRMS) ซึ่งเป็นระบบที่มีลักษณะใกล้เคียงกับแบบจำลองอากาศยานขนาดเล็ก มีพฤติกรรมไม่เชิงเส้นสูงและมีการเชื่อมโยงระหว่างตัวแปรควบคุมหลายตัว จึงได้ออกแบบและเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบ PID และ LQR (Linear Quadratic Regulator) ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบในระนาบแนวดิ่งและแนวระดับ [10] นอกจากนี้การศึกษาแบบจำลองเชิงเส้นและการควบคุมระบบ Twin Rotor Aero-dynamical System (TRAS) จึงได้ออกแบบตัวควบคุมเชิงเส้นสามรูปแบบได้แก่ 1) ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะเต็ม (Full State Feedback, FSF) 2) LQR และ 3) PID เพื่อควบคุมตำแหน่งเชิงมุมและความเร็วเชิงมุมของระบบในระนาบแนวดิ่งและแนวระดับ ผลการจำลองและ

การทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแต่ละแบบมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน โดย LQR ให้สมรรถนะที่ดีกว่า แต่ต้องใช้ความพยายามในการควบคุม (control effort) มากกว่า ขณะที่ PID เป็นวิธีที่เรียบง่ายและสามารถใช้งานได้ดีกับแบบจำลองเชิงเส้น [11]

แม้ว่าตัวควบคุมแบบ PID จะถูกนำไปใช้ในงานควบคุมอย่างแพร่หลาย แต่งานวิจัยจำนวนมากยังเน้นการจำลองหรือการประยุกต์กับระบบเฉพาะด้าน ขณะที่การเปรียบเทียบพฤติกรรมของตัวควบคุมพี (P) พีไอ (PI) พีดี (PD) และพีไอดี PID กับชุดทดลองจริงของระบบคานเดี่ยวสองใบพัดยังมีค่อนข้างจำกัด โดยเฉพาะการวิเคราะห์ผลตอบสนองของมุมเอียงภายใต้มุมอ้างอิงหลายระดับ งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมมุมเอียงของคานด้วยตัวควบคุมรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ พี พีไอ พีดี และพีไอดี โดยใช้เอ็นโค้ดเดอร์วัดมุมเป็นสัญญาณป้อนกลับ และใช้บอร์ด Arduino Uno ประมวลผลสัญญาณควบคุมไปยังชุดใบพัดทั้งสองด้าน เพื่อเปรียบเทียบค่าโอเวอร์ชูต เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว และค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ ซึ่งผลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมการทรงตัวของอากาศยานจำลอง หุ่นยนต์ทรงตัว และระบบควบคุมเชิงกลที่ต้องการความแม่นยำและเสถียรภาพต่อไป

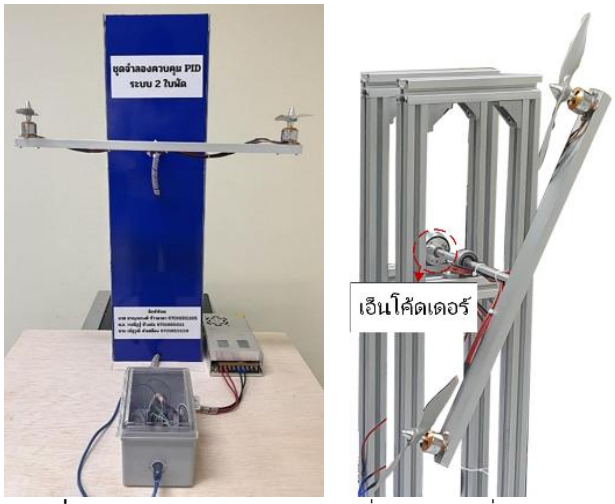
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

สร้างแบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด และเปรียบเทียบพฤติกรรมการตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมสี่รูปแบบ ได้แก่ พี พีไอ พีดี และพีไอดี ที่มุมอ้างอิง 110 องศา 120 องศา และ 130 องศา โดยประเมินจากค่าโอเวอร์ชูต เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว และค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว

วิธีดำเนินการวิจัย

1 แบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างแบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัดแสดงดังภาพที่ 1 เพื่อศึกษาการควบคุมมุมเอียงของระบบให้สามารถรักษาสมดุลตามค่ามุมอ้างอิงที่กำหนดได้ ระบบจำลองประกอบด้วยคานเดี่ยวน้ำหนักเบายาว 40 เซนติเมตร ที่มีจุดหมุนอยู่กึ่งกลางของคาน โดยปลายคานทั้งสองด้านติดตั้งชุดใบพัด ซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไร้แปรงถ่านรุ่น A2212/15T 930KV ความเร็ว 1000 รอบต่อนาทีต่อแรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ ชุดใบพัดทั้งสองทำหน้าที่สร้างแรงยกในแนวดิ่ง เมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์ทั้งสองด้านแตกต่างกัน จะทำให้เกิดแรงบิดรอบจุดหมุน ส่งผลให้คานเกิดการเอียงขึ้นหรือลงตามทิศทางของแรงยกที่เกิดขึ้น

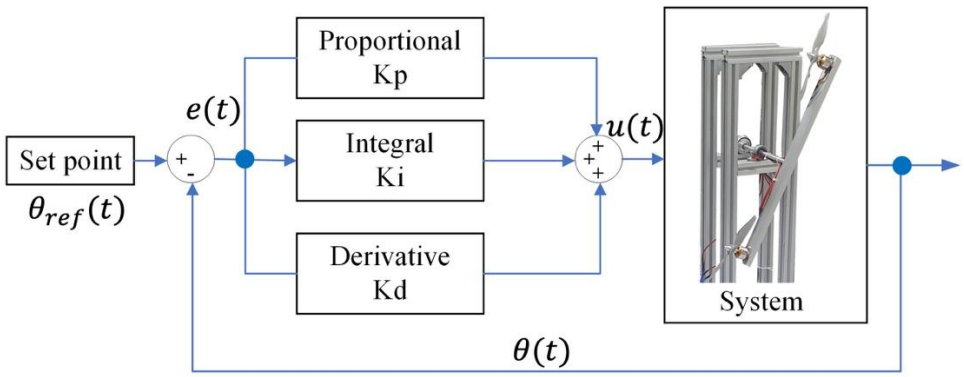


ภาพที่ 1 ระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด

ระบบดังภาพที่ 1 มีลักษณะคล้ายการเคลื่อนที่ในแนวพิทช์ของอากาศยาน โดยตัวแปรที่ต้องการควบคุมคือมุมเอียงของคานเทียบกับแนวระดับ การวัดมุมเอียงของคานใช้เอ็นโค้ดเดอร์รุ่น AHT3806 600P/R ตรวจวัดมุม ซึ่งติดตั้งในแนวแกนเดียวกันกับจุดหมุนของคาน เพื่อส่งค่ามุมปัจจุบันกลับมายังบอร์ดควบคุมซึ่งงานวิจัยนี้ใช้บอร์ดอาดูโนยูโน (Arduino Uno) จากนั้นบอร์ดควบคุมจะนำค่ามุมที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับค่ามุมอ้างอิง แล้วคำนวณสัญญาณควบคุมเพื่อปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ทั้งสองด้านผ่านวงจรขับมอเตอร์ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้บอร์ดรุ่นอีเอสซี 30 แอมแปร์ (ESC 30A)

2 ตัวควบคุมพีไอดี

งานวิจัยนี้ใช้ตัวควบคุมพีไอดีแบบป้อนกลับแสดงดังภาพที่ 2 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในงานควบคุมอัตโนมัติ [12] เนื่องจากมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สามารถปรับแต่งค่าได้ง่าย [13] และให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้ตัวควบคุมพีไอดีใช้ควบคุมมุมเอียงของแบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างมุมอ้างอิงกับมุมที่วัดได้จริงเป็นสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม



ภาพที่ 2 ระบบควบคุมพีไอดีแบบป้อนกลับสำหรับระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด

ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบสามารถกำหนดได้จากสมการที่ 1

$$e(t) = \theta_{ref}(t) - \theta(t) \tag{1}$$

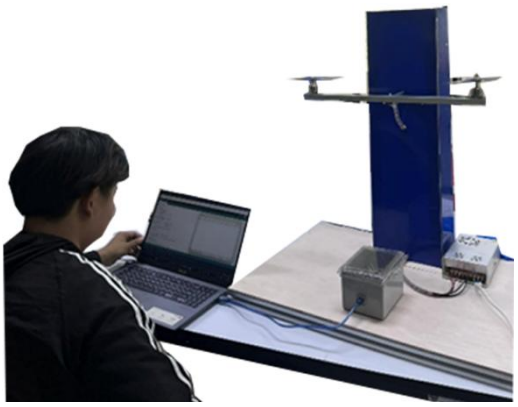
เมื่อ $e(t)$ คือค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่เวลา t $\theta_{ref}(t)$ คือค่ามุมอ้างอิง และ $\theta(t)$ คือค่ามุมเอียงจริงที่วัดได้จากระบบ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดีสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2 นั่นคือ

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e\,(t)di + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{2}$$

เมื่อ $u(t)$ คือสัญญาณควบคุมที่ส่งไปยังชุดขับมอเตอร์ K_p คืออัตราขยายเชิงสัดส่วน K_i คืออัตราขยายเชิงปริพันธ์ และ K_d คืออัตราขยายเชิงอนุพันธ์

3 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากการตรวจสอบความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ ได้แก่ คานเดี่ยว ชุดมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ใบพัด วงจรขับมอเตอร์ เอ็นโค้ดเดอร์เซนเซอร์ แหล่งจ่ายไฟ และบอร์ดควบคุมพร้อมเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ติดตั้งการทดลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด

ขั้นตอนที่ 2 ก่อนเริ่มการทดลองได้ปรับเทียบเอ็นโค้ดเดอร์โดยวางคานให้อยู่ในแนวระดับและกำหนดค่ามุมเริ่มต้นเป็น 90 องศา จากนั้นทดสอบหมุนมอเตอร์ทั้งสองด้านในระดับสัญญาณ PWM ที่ใกล้เคียงกัน และปรับค่าชดเชย (offset) ของสัญญาณควบคุมแต่ละด้านจนคานสามารถรักษาตำแหน่งใกล้ 90 องศาได้มากที่สุด

ขั้นตอนที่ 3 การทดลองเริ่มจากป้อนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (K_p , K_i และ K_d) เข้าสู่โปรแกรมควบคุม ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ใช้วิธีการปรับจูนแบบทดลองทีละขั้น โดยเริ่มจากการกำหนดค่า K_i และ K_d เป็นศูนย์ แล้วปรับค่า K_p จนระบบสามารถตอบสนองต่อมุมอ้างอิง จากนั้นเพิ่มค่า K_i เพื่อชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว และเพิ่มค่า K_d เพื่อลดการแกว่งและค่าโอเวอร์ชูตของระบบ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแต่ละกรณีถูกเลือกจากชุดค่าที่ให้การตอบสนองของระบบมีความสมดุลที่สุดภายใต้เงื่อนไขของมุมอ้างอิงที่กำหนด จากนั้นป้อนมุมอ้างอิง $\theta_{ref}(t)$ เพื่อให้มอเตอร์ทั้งสองด้านหมุนสร้างแรงยกที่ต่างกัน เอ็นโค้ดเดอร์ตรวจวัดมุมเอียง $\theta(t)$ ของคานและส่งข้อมูลมุมองศากลับไปยังระบบควบคุมเพื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ และสร้างสัญญาณควบคุม $u(t)$ แบบคาบเวลา (Discrete-time)

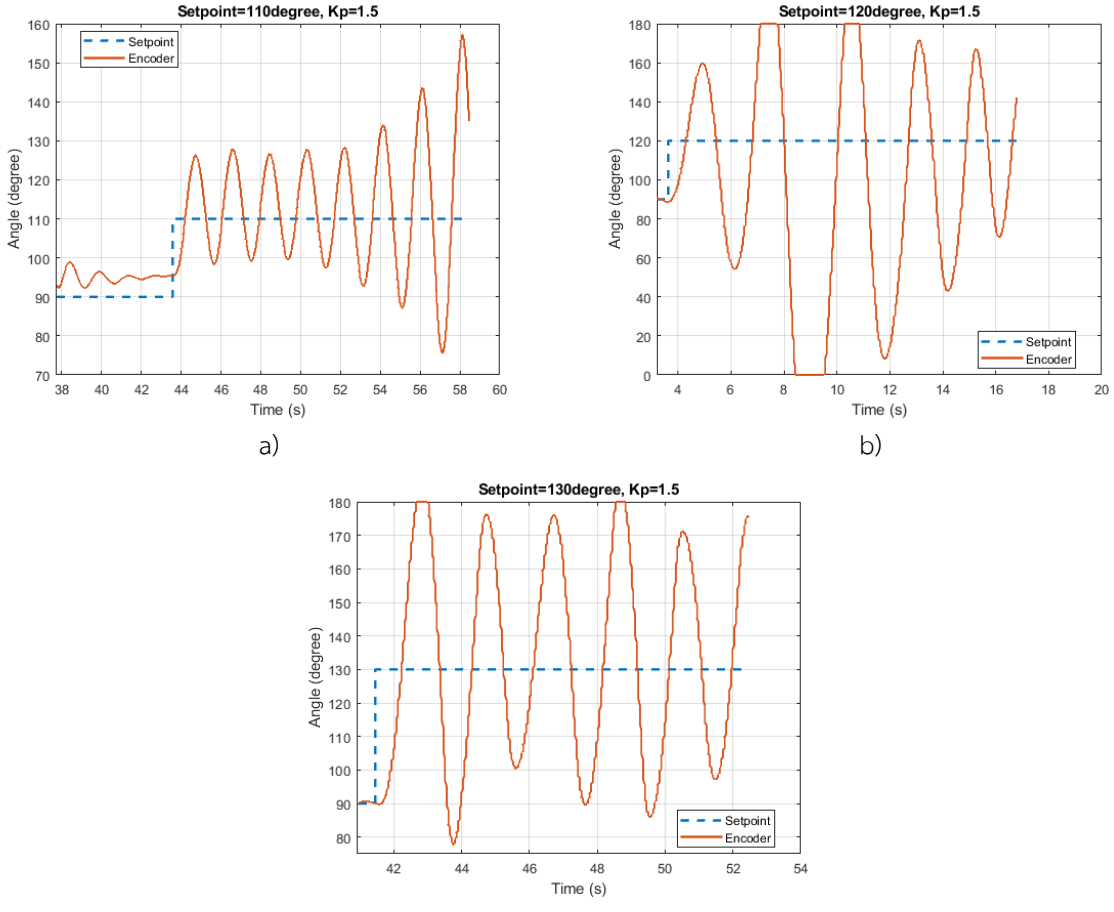
ขั้นตอนที่ 4 ดำเนินการบันทึกค่ามุมเอียงของคาน ค่ามุมอ้างอิง และพฤติกรรมการตอบสนองของระบบในแต่ละค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ การเกิดโอเวอร์ชูต (Overshoot) ความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว (Steady-State Error) ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling Time) และลักษณะการแกว่งของคาน นอกจากนี้ยังสามารถทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่ามุมอ้างอิงสามค่า ได้แก่ 110 องศา 120 องศา และ 130 องศาเพื่อวิเคราะห์ความสามารถของตัวควบคุม ในการเลือกมุมอ้างอิง 110 องศา 120 องศา และ 130 องศา มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการตอบสนองของระบบเมื่อคานเบี่ยงเบนจากตำแหน่งสมดุล 90 องศาในระดับที่แตกต่างกัน โดยมุม 110 องศาใช้แทนการเปลี่ยนแปลงระดับต่ำ มุม 120 องศาใช้แทนการเปลี่ยนแปลงระดับปานกลาง และมุม 130 องศาใช้แทนการเปลี่ยนแปลงระดับสูง

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผล โดยค่า Overshoot คำนวณจากค่าสูงสุดของกราฟหลังมีการเปลี่ยนมุมอ้างอิง ค่า Settling Time พิจารณาจากเวลาที่สัญญาณมุมเอียงเข้าสู่บริเวณใกล้ค่ามุมอ้างอิง และค่า Steady-State Error คำนวณจากผลต่างระหว่างมุมอ้างอิงกับค่ามุมในช่วงท้ายของการทดลอง

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1 การทดลองควบคุมแบบพี

จากภาพที่ 4 แสดงผลการทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีเมื่อตั้งค่าอัตราขยายพารามิเตอร์ K_p เท่ากับ 1.5 ในสภาวะเริ่มต้นระบบอยู่ในตำแหน่งสมดุลทำให้อ่านค่ามุมจากเอ็นโค้ดเดอร์เท่ากับ 90 องศา จากนั้นตั้งค่ามุมอ้างอิงไปที่ 110 องศา 120 องศา และ 130 องศา ดังภาพที่ 4 a) b) c) ตามลำดับ พบว่าระบบมีการตอบสนอง แต่เกิดโอเวอร์ชูต (Overshoot) มีค่า 41.82% 54.54% และ 45.45% เพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว (Steady-State Error) มีค่าค่อนข้างสูงและไม่สม่ำเสมอ แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบพี เพียงอย่างเดียวไม่สามารถลดความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัวได้

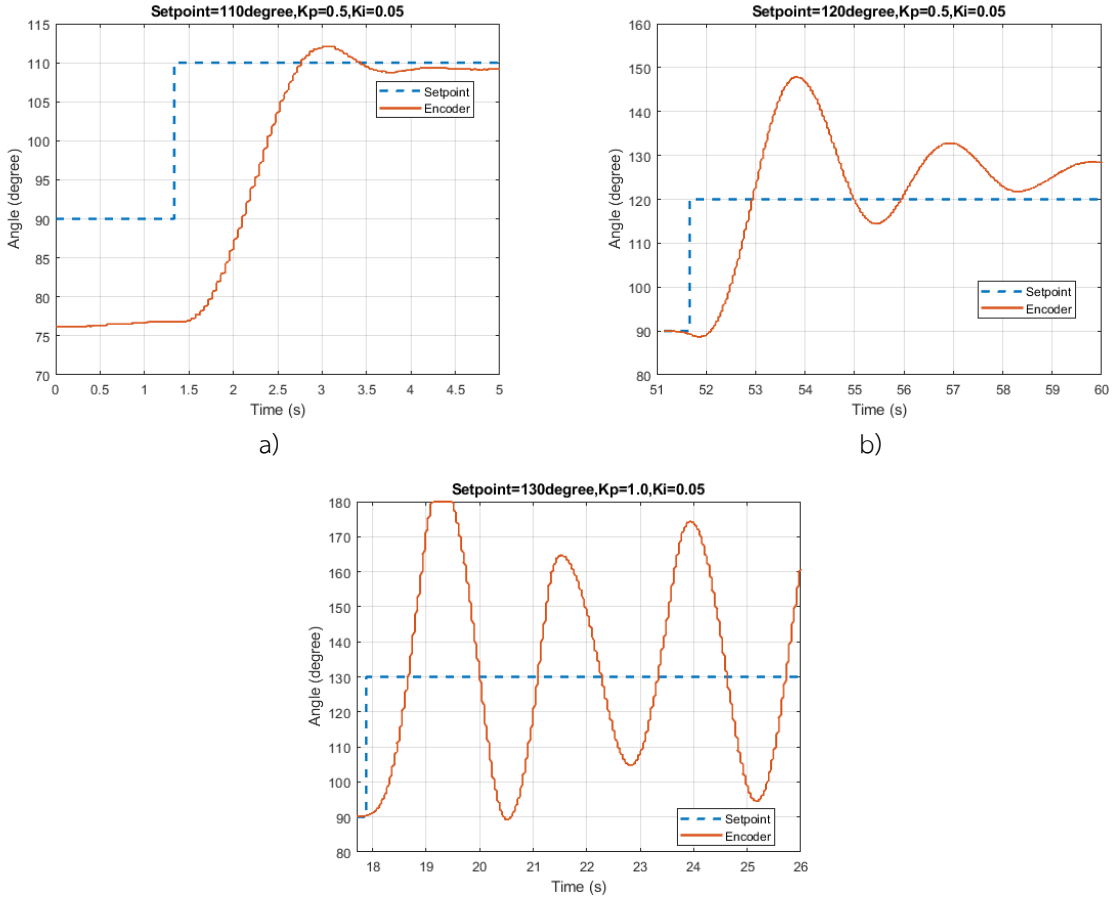


ภาพที่ 4 การทดลองควบคุมระบบเมื่อตั้งค่าตัวควบคุมแบบพีเท่ากับ 1.5 a) ที่มุมอ้างอิง 110 องศา b) ที่มุมอ้างอิง 120 องศา และ c) ที่มุมอ้างอิง 130 องศา

2 การทดลองควบคุมแบบพีไอ

จากภาพที่ 5 แสดงผลการทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยทดลองที่มุมอ้างอิง 110 องศา 120 องศา และ 130 องศาตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเมื่อกำหนดมุมอ้างอิงเท่ากับ 110 องศา ดังภาพที่ 5 a) ระบบสามารถตอบสนองต่อค่ามุมอ้างอิงได้ โดยมุมเอียงที่วัดได้จากเอ็นโค้ดเดอร์เพิ่มขึ้นจากตำแหน่งเริ่มต้นเข้าสู่ค่ามุมอ้างอิงและเกิดโอเวอร์ชูตเพียงเล็กน้อย ก่อนที่ระบบจะเข้าสู่บริเวณค่ามุมอ้างอิง เมื่อเพิ่มมุมอ้างอิงเป็น 120 องศา ดังภาพที่ 5 b) พบว่าระบบยัง

สามารถติดตามค่ามุมอ้างอิงได้ แต่มีค่าโอเวอร์ชูตเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยค่ามุมที่อ่านได้สูงกว่าค่ามุมอ้างอิงก่อนจะลดลงและเกิดการแกว่งรอบค่ามุมอ้างอิงในช่วงเวลาหนึ่ง ลักษณะดังกล่าวเกิดจากผลของพจน์ปริพันธ์ทำให้ระบบเกิดการสะสมของค่าความคลาดเคลื่อน ส่งผลให้การตอบสนองมีการแกว่งและใช้เวลานานขึ้นในการเข้าสู่สภาวะคงตัว สำหรับมุมอ้างอิง 130 องศา ดังภาพที่ 5 c) ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้นจากแรงยกของใบพัด โมเมนต์ของคาน และแรงโน้มถ่วง ทำให้ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ชุดเดิมไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้ดี อีกทั้งพจน์ปริพันธ์มีการสะสมค่าความคลาดเคลื่อนต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดปัญหาการสะสมค่าอินทิกรัล (integral windup) ซึ่งทำให้ระบบเกิดโอเวอร์ชูตสูงและแกว่งต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบพีไอยังไม่เหมาะสมสำหรับการควบคุมระบบที่มุมอ้างอิงสูงของระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด

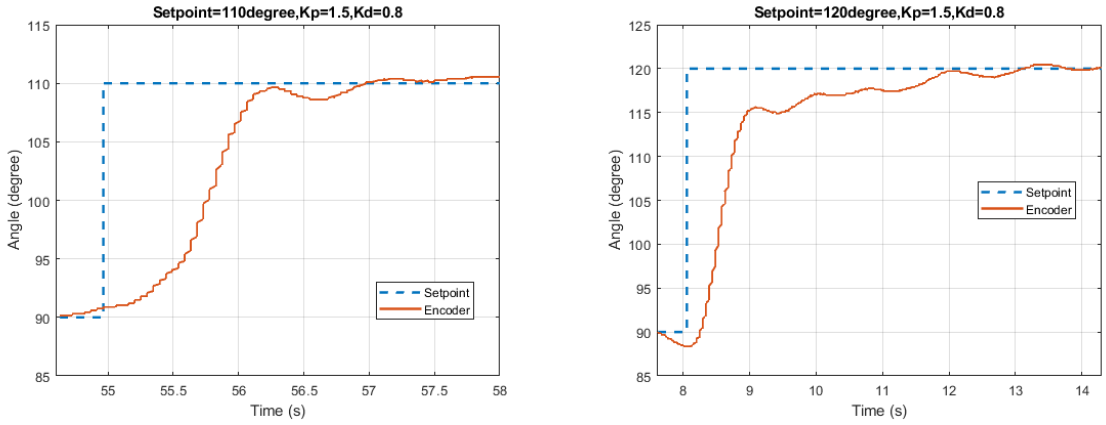


ภาพที่ 5 การทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ a) ที่มุมอ้างอิง 110 องศา b) ที่มุมอ้างอิง 120 องศา และ c) ที่มุมอ้างอิง 130 องศา

3 การทดลองควบคุมแบบพีดี

ผลการทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีดีแสดงดังภาพที่ 6 โดยทดลองที่มุมอ้างอิง 110 องศา 120 องศา และ 130 องศาตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเมื่อกำหนดมุมอ้างอิงเท่ากับ 110 องศา ดังภาพที่ 6 a) ระบบสามารถตอบสนองเข้าสู่ค่ามุมอ้างอิงได้และมีโอเวอร์ชูตเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นการทำงานของพจน์อนุพันธ์ของตัวควบคุม

สามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของค่าความคลาดเคลื่อน เมื่อกำหนดมุมอ้างอิงเท่ากับ 120 องศา ดังภาพที่ 6 b) ระบบยังคงตอบสนองได้ดี มีการแกว่งเพียงเล็กน้อย และสามารถรักษาค่ามุมให้อยู่ใกล้ค่ามุมอ้างอิงได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ สำหรับมุมอ้างอิง 130 องศา ดังภาพที่ 6 c) ตัวควบคุมแบบพีดียังเกิดค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว (offset) เล็กน้อย เนื่องจากไม่มีพจน์ปริพันธ์สำหรับชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนสะสม อย่างไรก็ตาม ระบบยังให้ค่า overshoot เพียง 3.73% และมีเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 1.15 วินาที ซึ่งดีกว่าตัวควบคุมแบบพีและพีไออย่างชัดเจน

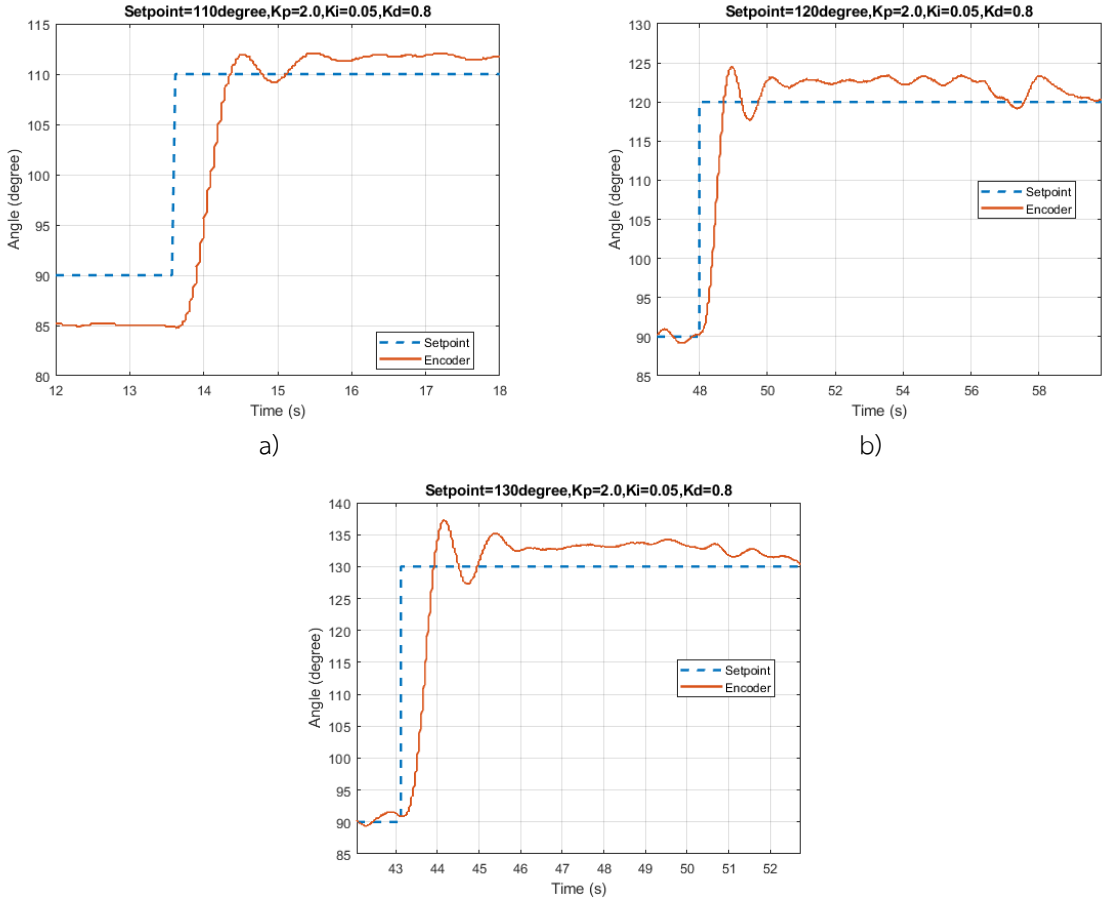


ภาพที่ 6 การทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีดี a) ที่มุมอ้างอิง 110 องศา b) ที่มุมอ้างอิง 120 องศา และ c) ที่มุมอ้างอิง 130 องศา

4 การทดลองควบคุมแบบพีไอดี

จากภาพที่ 7 แสดงผลการทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี พบว่าเมื่อกำหนดมุมอ้างอิงเท่ากับ 110 องศา ดังภาพที่ 7 a) ระบบสามารถตอบสนองเข้าสู่ค่ามุมอ้างอิงได้รวดเร็ว มีค่าโอเวอร์ชูตเล็กน้อย และสามารถรักษามุมให้ใกล้ค่ามุมอ้างอิงได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อกำหนดมุมอ้างอิงเท่ากับ 120 องศา ดังภาพที่ 7 b) ระบบตอบสนองได้รวดเร็ว โดยมีโอเวอร์ชูตเพียงเล็กน้อยในช่วงต้น จากนั้นค่ามุมเข้าสู่บริเวณใกล้ค่ามุมอ้างอิงและแกว่งอยู่ในช่วงแคบ แสดงให้เห็นว่าการรวมกันของพจน์สัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ สามารถช่วยให้ระบบมีทั้งความเร็วในการตอบสนอง การลดค่าความคลาดเคลื่อน และการลดการแกว่งของระบบได้ดีขึ้น สำหรับมุมอ้างอิง 130 องศา ดังภาพที่ 7 c) ระบบสามารถตอบสนองเข้าสู่ค่ามุมอ้างอิงได้

รวดเร็วเช่นเดียวกับกรณีอื่น แม้จะเกิดโอเวอร์ชูตในช่วงเริ่มต้น แต่หลังจากนั้นระบบสามารถลดการแกว่งลงและรักษาค่ามุมให้อยู่ใกล้ค่ามุมอ้างอิงได้ดีกว่าการควบคุมแบบพีและพีไอ



ภาพที่ 7 การทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี a) ที่มุมอ้างอิง 110 องศา b) ที่มุมอ้างอิง 120 องศา และ c) ที่มุมอ้างอิง 130 องศา

เมื่อเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบพีดีและพีไอดี พบว่าพีดีให้ค่าโอเวอร์ชูตต่ำกว่าพีไอดีในทุกมุมอ้างอิง เนื่องจากพจน์อนุพันธ์ช่วยหน่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อน ทำให้ระบบไม่พุ่งเกินค่ามุมอ้างอิงมากเกินไป ขณะที่พีไอดีมีพจน์ปริพันธ์เพิ่มเข้ามาเพื่อช่วยลดค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว แต่พจน์ดังกล่าวอาจทำให้เกิดการสะสมของสัญญาณควบคุมและทำให้เกิดโอเวอร์ชูตสูงขึ้นได้ ดังนั้นในระบบทดลองนี้พีดีเหมาะสมเมื่อเน้นการตอบสนองเร็วและโอเวอร์ชูตต่ำ ส่วนพีไอดีเหมาะสมเมื่อเน้นการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว

5 อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการตอบสนองของระบบดังตารางที่ 1 ถึงตารางที่ 3 พบว่าตัวควบคุมแบบพีดีให้ผลเด่นที่สุดในด้านการลดค่าโอเวอร์ชูตและเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีและพีไอ ส่วนตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถช่วยชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัวและทำให้ระบบมีความเสถียร แต่มีค่าโอเวอร์ชูตสูงกว่าแบบพีดีในทุกมุมอ้างอิง ดังนั้นการเลือกตัวควบคุมควรพิจารณาจากวัตถุประสงค์ของการควบคุมนั่นคือ หากต้องการลดโอเวอร์ชูตและตอบสนองเร็ว ตัวควบคุมแบบพีดีมีความเหมาะสมกว่า แต่หากต้องการเน้นการลดค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว ตัวควบคุมแบบพีไอดียังเป็นตัวเลือกที่ควรพิจารณา

ตารางที่ 1 อภิปรายผลการตอบสนองของระบบค่าที่สมดุลที่สุดในแต่ละรูปแบบการควบคุมที่มุมอ้างอิงเท่ากับ 110 องศา

รูปแบบการควบคุม	Kp	Ki	Kd	Overshoot (%)	Setting Time (วินาที)	Steady- State Error (องศา)	**ความเสถียรของระบบ**
P	1.5	0	0	41.82%	ไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว	ไม่สามารถประเมินได้	ระบบตอบสนองได้ แต่เกิดการแกว่งสูงและไม่เสถียร
PI	0.5	0.05	0	1.82%	2.66	0.65	ลดความคลาดเคลื่อนได้ดี แต่ตอบสนองช้ากว่า PD
PD	1.5	0	0.8	0.50%	2.01	0.55	ระบบตอบสนองเร็ว โอเวอร์ชูตต่ำ
PID	2.0	0.05	0.8	1.86%	2.43	1.90	ระบบตอบสนองเร็ว แต่ยังมีค่ามุมสูงกว่าค่ากำหนดเล็กน้อย

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม 2569)

ตารางที่ 2 อภิปรายผลการตอบสนองของระบบค่าที่สมดุลที่สุดในแต่ละรูปแบบการควบคุมที่มุมอ้างอิงเท่ากับ 120 องศา

รูปแบบการควบคุม	Kp	Ki	Kd	Overshoot (%)	Setting Time (วินาที)	Steady- State Error (องศา)	**ความเสถียรของระบบ**
P	1.5	0	0	54.54%	ไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว	ไม่สามารถประเมินได้	โอเวอร์ชูตสูง ระบบแกว่งมาก
PI	0.5	0.05	0	25.45%	7.85	8.1	ลดการแกว่งได้บางส่วนเมื่อเทียบกับตัวควบคุม P แต่ยังมีโอเวอร์ชูตและความคลาดเคลื่อนสูง
PD	1.5	0	0.8	0.41%	4.02	0.45	ระบบตอบสนองค่อนข้างเร็ว แกว่งน้อย และรักษาค่ามุมใกล้ค่าอ้างอิงได้
PID	2.0	0.05	0.8	4.10%	2.15	2.0	ระบบควบคุมได้ดี แต่ยังมีการแกว่งเล็กน้อย และยังมีค่ามุมสูงกว่าค่ากำหนดเล็กน้อย

ตารางที่ 3 อภิปรายผลการตอบสนองของระบบค่าที่สมดุลที่สุดในแต่ละรูปแบบการควบคุมที่มุมอ้างอิงเท่ากับ 130 องศา

รูปแบบการควบคุม	Kp	Ki	Kd	Overshoot (%)	Setting Time (วินาที)	Steady- State Error (องศา)	ความเสถียรของระบบ
P	1.5	0	0	45.45%	ไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว	ไม่สามารถประเมินได้	ระบบแกว่งมากและไม่สามารถรักษาค่ามุมใกล้ค่าอ้างอิงได้
PI	1.0	0.05	0	45.45%	ไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว	ไม่สามารถประเมินได้	ระบบแกว่งมากและไม่สามารถรักษาค่ามุมใกล้ค่าอ้างอิงได้
PD	1.5	0	0.8	3.73%	1.15	4.1	ระบบตอบสนองเร็วและแกว่งเล็กน้อย แต่ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว
PID	2.0	0.05	0.8	6.04%	2.97	3.2	ระบบมีความเสถียรแต่ยังมีโอเวอร์ชูตและความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

สรุป

งานวิจัยนี้ได้สร้างและทดลองการควบคุมของแบบจำลองระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด โดยใช้ตัวควบคุมแบบพี พีไอ พีดี และพีไอดี เริ่มจากการสร้างระบบการบินทรงตัวในแนวดิ่งแบบคานเดี่ยวสองใบพัด ประกอบด้วยคานที่ติดตั้งใบพัดไว้ทั้งสองฝั่ง มีจุดหมุนอยู่ตรงกลางและติดตั้งเอ็นโค้ดเดอร์เพื่อวัดมุมเอียงของคาน แรงยกจากใบพัดทั้งสองฝั่งสามารถทำให้ระบบรักษาสมดุลตามมุมอ้างอิงที่กำหนดได้ การทดลองควบคุมมุมเอียงของระบบประกอบไปด้วยมุมอ้างอิง 110 องศา 120 องศา และ 130 องศา ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถตอบสนองต่อค่ามุมอ้างอิงได้ในทุกรูปแบบการควบคุม แต่ลักษณะการตอบสนองแตกต่างกันตามค่าพารามิเตอร์และชนิดของตัวควบคุม อย่างไรก็ตามระบบยังมีค่าโอเวอร์ชูตและค่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในบางกรณี โดยมีข้อเสนอแนะการพัฒนางานวิจัยในครั้งต่อไปคือควรปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้เหมาะสมกับแต่ละมุมอ้างอิง หรือพัฒนาระบบควบคุม เพื่อเพิ่มความแม่นยำ ความเสถียร และความสามารถในการควบคุมระบบภายใต้สภาวะการทำงานที่กำหนด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ที่สนับสนุนการทำงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. ทินกร เขียวรี. การควบคุมความสูงระดับเพดานบินโดยใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองได้ร่วมกับตัวสังเกตคาลมาน สำหรับเครื่องบิน 4 ใบพัดขนาดเล็ก. วารสารวิชาการ มทร.สุวรรณภูมิ. 2561; 6(2): 148-156. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsb-sci/article/view/149110
2. กำจัด ใจตรง, สงกรานต์ ภารกุล, ณรงค์ฤทธิ์ ยิ้มเจริญพรสกุล. การควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.สุวรรณภูมิ. 2564; 5(1): 78-86. https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/JSciTech/article/view/344
3. ภูมิพัฒน์ กำคำ, ชัชวาล มงคล, จักรพันธ์ ปิ่นทอง, เสกสรรค์ สุชัยพร. การพัฒนาตัวควบคุมพีไอและพีไอดีบนอีเอสพี 32 สำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์ร่วมกับตัวกรองคาลมาน. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม. 2568; 7(3): 392-406. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/psru-jite/article/view/262567
4. ครรชิต ภาวนานนท์, ดวงกมล อังอำนวยศิริ, กมลวรรณ วงศ์วุฒิ, กฤชนันท์ เจริญสุข. การออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์ดุลยภาพด้วยตัวควบคุมแบบพื้นฐาน โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. 2565; 10(2): 9-22. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/fit-ssru/article/view/248385
5. กฤชนันท์ เจริญสุข, กมลวรรณ วงศ์วุฒิ, ดวงกมล อังอำนวยศิริ, ครรชิต ภาวนานนท์. การออกแบบและควบคุมสำหรับหุ่นยนต์ดุลยภาพด้วยตัวควบคุมพีดี และแอลคิวอาร์ โดยใช้โปรแกรม Simulink. Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT). 2565; 10(2): 81-96. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal/article/view/248456
6. ชนะพันธ์ ศรีจันทร์, ณัฐวุฒิ เดไปวา. ระบบควบคุมทิศทางแรงขับเสริมเพื่อเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าสำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุนสี่ใบพัด. Engineering and Technology Horizons. 2567; 41(1): 410112. https://doi.org/10.55003/ETH.410112
7. เจนวิทย์ คำพูล. การสร้างแบบจำลองและการจำลองคุณลักษณะทางพลวัตในการบินของ อากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก Sky Surfer. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ. 2561; 14(1): 86-97. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nkrafa-sct/article/view/159334
8. ณัฐพงษ์ รื่นฤดีพันธ์, ยศเดช กนกเมธากุล, ณัญธิวัฒน์ พลดี, สุจินต์ บุรีรัตน์. การออกแบบระบบควบคุมวงในของอากาศยานไร้คนขับแบบปีกตรึงโดยใช้เมตาฮิวริสติกส์. วารสารวิจัย มข. ฉบับบัณฑิตศึกษา. 2565; 22(3): 161-173. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/gskku/article/view/244744
9. ศุภโชค ตันติวิวัทน์. การออกแบบและควบคุมอากาศยานไร้คนขับแบบ 5 ใบพัดหมุน โดยมีใบพัดคู่ควบตรงกลางที่สามารถปรับความเอียงได้ 2 ทิศทาง (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต). วิศวกรรมเครื่องกล, วิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2566. https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/10278
10. Chaudhary S, Kumar A. Control of Twin Rotor MIMO System using PID and LQR Controller. Journal of Aircraft and Spacecraft Technology. 2019; 3(1): 211-220. https://doi.org/10.3844/jastsp.2019.211.220

11. Almtireen N, Elmoaqet H, Ryalat M. Linearized Modelling and Control for a Twin Rotor System. Automatic Control and Computer Sciences. 2018; 52(6) :539-551. https://doi.org/10.3103/S0146411618060020
12. วิสิทธิ์ ลุมชะเนาว์, ธนกร ดุจเพ็ญ. การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยสำหรับจิ้งหรีด ด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติแบบพีไอดี. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. 2568; 13(1): 27-39. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/fit-ssru/article/view/259485
13. ราเชณ คณะนา, อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์. การออกแบบวงจรตัวควบคุมพีไอดีเอแบบอเนกประสงค์ และการประยุกต์ใช้งาน. วารสารสายวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์. 2562; 5(1): 41-48. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/saujournalst/article/view/200828
14. สัตถาภูมิ ไทยพานิช, ไพศาล แห้วเพ็ชร, ดนุพล คำปัญญา. การออกแบบตัวควบคุมไอ-พีดีอย่างเหมาะสมเพื่อลดการขยายตัวของสัญญาณควบคุมด้วยขั้นตอนวิธีการถ่ายละอองเรณูดอกไม้สำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง. วารสารสหวิชาการงานวิจัยและนวัตกรรมสังคม. 2568; 1(3): 1-18. https://so10.tci-thaijo.org/index.php/MRSI/article/view/2780

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาวิธีทดสอบและการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน

Development and method validation for testing formaldehyde in resin

สุนทร ขวัญอ่อน[1] อังคณา ยาบา[1] และ ผุสดี มุหะหมัด[1*]
Soonthorn Khwan-On[1], Aungkana Yaba[1] and Phusadee Muhamud[1*]
[1]คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์/ศูนย์บริการตรวจสอบและรับรองมาตรฐาน. อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา
[1]Faculty of Science, Prince of Songkla University/ Center of Measurement and Standard Accreditation, Hatyai, Songkla
[*]Corresponding email; author: phutsadee.m@gmail.com

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
21 เมษายน 2569	10 กรกฎาคม 2569	14 กรกฎาคม 2569

บทคัดย่อ

ศูนย์บริการตรวจสอบและรับรองมาตรฐาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ให้บริการทดสอบคุณสมบัติเฉพาะของตัวอย่างกาวเรซินสังเคราะห์จากบริษัทผู้ผลิต งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาวิธีทดสอบและการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน โดยเป็นวิธีที่ศูนย์ฯ พัฒนาขึ้นเอง (In-house method) วิธีการศึกษาดำเนินการโดยการกลั่นกาวเรซิน เพื่อให้ปลดปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์และให้ทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ เกิดเป็นปฏิกิริยาไซยาโนไฮดรินในสภาวะที่เป็นด่าง และทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์โดยวิธีการไตเตรท ซึ่งผลการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบพบว่า ค่าต่ำสุดที่สามารถตรวจพบได้ (Limit of Detection, LOD) เท่ากับ 0.31%w/w ค่าต่ำสุดที่สามารถบอกปริมาณและรายงานผลได้ (Limit of Quantitation, LOQ) ทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ เท่ากับ 0.32 %w/w และ 5 %w/w ค่าความแม่น (Accuracy) โดยการเติมสารมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ลงในตัวอย่างกาวเรซิน (spiked samples) ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (5 %w/w), กลาง (15 %w/w), และสูง (30 %w/w) ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับที่ความเข้มข้น 5 %w/w อยู่ในช่วง 95-102% และที่ความเข้มข้น 15 และ 30 %w/w อยู่ในช่วง 98-101% ทั้งหมดผ่านเกณฑ์การยอมรับ และค่าความเที่ยง (Precision) โดยทำการทดสอบซ้ำวันเดียวกัน (Repeatability) และต่างวันต่างเวลา (Reproducibility) พบว่าทั้งหมดผ่านเกณฑ์การยอมรับที่ค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ไม่เกิน 10% ดังนั้นวิธีทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซินที่พัฒนาขึ้น และการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีสามารถใช้เป็นวิธีของห้องปฏิบัติการในการทดสอบฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซินได้ และเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาวิธีทดสอบในการหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างกาวชนิดอื่น ๆ ต่อไป

คำสำคัญ : การทดสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ, ฟอร์มัลดีไฮด์, กาวเรซิน

Abstract

Center of Measurement and Standard Accreditation, Faculty of Science, Prince of Songkla University routinely provides testing specification of synthetic resins. This study aimed to develop and validate an in-house method for determining formaldehyde in resin glue. The method involved distillation of the resin glue to release formaldehyde and reacting it with cyanide which led to a cyanohydrin reaction in alkaline conditions. Then, the amount of formaldehyde was determined by the titration method. The results of the method validation showed that, for the amount of formaldehyde in resin glue, the Limit of Detection (LOD) was 0.31 %w/w. The theoretical and practical limits of quantitation (LOQ) were 0.32 %w/w and 5 %w/w, respectively. By adding formaldehyde standard into resin glue (spiked samples) at low (5 %w/w), medium (15 %w/w), and high (30 %w/w) concentration levels, it was found that the method's accuracy passed the acceptance criteria at the concentration of 5 %w/w (in the range of 95-102%) and at the concentrations of 15 and 30 %w/w (in the range of 98-101%), respectively. Thus, all accuracy tests passed the acceptance criteria. Likewise, the precision tests were performed by repeating the tests on the same day (Repeatability) and at different days and times (Reproducibility). It was found that all tests passed the acceptance criteria with the Relative Standard Deviation (%RSD) not exceeding 10%. Therefore, the developed method for testing the amount of formaldehyde in resin glue and its method validation can be used as a laboratory method for testing formaldehyde in resin glue and is in accordance with the objectives of the experiment. In the near future, this approach could lead to method development for formaldehyde determination in other resin glues.

Keywords: Validation method, formaldehyde, resin glue

บทนำ

ฟอร์มัลดีไฮด์เป็นก๊าซที่ระเหยเป็นไอได้ง่ายมาก ก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ละลายน้ำได้ดี เป็นก๊าซไม่มีสี มีกลิ่นฉุน ทำให้แสบจมูก แสบตา คุณสมบัติของฟอร์มัลดีไฮด์เป็นสารที่อยู่ในสถานะก๊าซที่ไม่เสถียร การนำไปใช้ประโยชน์หรือการขนส่ง จะทำให้อยู่ในรูปแบบของเหลวเรียกว่า ฟอร์มาลีน โดยทั้งสองสถานะมีความแตกต่างกัน ฟอร์มัลดีไฮด์เป็นก๊าซไวไฟ ไม่มีสี กลิ่นฉุนรุนแรงมีฤทธิ์กัดกร่อน หนักกว่าอากาศเล็กน้อย ไม่เสถียร เกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ได้ง่าย

กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้สรุปถึงการนำฟอร์มัลดีไฮด์ไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นจำนวนมากทั้งนี้การผลิตสารนี้จะอยู่ในรูปของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์หรือฟอร์มาลีน ที่มีความเข้มข้นประมาณ 37-55% โดยน้ำหนัก โดยที่ฟอร์มัลดีไฮด์และสารประกอบฟอร์มัลดีไฮด์ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด ซึ่งจะนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ (urea-formaldehyde ; UF) ร้อยละ 70 ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ (phenol-formaldehyde ; PF) ร้อยละ 7 เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (melamine-formaldehyde ; MF) ร้อยละ 4 พลาสติกโพลีอะซีทัล (plastic polyacetal) ร้อยละ 14 และเคมีภัณฑ์อื่น ๆ ร้อยละ 5 นอกจากนี้มีการนำไปเป็นสารฆ่าเชื้อ สารกันเสีย ยาฆ่าแมลง ตัวลดออกซิเจนในปฏิกิริยาอีกด้วย และยังมีการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตวัสดุต่าง ๆ หลายชนิด เนื่องจากมีคุณสมบัติทำให้ผ้าและกระดาษแข็งเกาะกันเป็นอย่างดี จึงนำมาเป็นส่วนผสมในการทำพาติเกิลบอร์ด สารเคลือบไม้อัดและเฟอร์นิเจอร์จากยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ การทำถ้วยชามจากเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ ผ้าเบรครถยนต์ ใบเลื่อย ใบเจีย ใบตัดทราย ทำแบบหล่อโลหะ และฉนวนกันความร้อนจากฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ ชิ้นส่วนยางรถยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์จากโพลีอะซีทัล เป็นต้น อีกทั้งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเม็ดพลาสติกชนิดต่าง ๆ ใช้เป็นกาวสำหรับเฟอร์นิเจอร์ ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ใช้ทำโฟมในการผลิตเรซิน การสังเคราะห์สีต่าง ๆ เช่น สีคราม สีแดง สีอะครีลิก ใช้ในการย้อมเพื่อปรับปรุงให้สีและสีย้อมติดแน่น ใช้ในการฟอกสีงานด้านการพิมพ์ การฟอกหนัง นำไปผสมโลหะเพื่อระงับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อรักษาผ้าไม่ให้ยับย่น ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเพื่อให้กระดาษลื่นและกันน้ำได้ ใช้ผสมในสีทาบ้าน วอลเปเปอร์พลาสติก กาว ผ้าใยสังเคราะห์ น้ำยาเคลือบเงาไม้ พรมสังเคราะห์ น้ำยาทำความสะอาด และกระดาษทิชชู เป็นต้น จากลักษณะดังกล่าวจะเห็นว่าสารนี้เป็นส่วนผสมในวัสดุต่าง ๆ ที่อยู่รอบตัวเรา ทั้งนี้กรมโรงงานอุตสาหกรรมรายงานปริมาณการใช้ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์มากที่สุดถึงร้อยละ 70 ของปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ทั้งหมด โดยยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์จะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์สำนักงาน อุปกรณ์ตกแต่งที่พักอาศัย และเป็นกาวสำคัญในอุตสาหกรรมไม้อัด [1]

สำหรับกาวเรซินชนิดแข็งตัวเมื่อร้อน (Thermo-setting resins) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมไม้อัดมี 4 ประเภทหลัก ๆ คือ 1. กาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ (UF) เป็นกาวที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย กาวมีลักษณะใส โดยทั่วไปใช้ในการผลิตแผ่นไม้อัด แผ่นไม้ปาร์ติเกิล (Particle Board) ซึ่งเป็นแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Fiberboard ; MDF) แผ่นไส้ไม้ระแนง และใช้กันมากในการปิดผิวไม้บางบนงานเครื่องเรือน แต่ควรจะต้องระมัดระวังเพราะว่า เป็นกาวที่เหมาะต่อการใช้งานที่ทนทานต่อความชื้นแต่ไม่ต้านทานน้ำ 2. กาวเมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นกาวที่คล้ายกับกาว UF กาวมีลักษณะใส มีคุณสมบัติในการต้านทานต่อความชื้น และสภาพการใช้งานที่เปียกชื้น จึงนิยมใช้ในการผลิต แผ่นปาร์ติเกิล ที่มีคุณสมบัติพิเศษโดยเฉพาะการต้านทานต่อความชื้นและสภาพฝนฟ้าอากาศร้อน ที่เรียกว่าแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดเกรดทนชื้น เป็นต้น ทั้งนี้ยังใช้ในการต่อไม้ที่ต้องการใช้ชิ้นงานในสภาพที่เปียกชื้นด้วย โดยที่กาว MF จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่ทำให้แข็งตัวสูงกว่า UF แต่มีความต้านทานน้ำและอุณหภูมิสูงได้ดีกว่า ข้อเสียคือราคาของ MF สูง ซึ่งสูงกว่าราคาของ UF ถึง 4-5 เท่า จึงมีการนำมาผสมกับกาว UF เพื่อลดต้นทุนราคาลงเรียกว่า MUF glues 3. กาวฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นกาวที่ใช้กันมากในการผลิตไม้อัดชนิดใช้งานในทะเลและแผ่นแถบไม้อัด OSB (oriented strand board) ที่มีความแข็งแรง ทนทานสูง สำหรับใช้งานก่อสร้างเป็นต้น และ 4. กาวไอโซไซยาเนต (Isocyanate Resins) หรือที่เรียกกันว่า “กาว pMDI” ปัจจุบันถูกใช้ในการผลิตปาร์ติเกิลบอร์ด, MDF, และไม้อัด OSB เมื่อต้องการชิ้นงานที่มีความทนทานสูง [2] กาวเรซินจึงเป็นวัสดุยึดติดที่มีบทบาทสำคัญใน

อุตสาหกรรมไม้และวัสดุประกอบไม้ เช่น ไม้อัด แผ่นชิ้นไม้อัด แผ่นไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง แผ่นแถบไม้อัด หรือการผลิตเฟอร์นิเจอร์ทั้งเครื่องเรือนไม้จากไม้จริงและจากไม้ประกอบ ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นที่ต้องใช้กาวมากที่สุด ด้วยคุณสมบัติที่สามารถแข็งตัวเป็นโครงสร้างสามมิติ ผ่านกระบวนการทางเคมี ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงของการยึดติดและความทนทานของผลิตภัณฑ์ และกาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เป็นกาวชนิดแรกที่ได้รับการพัฒนาและใช้งานอย่างกว้างขวางมายาวนานกว่า 60 ปีในอุตสาหกรรมไม้ เนื่องจากต้นทุนที่ต่ำ และความสามารถในการยึดติดที่ดีและมีข้อจำกัดสำคัญ คือการปลดปล่อยสารฟอร์มัลดีไฮด์ซึ่งเป็นสารระเหย ที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในด้านความปลอดภัยของผู้ใช้งานและความยั่งยืนของผลิตภัณฑ์ไม้ เพื่อลดปัญหานี้มีการพัฒนากาวประเภทอื่น เช่น กาว MF ซึ่งมีคุณสมบัติด้านความต้านทานน้ำและความร้อนที่ดีกว่า รวมถึงการปลดปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์ที่ต่ำกว่า แต่ยังคงมีต้นทุนที่สูง การผสมกาว MF กับกาว UF เป็นกาว MUF เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มคุณสมบัติที่ดีขึ้น จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ได้รับความสนใจในกระบวนการพัฒนากาวเรซิน และการควบคุมคุณภาพจึงจำเป็นต้องมีวิธีทดสอบที่สามารถวัดปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และมีประสิทธิภาพ เพื่อให้มั่นใจว่าสูตรกาวใหม่ ๆ ตอบสนองต่อมาตรฐานความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม เช่น มาตรฐาน E1 และ CARB การลดสัดส่วนโมลของฟอร์มัลดีไฮด์ต่อยูเรีย (F:U) และการเติมสารปรับปรุง เช่น ยูเรีย หรือเมลามีน สามารถลดการปลดปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์ได้ แต่กระบวนการดังกล่าว อาจส่งผลต่อคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น ระยะเวลาการแข็งตัว ความแข็งแรงของการยึดติด และเสถียรภาพของกาว เป็นต้น [3]

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ (test method validation) คือ กระบวนการที่พิสูจน์ว่าวิธีทดสอบมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทดสอบตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการใช้ โดยมีหลักฐานยืนยัน และหลักฐานที่ต้องทำการตรวจสอบยืนยันนั้น ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดสอบ วัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน การตรวจสอบยืนยันจะแตกต่างกันด้วย เช่น การทดสอบเชิงคุณภาพ กับการทดสอบเชิงปริมาณ จะมีปัจจัยที่ต้องตรวจสอบต่างกัน ดังนั้นการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบถือเป็นกระบวนการหนึ่งของการประกันคุณภาพห้องปฏิบัติการทดสอบ ซึ่งห้องปฏิบัติการจำเป็นต้องดำเนินการโดยทั่วไปวิธีทดสอบที่ต้องตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี ได้แก่ วิธีทดสอบที่ไม่ใช่วิธีมาตรฐาน (non-standard method) หรือวิธีที่ห้องปฏิบัติการปรับเปลี่ยนหรือดัดแปลงจากวิธีมาตรฐาน (in-house method) วิธีทดสอบที่ใช้นอกขอบเขตวิธีมาตรฐาน หรือการนำวิธีทดสอบไปใช้ต่างห้องปฏิบัติการ หรือต่างเครื่องมือกัน เหล่านี้เป็นต้น โดยต้องตรวจสอบปัจจัยหรือคุณลักษณะของวิธีทุกด้านที่มีผลกระทบต่อผลการทดสอบเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การใช้งาน [4]

ศูนย์บริการตรวจสอบและรับรองมาตรฐาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ให้บริการทดสอบตัวอย่างกาวเรซินสังเคราะห์ที่ผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งกาวเรซินหลัก ๆ ในงานวิจัยนี้ จะหมายถึง กาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ และเมลามีน ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ จะเห็นว่ากาวเรซินสังเคราะห์นี้มีฟอร์มัลดีไฮด์และไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลักสำคัญ โดยสัดส่วนของฟอร์มัลดีไฮด์และไนโตรเจนมีผลมากต่อคุณสมบัติของกาวและการใช้งาน จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์และไนโตรเจน และมาตรฐานการทดสอบฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซินจะเป็นมาตรฐานที่ใช้ทดสอบปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์อิสระที่หลุดออกมาจากเนื้อกาวเรซินสำหรับนำไปใช้งาน [5] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ใช้วิธีทดสอบปริมาณการระเหยของฟอร์มัลดีไฮด์จากแผ่นไม้อัดโดยวิธีมาตรฐาน EN717-3 (British Standards Institution, 1996) [6] หรือเป็นมาตรฐานที่ใช้ทดสอบปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์สำหรับอุตสาหกรรม มอก. 530-2557 [7] แต่จะไม่มีมีวิธีมาตรฐานสำหรับการทดสอบปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ทั้งหมดในเนื้อกาวเรซิน ซึ่งจะมีวิธีการทดสอบที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างใช้เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์สำหรับวัดสี และการไตเตรทที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สำหรับการทดสอบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในกาวเรซิน ศูนย์บริการตรวจสอบฯ ได้ดำเนินการพัฒนาวิธีการทดสอบและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีและได้ใช้เป็นวิธีการทดสอบไนโตรเจนในกาวเรซินของศูนย์บริการตรวจสอบฯ ใช้งานเป็นที่เรียบร้อย [8] และได้ผลการทดสอบที่ถูกต้อง แม่นยำเชื่อถือได้ สำหรับงานวิจัยนี้ ศูนย์บริการตรวจสอบฯ ได้ทำการพัฒนาวิธีทดสอบและตรวจสอบความ

ใช้ได้ของวิธีทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน เนื่องจากการทดสอบฟอร์มัลดีไฮด์จะมีหลากหลายวิธี ขึ้นอยู่กับว่าจะทดสอบหาฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างอะไร เช่น การทดสอบฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างน้ำเสีย อาหารทะเล อาหารแปรรูป สิ่งทอ ฯลฯ วิธีการทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์จึงขึ้นกับประเภทของตัวอย่างที่ทดสอบ การทดสอบฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซินจึงเป็นวิธีทดสอบที่ห้องปฏิบัติการได้ปรับปรุงและพัฒนาขึ้นเอง โดยการกลั่นกาวเรซิน เพื่อให้ปลดปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์ และให้ทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ เกิดเป็นปฏิกิริยาไซยาโนไฮดรินในสภาพที่เป็นด่าง และทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์โดยวิธีการไตเตรทกับเมอร์คิวริกไนเตรต ใช้ไดฟีนิลคาร์บาโซนเป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีม่วงแดง เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ใช่วิธีมาตรฐาน เพื่อยืนยันคุณภาพของการทดสอบฟอร์มัลดีไฮด์นกาวเรซิน ให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้อง แม่นยำ มีความน่าเชื่อถือตามหลักวิชาการ ศูนย์บริการตรวจสอบฯ จึงได้ทำการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบดังกล่าวที่พัฒนาขึ้นก่อนนำไปใช้งานจริง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1 เพื่อพัฒนาวิธีการทดสอบและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซินสำหรับทดสอบกาวเรซินที่ผลิตโดยอุตสาหกรรมผลิตกาวเรซินในประเทศไทย

2 เพื่อให้ผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือตามหลักวิชาการ ถูกต้องแม่นยำ และสามารถใช้เป็นวิธีทดสอบที่เป็นมาตรฐานของศูนย์บริการตรวจสอบฯ ได้

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนามาจากงานประจำ โดยการพัฒนาวิธีการทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน ซึ่งหมายถึงกาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ และเมลามีน ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นวิธีที่ศูนย์บริการตรวจสอบฯ พัฒนาขึ้นเอง โดยใช้หลักการกลั่นกาวเรซินให้ปลดปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์อิสระ และทำปฏิกิริยากับโปตัสเซี่ยมไซยาไนด์ ในสภาพที่เป็นด่าง เกิดเป็นปฏิกิริยาไซยาโนไฮดริน และไตเตรทหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ ด้วยเมอร์คิวริกไนเตรท โดยมีไดฟีนิลคาร์บาโซนเป็นอินดิเคเตอร์ ปฏิกิริยาเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีม่วงแดง

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน เป็นการยืนยันความใช้ได้ของวิธีที่พัฒนาขึ้น โดยทำการศึกษาค่าต่าง ๆ ดังนี้ [4]

1. การศึกษาค่าต่ำสุดที่สามารถตรวจพบ (LOD) และค่าสุดที่สามารถบอกปริมาณได้ (LOQ)

โดยทำการศึกษาหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ใน Sample blank (เตรียมโดยใช้เมลามีนผสมกับยูเรีย) จำนวน 10 ซ้ำในวันเดียวกัน คำนวณหา LOD และ LOQ ของปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน ได้จากสูตรที่ (1) และ (2)

$$LOD = \overline{X} + 3SD \qquad (1)$$

$$LOQ = \overline{X} + 10SD \qquad (2)$$

2. การยืนยันค่าต่ำสุดที่สามารถรายงานผลการทดสอบ (Reporting limit)

ศึกษาโดยการใช้สารมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ที่ระดับความเข้มข้น 5% w/w ลงใน Sample blank (Spiked sample) จำนวน 10 ซ้ำ คำนวณหาค่าการคืนกลับ จากสูตรที่ (3) ซึ่งมีเกณฑ์การยอมรับอยู่ในช่วง 95-102%

$$\%Recovery = \frac{C_1}{C_2} \times 100 \qquad (3)$$

เมื่อ C_1 = ปริมาณของฟอร์มัลดีไฮด์ที่อ่านได้, %w/w

C_2 = ค่าจริงของความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์ ณ จุดที่ทำการศึกษา, %w/w

3. การศึกษาหาค่าความแม่น (Accuracy)

โดยทำการทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน ที่มีการเติมสารมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (5 %w/w) กลาง (15 %w/w) และสูง (30 %w/w) ตามลำดับ เป็นจำนวนความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ ภายใต้สภาวะเดียวกัน นำมาหาค่าร้อยละการคืนกลับได้ จากสูตรที่ 3 ซึ่งมีเกณฑ์การยอมรับที่ความเข้มข้น 5% w/w อยู่ในช่วง 95-102% และที่ความเข้มข้น 15 และ 30 %w/w อยู่ในช่วง 98-101%

4. การศึกษาหาค่าความเที่ยง (Precision)

4.1 ความเที่ยง (Precision) แบบ Repeatability

ทำการทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างกาวเรซินที่มีการเติมสารมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ (Spiked sample) ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (5 %w/w) กลาง (15 %w/w) และสูง (30 %w/w) ตามลำดับ เป็นจำนวนความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ ภายใต้สภาวะเดียวกัน นำมาหาค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) จากสูตรที่ (4) ซึ่งมีเกณฑ์การยอมรับไม่เกิน 10%

คำนวณหาร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)

$$\%RSD = \frac{SD}{\bar{x}} x100 \qquad (4)$$

เมื่อ SD = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ

$\bar{x}$ = ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

4.2 ความเที่ยง (Precision) แบบ Reproducibility

ทำการทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างกาวเรซินที่มีการเติมสารมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ (Spiked sample) ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (5 %w/w) กลาง (15 %w/w) และสูง (30 %w/w) ตามลำดับ เป็นจำนวนความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ ทดสอบต่างวันต่างเวลา เป็นเวลา 3 วัน และคำนวณหาร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ตามสูตรที่ (4) เช่นเดียวกัน

กลุ่มตัวอย่าง

ตัวอย่างกาวเรซินชนิดยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ และยูเรียเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ ที่ส่งมาทดสอบที่ศูนย์บริการตรวจสอบฯ จำนวน 20 ตัวอย่าง

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องกลั่น (Distillation apparatus) (FOSS, Kjeltec™ 8100/8200, Denmark)
2. หลอดเจลดาห์ล Kjeldahl tube ขนาด 400 มิลลิลิตร
3. อุปกรณ์เครื่องแก้วอื่นๆ สำหรับการไตเตรท เช่น บิวเรต (Burette) ขนาด 25 มิลลิลิตร
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Mettler Toledo, ME204, Switzerland)

สารเคมี

1. Formaldehyde, HCHO 37% (AR. Grad, RCI Labscan, Thailand)
2. Melamine (WEIFANG, Chaina)
3. CRM Urea Fertilizer (CRM BCR®-179, Belgium)
4. Conc. H_2SO_4 (98% AR, RCI Labscan, Thailand)
5. Potassium Cyanide, KCN (Analysis ACS, ISO)
6. Phosphoric acid, H_3PO_4 85% (AR. Grad, RCI Labscan, Thailand)
7. Potassium Hydroxide, KOH (AR confirms to BP, USP)
8. Mercuric Nitrate Monohydrate 98.5% (AR. Grad, Loba Chemie)
9. Diphenylcabazone Indicator (AR. Grad, Loba Chemie)
10. Potassium dihydrogen phosphate, KH_2PO_4 (AR. Grad, RCI Labscan, Thailand)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลการทดสอบหาค่าต่ำสุดที่สามารถตรวจพบได้ ค่าต่ำสุดที่สามารถบอกปริมาณได้ และการยืนยันค่าต่ำสุดที่สามารถรายงานผลการทดสอบ ของการทดสอบปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างกาวเรซิน ซึ่งผลของการทดสอบปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ใน sample blank ที่ทดสอบจำนวน 10 ซ้ำภายในวันเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 1-2

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างกาวเรซิน Sample blank จำนวน 10 ซ้ำ

ตัวอย่าง	HCHO (%w/w)
1	0.30
2	0.30
3	0.30
4	0.30
5	0.30
6	0.30
7	0.30
8	0.30
9	0.30
10	0.30
ค่าเฉลี่ย	0.30
SD	0.0016
LOD	0.31
LOQ ทางทฤษฎี	0.32
ค่าต่ำสุดที่สามารถรายงานผลการทดสอบ	5

คำนวณค่าเฉลี่ย $\overline{X}$ และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างกาวเรซิน เท่ากับ 0.30 และ 0.0016 ตามลำดับ นำมาหาค่า LOD และ LOQ ดังนี้

LOD = $\overline{X}$ + 3SD = 0.30 + 3 (0.0016) = 0.31 %w/w

LOQ = $\overline{X}$ + 10SD = 0.30 + 10 (0.0016) = 0.32 %w/w

การยืนยัน LOQ

ค่าต่ำสุดที่สามารถตรวจพบได้ เท่ากับ 0.31% w/w และค่าต่ำสุดที่สามารถบอกปริมาณได้ทางทฤษฎีเท่ากับ 0.32% w/w ซึ่งค่าต่ำสุดที่สามารถรายงานผลการทดสอบได้เท่ากับ 5% w/w ซึ่งค่า LOQ ทางทฤษฎี (0.32% w/w) แตกต่างจากค่าต่ำสุดที่สามารถรายงานผลการทดสอบ (5% w/w) เนื่องจากในทางปฏิบัติปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในอุตสาหกรรมกาวเรซินทั่วไปจะไม่ต่ำกว่า 5%w/w ซึ่งการยืนยันค่าต่ำสุดที่สามารถรายงานผลการทดสอบ ทำโดยการทดสอบค่าฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างกาวเรซินที่เป็น Sample blank ที่ระดับความเข้มข้น 5% w/w จำนวน 10 ซ้ำ คำนวนค่าร้อยละการคืนกลับได้ ซึ่งมีค่าผ่านเกณฑ์การยอมรับ โดยค่าร้อยละการคืนกลับได้อยู่ในช่วง 95-102% ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการยืนยันค่าต่ำสุดที่สามารถรายงานผลการทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 5 %w/w จำนวน 10 ซ้ำ ในตัวอย่าง Sample blank

ตัวอย่าง	HCHO Sample (%w/w)	HCHO Spiked sample (%w/w)	% Recovery
1	4.47	9.38	98.11
2	4.48	9.39	98.21
3	4.47	9.39	98.28
4	4.48	9.38	98.10
5	4.47	9.38	98.14
6	4.48	9.39	98.24
7	4.48	9.39	98.26
8	4.47	9.38	98.14
9	4.48	9.38	98.13
10	4.47	9.39	98.37
ค่าเฉลี่ย	4.47	9.38	98.20
SD	0.00	0.005	-
%Recovery	-	-	98.10 -98.37

2. ผลของการศึกษาค่าความแม่น (Accuracy) ของวิธีทดสอบปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน

โดยทำการศึกษาการทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน ที่มีการเติมสารมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (5% w/w) กลาง (15 %w/w) และสูง (30% w/w) ความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ ภายใต้สภาวะเดียวกัน นำมาหาค่าร้อยละการคืนกลับได้จากสูตรที่ (3) ซึ่งมีเกณฑ์การยอมรับที่ความเข้มข้น 5%w/w อยู่ในช่วง 95-102% และที่ความเข้มข้น 15 และ 30 %w/w อยู่ในช่วง 98-101% ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาความแม่น (Accuracy) ของการทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน ที่มีการเติมสารมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (5 %w/w) กลาง (15 %w/w) และสูง (30 %w/w) ความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ และแสดงค่าร้อยละการคืนกลับได้ (%Recovery)

ตัวอย่าง	HCHO (5 %w/w)	%Recovery	HCHO (15 %w/w)	%Recovery	HCHO (30 %w/w)	%Recovery
1	4.91	98.11	15.04	100.29	29.85	99.50
2	4.91	98.21	14.90	99.32	29.85	99.50
3	4.91	98.28	14.90	99.35	29.83	99.43
4	4.90	98.10	15.12	100.83	29.84	99.47
5	4.91	98.14	14.99	99.96	29.84	99.47
6	4.91	98.24	15.03	100.19	30.14	100.45
7	4.91	98.26	15.06	100.40	30.14	100.48
8	4.91	98.14	15.07	100.47	29.83	99.45
9	4.91	98.13	15.02	100.16	30.16	100.53
10	4.92	98.37	15.01	100.07	29.85	99.49
ค่าเฉลี่ย	**4.91**	**98.20**	**15.02**	**100.11**	**29.93**	**99.78**
SD	**0.004**	**-**	**0.071**	**-**	**0.147**	**-**
%Recovery	**-**	**98.10-98.37**	**-**	**99.32-100.83**	**-**	**99.43-100.53**

3. ผลการศึกษาหาค่าความเที่ยง (Precision) ของวิธีทดสอบปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน

โดยทำการศึกษาหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างกาวเรซินที่มีการเติมสารมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (5% w/w) กลาง (15 %w/w) และสูง (30% w/w) ความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ ภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยทำการทดสอบ 2 ส่วนดังนี้

3.1 ผลการทดสอบความเที่ยงในวันเดียวกัน (Repeatability) โดยคำนวณร้อยละส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (%RSD) ซึ่งเกณฑ์การยอมรับไม่เกิน 10% ผลการทดสอบดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความเที่ยงในวันเดียวกัน (Repeatability) โดยคำนวณร้อยละส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (%RSD) ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (5% w/w) กลาง (15 %w/w) และสูง (30% w/w)

ตัวอย่าง	HCHO (5 %w/w)	HCHO (15 %w/w)	HCHO (30 %w/w)
1	4.88	15.04	29.83
2	4.86	14.99	29.84
3	4.86	15.11	29.51
4	4.86	14.90	29.50
5	4.86	14.95	29.83
6	4.85	14.80	29.53
7	4.86	15.10	29.82
8	4.87	15.09	29.50
9	4.85	14.80	29.53
10	4.86	14.80	29.52
ค่าเฉลี่ย	4.86	14.96	29.64
SD	0.0062	0.1289	0.1628
%RSD	0.13	0.86	0.55

3.2 ผลการทดสอบความเที่ยงในต่างวันต่างเวลา (Reproducibility) เป็นเวลา 3 วัน โดยคำนวณร้อยละส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (%RSD) ซึ่งเกณฑ์การยอมรับไม่เกิน 10% ผลการทดสอบดังตารางที่ 5-7

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบความเที่ยงในต่างวันต่างเวลา (Reproducibility) โดยคำนวณร้อยละส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (%RSD) ซึ่งเกณฑ์การยอมรับไม่เกิน 10% ของวันที่ 1

ตัวอย่าง	วันที่ 1		
	HCHO (5 %w/w)	HCHO (15 %w/w)	HCHO (30 %w/w)
1	4.82	15.03	30.06
2	4.81	15.05	30.05
3	4.81	15.03	30.03
4	4.87	14.91	30.14
5	4.86	14.89	30.14
6	4.92	15.03	30.14
7	4.87	14.92	30.13
8	4.87	14.90	30.13
9	4.93	14.89	30.03
10	4.88	15.03	29.91
ค่าเฉลี่ย	4.86	14.97	30.08
SD	0.0422	0.0678	0.0742
%RSD	0.87	0.45	0.25

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบความเที่ยงในต่างวันต่างเวลา (Reproducibility) โดยคำนวณร้อยละส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (%RSD) ซึ่งเกณฑ์การยอมรับไม่เกิน 10% ของวันที่ 2

ตัวอย่าง	วันที่ 2		
	HCHO (5 %w/w)	HCHO (15 %w/w)	HCHO (30 %w/w)
1	4.80	14.98	30.05
2	4.80	15.01	30.09
3	4.81	15.01	30.06
4	4.86	14.90	30.12
5	4.87	14.94	30.11
6	4.87	15.01	30.13
7	4.87	14.91	30.14
8	4.87	14.91	30.13
9	4.87	14.94	30.08
10	4.88	15.01	30.21
ค่าเฉลี่ย	4.85	14.96	30.11
SD	0.0319	0.0467	0.0460
%RSD	0.66	0.31	0.15

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบความเที่ยงในต่างวันต่างเวลา (Reproducibility) โดยคำนวณร้อยละส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (%RSD) ซึ่งเกณฑ์การยอมรับไม่เกิน 10% ของวันที่ 3

ตัวอย่าง	วันที่ 3		
	HCHO (5 %w/w)	HCHO (15 %w/w)	HCHO (30 %w/w)
1	4.82	15.00	30.09
2	4.81	15.01	30.04
3	4.82	15.03	30.06
4	4.86	14.90	30.12
5	4.87	14.94	30.11
6	4.87	14.90	30.13
7	4.87	14.91	30.11
8	4.87	14.91	30.13
9	4.88	14.93	30.07
10	4.87	15.03	30.18
ค่าเฉลี่ย	4.85	14.96	30.10
SD	0.0274	0.0553	0.0404
%RSD	0.56	0.37	0.13

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวิธีการทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน เป็นวิธีที่ศูนย์บริการตรวจสอบฯ พัฒนาขึ้นเอง โดยประยุกต์ใช้เครื่องกลั่นอัตโนมัติสำหรับใช้กลั่นตัวอย่างในการทดสอบไนโตรเจน ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ๆ คือ การกลั่นเพื่อให้ฟอร์มัลดีไฮด์หลุดออกมาจากเนื้อกาวเรซิน การดักจับก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ ให้อยู่ในรูปของสารละลายและไตเตรทเพื่อให้ทราบปริมาณความเข้มข้นที่แน่นอนของฟอร์มัลดีไฮด์ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น สามารถแบ่งเป็น 3 ช่วงหลัก ดังนี้

1. การกลั่น (Distillation stage) เป็นการกลั่นกาวเรซินโดยใช้กรดฟอสฟอริก เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยที่ฟอสฟอริกทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการย่อยสลายพันธะในโครงสร้างของกาวเรซิน ทำให้ปลดปล่อยก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ (CH_2O) ออกมา และจะผ่านระบบกลั่นไปยังภาชนะรองรับ
2. การดูดซับในภาชนะรองรับ (Absorption stage) เมื่อก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ควบแน่นมาสัมผัสกับสารละลายโพตัสเซี่ยมไซยาไนด์ (KCN) และโพตัสเซี่ยมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งทำหน้าที่รักษาสภาวะให้เป็นด่าง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไซยาโนไฮดริน (Cyanohydrin reaction) เป็นสารประกอบไกลโคโลไนไตรด์ (Glycolonitrile) ที่สมบูรณ์และเสถียร และป้องกันไม่ให้ไซยาไนด์กลายเป็นก๊าซพิษ ซึ่งปฏิกิริยาดังสมการ (4)

$$CH_2O + CN^- + H_2O \longrightarrow HOCH_2CN + OH^- \quad (4)$$

3. การไตเตรท (Titration stage) เป็นการหาปริมาณไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ (Back titration) หลังจากที่ฟอร์มัลดีไฮด์ทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์จนกลายเป็นไกลโคโนไนไตรด์ไปแล้ว ในสารละลายจะมีไซยาไนด์เกินพอเหลืออยู่ ไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานเมอร์คิวรี (II) ไนเตรท ($Hg(NO_3)_2$ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้มีความเสถียรสูงมาก ดังสมการ (5)

$$Hg^{2+} + 2CN^- \longrightarrow Hg(CN)_2 \quad (5)$$

ณ จุดยุติ เมื่อไซยาไนด์ถูกใช้หมดไป เมอร์คิวรีไอออนจะทำปฏิกิริยากับอินดิเคเตอร์ คือไดฟีนิลคาร์บาโซน ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีม่วงแดง (Violet-blue complex) โดยปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดลบด้วยไซยาไนด์ที่เหลือจากการไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานเมอร์คิวรี (II) ไนเตรท เท่ากับปริมาณไซยาไนด์ที่ถูกฟอร์มัลดีไฮด์ใช้ไป ทำให้สามารถทราบปริมาณของฟอร์มัลดีไฮด์ที่หลุดออกมาจากการกลั่นกาวเรซินได้ [9]

จากผลการศึกษาการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซินที่พัฒนาขึ้น โดยได้ทำการศึกษาค่าต่ำสุดที่สามารถตรวจพบได้ ค่าต่ำสุดที่สามารถบอกปริมาณได้ ความแม่น และความเที่ยง พบว่าผลการทดสอบผ่านเกณฑ์การยอมรับ และสามารถใช้เป็นวิธีทดสอบกาวเรซินของศูนย์บริการตรวจสอบฯ ได้ เช่นเดียวกันการพัฒนาวิธีทดสอบและการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบไนโตรเจนในกาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ ที่ศูนย์บริการตรวจสอบฯ ได้พัฒนาขึ้นมา [7] ในวิธีดังกล่าวดัดแปลงมาจากวิธีการทดสอบไนโตรเจนในปุ๋ยยูเรีย ซึ่งต้องมีวิธีการย่อยตัวอย่างกาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยกรดเข้มข้น เพื่อสลายพันธะของกาวให้ปลดปล่อยไนโตรเจนออกมา และถูกเปลี่ยนสภาพไปเป็นไอ คือก๊าซแอมโมเนีย ทำการกลั่นและดักจับก๊าซแอมโมเนียด้วยกรดบอริก และไตเตรทหาปริมาณไนโตรเจน ได้ผลการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบผ่านเกณฑ์การยอมรับเช่นเดียวกัน แต่ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการดักจับก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ซึ่งยากกว่าก๊าซแอมโมเนียมาก เพราะก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ระเหยง่ายกว่ามาก จึงทำให้ต้องลดอุณหภูมิการหล่อเย็นให้ต่ำกว่า และใช้ความระมัดระวังมากกว่าด้วย โดยเฉพาะการเกิดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ซึ่งเป็นก๊าซพิษ จึงต้องรักษาสภาพความเป็นด่างให้มากเกินพออยู่ตลอดเวลา เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดก๊าซพิษดังกล่าว นอกจากนี้ควรทำในห้องปฏิบัติการที่อากาศถ่ายเทสะดวก มีการระบายอากาศอย่างดี และ

ในขั้นตอนการสุ่มตัวอย่าง หรือการเติมสารมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ลงในตัวอย่างกาว สำหรับศึกษาความเที่ยงต้องใช้เวลาในการผสมนานกว่า และต้องใช้ความระมัดระวังเพื่อให้ตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าด้วยเช่นกัน

ยังมีวิธีทดสอบฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างอื่น ๆ เช่น น้ำเสีย ซึ่งใช้วิธีการเทียบสี (Colorimetric method) โดยให้ฟอร์มัลดีไฮด์ทำปฏิกิริยากับแอซิติลแอซิโตน ได้สารละลายสีเหลืองอ่อน วัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร และมีผลการทดสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบผ่านเกณฑ์การยอมรับเช่นเดียวกัน [10] และยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ชีวภาพ หรือชีววัตถุ เช่น วัคซีน ด้วยเทคนิคเดียวกัน คือการเทียบสี โดยให้ฟอร์มัลดีไฮด์ทำปฏิกิริยากับแอซิติลแอซิโตน และให้ผลการทดสอบอยู่ในเกณฑ์การยอมรับเช่นเดียวกัน [11] และมีงานวิจัยที่ศึกษาการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลาย โดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยเทคนิคพลาสมา ทดสอบหาฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายด้วยเทคนิค Nash method โดยเป็นปฏิกิริยาระหว่างแอซิติลแอซิโตน แอมโมเนีย และฟอร์มัลดีไฮด์ ตรวจวัดด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 412 นาโนเมตร ซึ่งสามารถวัดค่าฟอร์มัลดีไฮด์ต่ำสุดได้น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร [12] นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบฟอร์มัลดีไฮด์ ด้วยเทคนิคไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิควิดโครมาโตรกราฟี ตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัดไดโอดอาร์เรย์ เช่น การทดสอบฟอร์มัลดีไฮด์ในสิ่งทอ โดยการสกัดฟอร์มัลดีไฮด์อิสระจากตัวอย่างสิ่งทอด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับ 2,4-dinitrophynylhydrazine แล้วทดสอบที่ความยาวคลื่น 360 นาโนเมตร ให้ผลการทดสอบผ่านเกณฑ์การยอมรับสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การใช้งาน [13] และมีการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างหญ้าหมักและอาหารสัตว์ โดยให้ฟอร์มัลดีไฮด์ทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับ 2,4-dinitrophynylhydrazine และตรวจวัดด้วยเทคนิคเดียวกัน คือ HPLC-DAD ซึ่งให้ผลการทดสอบเป็นไปตามวัตถุประสงค์เช่นเดียวกัน [14] ซึ่งวิธีการทดสอบปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ที่พัฒนาขึ้น มีข้อดี คือ ในขั้นตอนการกลั่นจะเป็นการลดการรบกวนจากสีของตัวอย่างได้เป็นอย่างดี เพราะกาวเรซินจะมีความหนืดและสีขาวขุ่น เมื่อผ่านการกลั่น จะได้เป็นสารละลายใส ไม่มีสี มีความสะดวก รวดเร็ว เนื่องจากเป็นการประยุกต์ใช้กับเครื่องกลั่นอัตโนมัติ และเป็นวิธีการทดสอบที่เหมาะกับตัวอย่างกาวเรซินที่มีปริมาณความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์สูงในระดับร้อยละโดยน้ำหนัก สามารถไตเตรทได้ง่าย มีความถูกต้อง แม่นยำ แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ ไม่เหมาะกับตัวอย่างที่มีปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ต่ำ ๆ หรือน้อยกว่า 5% โดยน้ำหนัก และมีข้อควรระวัง คือตัวอย่างกาวแต่ละสูตรมีความหนืด ความข้น และสีแตกต่างกัน บางสูตรกาวจะแข็งตัวเร็วมาก ทำให้ต้องใช้ความระมัดระวังสูงมากในการสุ่มตัวอย่าง

จะเห็นได้ว่าฟอร์มัลดีไฮด์เป็นสารเคมีที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงมาก และมีเทคนิคการทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ที่หลากหลาย แล้วแต่ชนิดของตัวอย่าง เช่น ในตัวอย่างน้ำเสีย อาหาร ยา วัคซีน อาหารสัตว์ สิ่งทอ หรือในกาวเรซินของงานวิจัยนี้ และเทคนิคการทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์หลัก ๆ คือวิธีการทำให้ฟอร์มัลดีไฮด์เกิดสี (Colorimetric method) และตรวจวัดด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ หรือใช้วิธีการไตเตรท แล้วแต่ข้อจำกัดของปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ เช่น ในงานวิจัยนี้ จะใช้เทคนิคการไตเตรท เนื่องจากในกาวเรซินมีปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์สูง หรือหากมีปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์น้อย ๆ ระดับมิลลิกรัมก็อาจจะใช้เทคนิคไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิควิดโครมาโตรกราฟี และตรวจวัดด้วยด้วยเครื่องตรวจวัดไอโอดแอเรย์ (HPLC-DAD) เหล่านี้เป็นต้น ด้วยเหตุนี้การทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างต่าง ๆ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบก่อนนำไปทดสอบตัวอย่างจริง

สรุปผล

จากการพัฒนาวิธีทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน (In-house method) โดยการกลั่นกาวเรซิน เพื่อให้ปลดปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์อิสระ และให้ทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์เกิดเป็นปฏิกิริยาไซยาโนไฮดรินในสภาวะที่เป็นด่าง ทดสอบหาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ที่แน่นอน โดยวิธีการไตเตรท ซึ่งผลการศึกษาการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซิน โดยทำการศึกษาค่าต่ำสุดที่สามารถตรวจพบได้ ค่าต่ำสุดที่สามารถบอกปริมาณได้ทางทฤษฎี การยืนยันค่าต่ำสุดที่สามารถรายงานผลการทดสอบ ความแม่นและความเที่ยง ผลการทดสอบพบว่า ค่าต่ำสุดที่สามารถตรวจพบได้เท่ากับ 0.31% w/w ค่าต่ำสุดที่สามารถบอกปริมาณได้ทางทฤษฎีเท่ากับ 0.32% w/w ผลการทดสอบเพื่อยืนยันค่าต่ำสุดที่สามารถรายงานผลการทดสอบเท่ากับ 5% w/w การประเมินความแม่นและความเที่ยง โดยใช้สารมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์เติมลงในตัวอย่างกาวเรซิน (Spiked sample) ที่ 3 ระดับความเข้มข้น คือ ความเข้มข้นระดับต่ำ (5% w/w) กลาง (15% w/w) และสูง (30% w/w) พบว่าค่าร้อยละการคืนกลับได้อยู่ในช่วง 98.10-98.37, 99.32-100.83 และ 99.43-100.53% ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับทั้งหมด โดยที่เกณฑ์การยอมรับที่ความเข้มข้น 5% w/w อยู่ในช่วง 95-102% และที่ความเข้มข้น 15 และ 30% อยู่ในช่วง 98-101% สำหรับการประเมินความเที่ยงของการทดสอบซ้ำในวันเดียวกัน ได้ค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ที่ 3 ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 0.13, 0.86 และ 0.55% ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับที่ร้อยละส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ไม่เกิน 10% และผลการทดสอบความเที่ยงของการทดสอบซ้ำต่างวันต่างเวลา ทั้ง 3 ระดับความเข้มข้น เป็นเวลา 3 วัน พบว่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ ของวันที่ 1 เท่ากับ 0.87, 0.45 และ 0.25% วันที่ 2 เท่ากับ 0.66, 0.31 และ 0.15% วันที่ 3 เท่ากับ 0.56, 0.37 และ 0.13% ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับทั้งหมดเช่นเดียวกัน ดังนั้นจากการพัฒนาวิธีการทดสอบและการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างกาวเรซิน เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด สามารถใช้เป็นข้อมูลยืนยันได้ว่าวิธีทดสอบนี้เป็นไปตามมาตรฐาน มีความถูกต้อง สามารถใช้ในการบริการทดสอบฟอร์มัลดีไฮด์ในกาวเรซินของภาคอุตสาหกรรมได้ ซึ่งประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ ศูนย์บริการตรวจสอบฯ ให้บริการทดสอบตัวอย่างต่าง ๆ จากทั่วประเทศ ทำให้ต้องพัฒนาวิธีทดสอบต่าง ๆ เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือ และเป็นที่ยอมรับของผู้ใช้บริการ ประกอบกับการทดสอบคุณสมบัติของกาวเรซินยังไม่มีหน่วยงานไหนให้บริการทดสอบอย่างเป็นที่ประจักษ์ ศูนย์บริการตรวจสอบฯ จึงได้พัฒนาวิธีทดสอบดังกล่าวขึ้น ซึ่งเป็นวิธีของห้องปฏิบัติการเอง พร้อมตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี ซึ่งเป็นการพัฒนางานประจำสู่งานวิจัยนี้ขึ้น ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของวิธีทดสอบ และสามารถสร้างความมั่นใจในผลการทดสอบว่าถูกต้องแม่นยำและเชื่อถือได้ ที่สำคัญจะช่วยให้อุตสาหกรรมกาวเรซิน สามารถทราบปริมาณความเข้มข้นที่แน่นอนของฟอร์มัลดีไฮด์ที่ผสมในกาว ส่งผลต่อคุณสมบัติและการใช้งานของกาว นอกจากนี้ยังสามารถเกิดแนวทางในการปรับปรุงวิธีการทดสอบสำหรับการทดสอบฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่างอื่น ๆ เช่น อาหาร น้ำเสียจากโรงงานผลิตกาว หรือกาวชนิดอื่น ๆ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์บริการตรวจสอบและรับรองมาตรฐาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนวิจัย เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำให้งานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. ธนาวุฒิ สุราษฎร์มณี. อันตรายจากฟอร์มัลดีไฮด์ในสำนักงานและที่พักอาศัย. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอิสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2561; 12(2): 130-136. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/EAUHJSci/article/view/134716
2. Justyna C., Jolanta I., Anna C., Formaldehyde-Free Resins for the Wood-Based Panel Industry : Alternatives to Formaldehyde and Novel Hardeners, Molecules, 2022; 27(15), 4862. https://doi.org/10.3390/molecules27154862
3. Nuryawan, A., Risnasari, I., Sucipto, T., Heri Iswanto, A., Rosmala Dewi, R. Urea-formaldehyde Resins: production, application and testing, Innovation in Polymer Science and Technology. 2016; 223(2017), 012053. https://doi:10.1088/1757899X/223/1/012053
4. EURACHEM, The Fitness for Purpose of Analytical Methods, A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics, 2nd Ed, UK. 2014.
5. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่อง ภาชนะและเครื่องใช้เมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ ยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์และเมลามีน-ยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ สำหรับอาหาร : เฉพาะด้านความปลอดภัย มอก. 2921-2562.
6. วิศนีย์ ยิ่งประเสริฐ, โรสนา สุหรรษา. สมบัติของแผ่นไม้อัดที่ผลิตจากไม้บางยางพาราและกาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ที่เติมสารบอแรกซ์. วารสารวนศาสตร์ไทย. 2563; 39(1): 191-202. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/tjf/article/view/246006/168169
7. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่อง สารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ (ฟอร์มาลีน) สำหรับอุตสาหกรรม. มอก.530-2557.
8. สุนทร ขวัญอ่อน, อังคณา ยาบา, ณัชยาตา หมวกทอง, ผุสดี มุหะหมัด. การพัฒนาวิธีทดสอบและการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบไนโตรเจนในกาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์. ใน: งานประชุมวิชาการ ปอมท.2567. 21-22. พฤศจิกายน 2567, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น: หน้า 228-243.
9. เจษฎา ราษฎร์นิยม. ตำราเคมีอินทรีย์ (E-Book). สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. 2563. 663-665. https://online.anyflip.com/zoqcv/bnyv/files/basic-html/page664.html
10. อังคณา ยาบา, สุนทร ขวัญอ่อน, ณัชยาตา หมวกทอง, ผุสดี มุหะหมัด. การพัฒนาวิธีทดสอบและการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสีย. ใน: งานประชุมวิชาการ ปขมท. 2566, 13-15 มีนาคม 2566. มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี, อุดรธานี: หน้า 1141-1149.
11. Zali, S, Es-haghi, A, Ranjbar Rafie, H. Validation of free Formaldehyde Determination Method in DT Vaccine and Tetanus Toxoid Antigen, Archives of Razi Institute. 2023; 78(3): 881-888. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10657939/
12. ศิรประภา ชัยเนตร รุ่งนภา เขียววิจิตร ชาญชัย เดชธรรมรงค์, ครรชิต เงินคำคง. การดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในสารละลายโดยใช้เปลือกไข่ที่ปรับสภาพด้วยเทคโนโลยีพลาสมา. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทร์วิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี). 2565; 14(28): 154-168. https://ejournals.swu.ac.th/index.php/SWUJournal/article/view/15076

13. นารถ พรหมรังสรรค์. การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบหาฟอร์มัลดีไฮด์ในสิ่งทอ, Bulletin of Applied Sciences. 2558; 4(4): 89-94. http://lib3.dss.go.th/fulltext/Bulletin_science/bas_vol4_no4_2015_P89-94.pdf
14. E. Patyra, K. Kwiatek. In-house validation method for quantification of formaldehyde in silage and feedingstuffs with the use HPLC-DAD technique, Polish journal of Veterinary Sciences. 2020; 23(4): 553-561. https://doi:10.24425/pjvs.2020.134705

บทความวิจัย (Research Article)

ผลลัพธ์ทางคลินิกและปัจจัยที่สัมพันธ์กับระดับฮีโมโกลบิลเอวันซีของผู้ป่วยโรคเบาหวานชนิดที่ 2 ณ โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลห้วยกะปิ

Clinical Outcomes and Factors Associated with Hemoglobin A1c Among Patients with Type 2 Diabetes Mellitus at Huai Kapi Subdistrict Health Promoting Hospital

อัมภา สีแดด[1*]
Ampa Seedad[1*]
[1]*โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลห้วยกะปิ จังหวัดชลบุรี*
[1]*Huaykapi Health Promotion Hospital, Chonburi Province, Thailand*
[*]Corresponding author; email: mu.mint@hotmail.com

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
28 พฤษภาคม 2569	14 กรกฎาคม 2569	15 กรกฎาคม 2569

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์ทางคลินิกและปัจจัยที่สัมพันธ์กับการควบคุมระดับฮีโมโกลบินเอวันซีของผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2 ณ โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลห้วยกะปิ จังหวัดชลบุรี การศึกษาเป็นเชิงวิเคราะห์แบบย้อนหลัง (a retrospective analytical study) โดยใช้ข้อมูลการขึ้นทะเบียนรักษา ระหว่าง 1 มกราคม พ.ศ. 2566 ถึง 28 กุมภาพันธ์ 2568 ที่มีประวัติเข้ารับการรักษาอย่างน้อย 2 ครั้ง ผลลัพธ์หลักคือระดับเฮโมโกลบินเอวันซี (HbA1c) การวิเคราะห์ผลลัพธ์หลักใช้สถิติ Pair t-test เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย HbA1c ระหว่างสองช่วงเวลา และใช้ Univariable Logistic Regression วิเคราะห์ปัจจัยที่สัมพันธ์กับการควบคุม HbA1c ตามเป้าหมาย ผลการศึกษาในผู้ป่วยจำนวน 194 ราย ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง (ร้อยละ 74.2) อายุเฉลี่ย 66 ปี การติดตามผลระหว่างปี 2566 ถึง 2568 พบว่าระดับ HbA1c เฉลี่ยเดิมคือ 7.9$\pm$1.8 % และหลังคือ 7.8$\pm$1.8 % ตามลำดับ ซึ่งไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อประเมินการควบคุมตามเป้าหมายของ HbA1c < 6.5% พบว่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 21.1 ในปี 2566 เป็นร้อยละ 27.3 ในปี 2568 (OR 1.4, 95% CI 0.88-2.24, p=0.156) ปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุม HbA1c ให้ได้ตามเป้าหมาย พบว่าผู้ป่วยที่ได้รับยาลดระดับน้ำตาลในเลือดอย่างน้อย 2 ชนิด มีโอกาสควบคุมได้ตามเป้าหมายมากกว่าผู้ที่ได้รับยาเพียง 1 ชนิด 2.1 เท่า (OR 2.1, 95% CI 1.031-4.115, p=0.041) สรุปหลังการติดตาม 2 ปี ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของทั้งระดับค่าเฉลี่ย HbA1c และสัดส่วนผู้ป่วยที่ควบคุมได้ตามเป้าหมาย โดยสัดส่วนผู้ป่วยที่ควบคุมได้ยังอยู่ในระดับต่ำ จำเป็นต้องพัฒนาคุณภาพการดูแลผู้ป่วย ระบบติดตามและปรับแผนการรักษาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มอัตราการควบคุมระดับ HbA1c ได้ตามเป้าหมาย

คำสำคัญ เบาหวานชนิดที่ 2, ผลลัพธ์ทางคลินิก, ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผลลัพธ์ทางคลินิก

Abstract

This retrospective analytical study aimed to evaluate clinical outcomes and identify factors associated with clinical success among patients with type 2 diabetes mellitus (T2DM) at Huai Kapi Sub-district Health Promoting Hospital, Chonburi Province. Data were retrieved from the medical registration database between January 1, 2023, and February 28, 2025. Patients with a history of at least two follow-up visits were included. The primary outcome was the level of hemoglobin A1c (HbA1c). Paired t-test was utilized to compare the mean HbA1c levels between the two periods, and univariable logistic regression was performed to analyze factors associated with target HbA1c control.

A total of 194 eligible patients with T2DM were included. Most participants were female (74.2%), with a mean age of 66 years. During follow-up from 2023 to 2025, the mean HbA1c changed from 7.9 ± 1.8% to 7.8 ± 1.8%, with no statistically significant difference. When glycemic control was assessed using the target HbA1c level of <6.5%, the proportion of patients achieving the target increased from 21.1% in 2023 to 27.3% in 2025; however, the increase was not statistically significant (OR = 1.4, 95% CI: 0.88–2.24, p = 0.156). Patients receiving at least two antidiabetic medications were 2.1 times more likely to achieve target HbA1c levels than those receiving monotherapy (OR = 2.1, 95% CI: 1.031–4.115, p = 0.041).

In conclusion, after two years of follow-up, neither the mean HbA1c level nor the proportion of patients achieving target glycemic control changed significantly, and the overall rate of glycemic control remained low. These findings indicate the need to improve diabetes care through continuous patient monitoring, and regular treatment adjustment to increase the proportion of patients achieving target HbA1c levels.

Keywords: Type 2 diabetes mellitus, Clinical outcomes, Associated factors of clinical outcomes

บทนำ

โรคเบาหวานเป็นปัญหาสุขภาพขนาดใหญ่และกำลังเพิ่มขึ้นทั่วโลก ในปี 2567 มีผู้ป่วยเบาหวานทั่วโลก 588.7 ล้านคน (ร้อยละ 11.1) คาดว่าภายในปี 2593 จะมีผู้ป่วยเพิ่มขึ้นเป็น 852.5 ล้านคน (ร้อยละ 13.0) ผู้ป่วยเบาหวานในประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปี 2567 ผู้ป่วยเบาหวานประมาณ 6.4 ล้านคน และจะเพิ่มสูงขึ้นในปี 2593 เป็น 6.6 ล้านคน [1] ความชุกของโรคเบาหวานในประเทศไทยเพิ่มจากร้อยละ 7.5 ในปี 2547 เป็นร้อยละ 10.1 ในปี 2560 โดยมีเพียงร้อยละ 62.8 ตระหนักว่าตัวเองเป็นโรค มีผู้ป่วยร้อยละ 42.9 ที่ได้รับการรักษาและมีเพียงร้อยละ 20.5 ที่สามารถควบคุมระดับน้ำตาลได้ตามเป้าหมาย [2] รายงานการเสียชีวิตในประเทศไทยเนื่องจากเบาหวานในปี 2567 พบ 34,753 คน [1]

ในปี 2554 องค์การสหประชาชาติได้ออกมติให้ประเทศสมาชิกขับเคลื่อนเพื่อให้เกิดนโยบายการป้องกันและควบคุมกลุ่มโรคไม่ติดต่ออย่างจริงจัง ประเทศไทยโดยกรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข ได้กำหนดให้โรคเบาหวานและความดันโลหิตสูงเป็นเป้าหมายแรกที่ต้องเร่งดำเนินการ โดยการให้ดูแลโรคเบาหวานอย่างต่อเนื่องเพื่อป้องกันไม่เกิดโรคแทรกซ้อนจากเบาหวาน ผู้ป่วยสุขภาพดี และคุณภาพชีวิตดี [3] เนื่องด้วยนโยบายในการลดความแออัดของโรงพยาบาล ผู้ป่วยโรคเรื้อรังรวมถึงผู้ป่วยเบาหวานได้มีการส่งต่อเพื่อรับการดูแลสุขภาพอย่างต่อเนื่องที่โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพชุมชน ซึ่งได้รับการยกระดับจากศูนย์สุขภาพชุมชนในปี 2553 [4]

มาตรฐานการดูแลผู้ป่วยเบาหวานได้มีการจัดทำแนวทางสำหรับโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล (รพ.สต.) [5] ได้กำหนดกรอบแนวคิด บทบาทของรพ.สต. ร่วมกับชุมชน การจัดการบริการ และการประเมินคุณภาพการทำงาน อย่างไรก็ตามด้วยความจำกัดของรพ.สต. เช่น รพ.สต. บางแห่งมีแพทย์มาตรวจรักษาโรคเบาหวานเป็นบางวัน แม้ว่ามีพยาบาลประจำตลอดเวลาทำการ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วยเบาหวานในระดับปฐมภูมิประกอบด้วยคุณภาพบริการ การเข้าถึงบุคลากรทางการแพทย์ พฤติกรรมการดูแลตนเอง และการสนับสนุนจากครอบครัวและชุมชน [6-8]

แนวทางการรักษาโรคเบาหวานในปัจจุบัน เน้นแนวทางให้ผู้ป่วยเป็นศูนย์กลาง และเพิ่มผลลัพธ์ของการรักษาที่รวมถึงผลลัพธ์ด้านหัวใจและหลอดเลือด ด้านการทำงานของไต การลดน้ำหนัก และการจัดการปัจจัยเสี่ยงอย่างเข้มงวด นอกจากนี้ทิศทางการรักษาภาวะโรคเบาหวานเข้าสู่ระยะสงบ (DM remission ระดับฮีโมโกลบิน <6.5% โดยไม่ได้รับการรักษาด้วยยา) [9] ได้มีการถ่ายทอดลงสู่ รพ.สต. ตามแนวทางเวชปฏิบัติสำหรับโรคเบาหวาน 2566 เพื่อมุ่งเป้าในการช่วยเหลือผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2 ให้ควบคุม ระดับฮีโมโกลบินเอวันซี <6.5% ต่อเนื่องอย่างน้อย 3 เดือน และไม่เกิดภาวะน้ำตาลต่ำ [10] อย่างไรก็ตามปัญหาเรื่องการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดยังไม่เป็นไปตามเป้าหมายของการรักษายังคงเป็นความท้าทายในการจัดการโรค การศึกษาแบบ systematic review and meta-analysis วิเคราะห์ผลรวม (pooled data) พบว่าปัจจัยที่สัมพันธ์กับการควบคุมระดับน้ำตาลไม่ได้ตามเป้าหมายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ประกอบด้วย อายุมากกว่า 60 ปี เพศหญิง น้ำหนักเกิน/อ้วน รอบเอว ระยะเวลาการเป็นเบาหวานมากกว่า 10 ปี รวมถึงผู้ป่วยที่ได้รับยาชนิดรับประทานมากกว่า 1 ชนิด หรือยารับประทานร่วมกับการได้รับอินซูลิน หรือได้รับอินซูลิน ความไม่ร่วมมือในการใช้ยา ไม่ร่วมมือในเรื่องโภชนาการ และการไม่มีกิจกรรมทางกาย [11] อย่างไรก็ตามผลการศึกษามีความแปรปรวนระหว่างการศึกษาสูง (heterogeneity) ทำให้การสรุปผลยังมีข้อจำกัด

โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลห้วยกะปิ ดูแลประชากรจำนวน 16,629 คน ได้มีการดำเนินการดูแลผู้ป่วยโรคไม่ติดต่อเรื้อรังที่รับบริการทั้งหมด 510 คน มีแพทย์และเภสัชกรออกมาให้บริการผู้ป่วยเดือนละ 2 ครั้ง โดยที่ผ่านมามีการประเมินคุณภาพการให้บริการและจัดทำรายงานจำนวนผู้ป่วยที่เข้ารับบริการ แต่ยังไม่พบการศึกษาที่ประเมินผลลัพธ์ทาง

คลินิกและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมระดับ HbA1c ของผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2 ในรพ.สต.ห้วยกะปิ จังหวัดชลบุรี เพื่อการวางแผนการพัฒนาคุณภาพการให้บริการ ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงออกแบบการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลังเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ทางคลินิกของการให้บริการหลังติดตาม 2 ปี และปัจจัยที่สัมพันธ์กับการควบคุมระดับฮีโมโกลบินเอวันซีของผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2 ในรพ.สต.ห้วยกะปิ

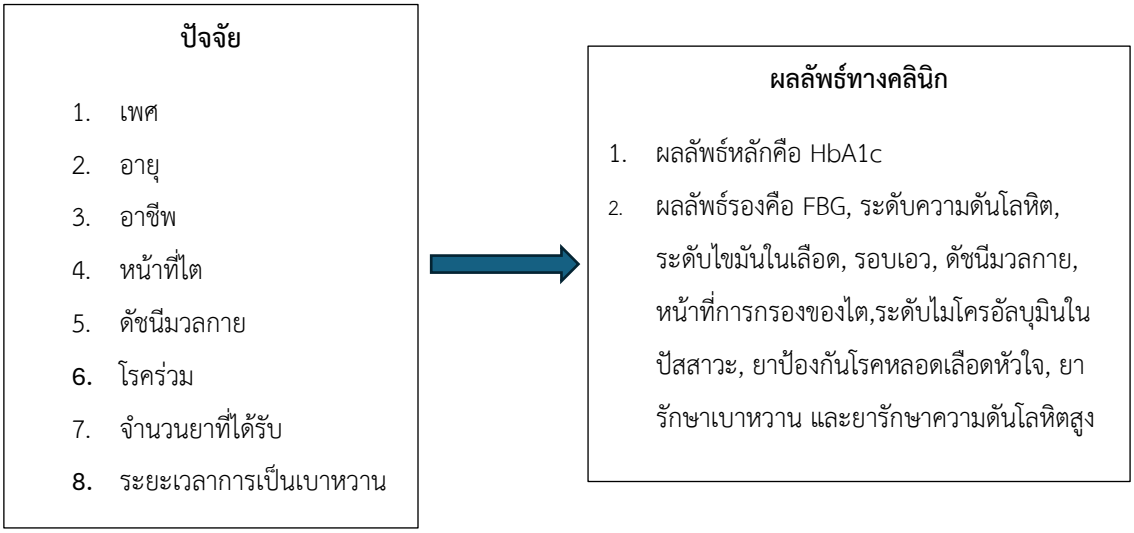
วัตถุประสงค์

1. เพื่อประเมินผลลัพธ์ทางคลินิกของผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2 ที่เข้ารับบริการในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลห้วยกะปิ โดยใช้ระดับฮีโมโกลบินเอวันซี (HbA1c) และสัดส่วนผู้ป่วยที่สามารถควบคุม HbA1c ได้ตามเป้าหมาย

2. เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการควบคุมระดับฮีโมโกลบินเอวันซี (HbA1c) ของผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2 ที่ได้รับการดูแลรักษา ณ โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลห้วยกะปิ

กรอบแนวคิดการวิจัย

ตัวแปรแสดงปัจจัยที่สัมพันธ์กับผลลัพธ์การรักษาในการศึกษานี้ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อผลลัพธ์การรักษาในผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ออกแบบงานวิจัยเป็นการศึกษาเชิงวิเคราะห์แบบย้อนหลัง (Retrospective analytical study) เพื่อประเมินผลลัพธ์ทางคลินิกและปัจจัยที่มีผลต่อผลลัพธ์ทางคลินิกผู้ป่วยโรคเบาหวานชนิดที่ 2 ณ โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลห้วยกะปิ ที่ขึ้นทะเบียนการรักษาในปี 2566 – 2568

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรเป้าหมาย คือผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2 ที่ขึ้นทะเบียนการรักษาโรคเบาหวานที่รพ.สต.ห้วยกะปิ จำนวน 497 ราย ระหว่างเดือน 1 มกราคม 2566 ถึง 28 กุมภาพันธ์ 2568 การศึกษานี้ใช้ข้อมูลผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2 ทั้งหมดที่เข้าเกณฑ์การศึกษา (Total population sampling) โดยมี**เกณฑ์คัดเข้า** คือ ผู้ป่วยอายุมากกว่า 18 ปี ขึ้นไป, ได้รับการวินิจฉัยเป็นโรคเบาหวานชนิดที่ 2 ตามรหัส ICD-10 E11 ที่เข้ารับการรักษาในระหว่าง 1 มกราคม พ.ศ. 2566 ถึง 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 และมีข้อมูลการเข้ารับบริการอย่างน้อย 2 ครั้ง ได้ผู้ป่วยที่เข้าเกณฑ์ทั้งหมดเพื่อคัดเข้าจำนวน 194 ราย และ**เกณฑ์คัดออก** คือ กรณีข้อมูลไม่สมบูรณ์ และ ไม่มีผลลัพธ์หลัก HbA1c โดยมีผู้ป่วยที่คัดออกจำนวน 303 ราย

เครื่องมือที่ใช้สำหรับงานวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยเป็นแบบบันทึกข้อมูล (Data Extraction Form) ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นสำหรับเก็บรวบรวมข้อมูลจากฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์และเวชระเบียนผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2 โดยจัดทำในโปรแกรม Microsoft Excel 365 ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่

1) ข้อมูลทั่วไปของผู้ป่วย ได้แก่ เพศ อายุ อาชีพ และระยะเวลาการเป็นโรคเบาหวาน
2) ข้อมูลทางคลินิก ได้แก่ น้ำหนัก ส่วนสูง ดัชนีมวลกาย ความดันโลหิต ระดับน้ำตาลในเลือด ระดับฮีโมโกลบินเอวันซี (HbA1c) ระดับไขมันในเลือด หน้าที่การทำงานของไต และระดับไมโครอัลบูมินในปัสสาวะ
3) ข้อมูลโรคร่วม ได้แก่ ความดันโลหิตสูง ไขมันในเลือดสูง และโรคร่วมอื่น ๆ
4) ข้อมูลการรักษา ได้แก่ ยาลดระดับน้ำตาลในเลือด ยาลดความดันโลหิตและยาป้องกันโรคหัวใจและหลอดเลือด

แบบบันทึกข้อมูลได้รับการตรวจสอบความครบถ้วน ความเหมาะสม และความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การวิจัย โดยผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 2 ท่าน ก่อนนำไปใช้เก็บข้อมูลจริง และมีการทดลองใช้กับเวชระเบียนตัวอย่างเพื่อปรับปรุงรูปแบบการบันทึกข้อมูลให้มีความถูกต้องและครบถ้วน

ผลลัพธ์ที่ศึกษา

ผลลัพธ์หลัก (Primary outcome) ได้แก่ ระดับฮีโมโกลบินเอวันซี (HbA1c) และสัดส่วนผู้ป่วยที่สามารถควบคุมระดับ HbA1c ได้ตามเป้าหมาย (<6.5%)

ผลลัพธ์รอง (Secondary outcomes) ได้แก่ ระดับน้ำตาลในเลือด และระดับน้ำตาลในเลือดตามเป้าหมาย (80-130 mg/dL); ความดันโลหิต และระดับความดันโลหิตตามเป้าหมาย (<140/90 มม.ปรอท และ <130/90 มม.ปรอท); ดัชนีมวลกาย; ระดับไขมันในเลือด และเป้าหมายของ ไขมันรวม <200 mg/dl, ไตรกลีเซอไรด์ <150 mg/dL, เอชดีแอล ในชาย $\geq$ 40 mg/dL ในหญิง $\geq$ 50 mg/dL); หน้าที่การทำงานของไต (eGFR) และจำแนกตามระดับ eGFR เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ Stage 1 (≥90 mL/min/1.73 m²), Stage 2 (60–89 mL/min/1.73 m²), Stage 3 (30–59 mL/min/1.73 m²) และ Stage 4–5 (<30 mL/min/1.73 m²) [12]; และระดับไมโครอัลบูมินในปัสสาวะ และจำแนกเป็น 3 ระดับ คือ <30 mcg/mg, 30-300 mcg/mg และ > 300 mcg/mg

ตัวแปรด้านการรักษา (Treatment variables) ได้แก่ จำนวนยาลดระดับน้ำตาลในเลือด ยาป้องกันโรคหัวใจและหลอดเลือด และยาลดความดันโลหิต

ปัจจัยที่ศึกษา (Independent variables) ได้แก่ อายุ เพศ อาชีพ ดัชนีมวลกาย โรคร่วม ระยะเวลาการเป็นโรคเบาหวาน หน้าที่การทำงานของไต และจำนวนยาลดระดับน้ำตาลในเลือดที่ได้รับ

การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลเชิงกลุ่ม (Categorical variables) นำเสนอเป็นจำนวนและร้อยละ ส่วนข้อมูลต่อเนื่อง (Continuous variables) ที่มีการแจกแจงแบบปกติ นำเสนอเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean ± SD) สำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงไม่ปกติ นำเสนอเป็นค่ามัธยฐานและพิสัยระหว่างควอไทล์ [Median (IQR)] โดยตรวจสอบการกระจายของข้อมูลก่อนการวิเคราะห์

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ทางคลินิกระหว่างปี พ.ศ. 2566 และ พ.ศ. 2568 ใช้สถิติ Paired t-test สำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติ และในส่วนการเปรียบเทียบสัดส่วนผู้ป่วยที่สามารถควบคุมระดับ HbA1c ได้ตามเป้าหมาย ใช้สถิติ McNemar test

การศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการควบคุมระดับ HbA1c ตามเป้าหมาย ใช้การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกแบบตัวแปรเดียว (Univariable Logistic Regression) นำเสนอผลเป็น Odds Ratio (OR) พร้อมช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (95% Confidence Interval) และกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

การพิทักษ์สิทธิ์กลุ่มตัวอย่าง

การศึกษานี้ได้ขอรับรองจริยธรรมงานวิจัยจาก คณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในคน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เลขที่ 260-227/2568 และผู้วิจัยได้ขออนุญาตผู้อำนวยการโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลห้วยกะปิในการเข้าถึงข้อมูลของผู้ป่วยที่รับการรักษา ณ รพ.สต. ห้วยกะปิ โดยผู้วิจัยเก็บข้อมูลเป็นความลับ ใช้รหัสเป็นตัวกำหนดข้อมูลที่ไม่สามารถโยงหรือระบุถึงตัวผู้ป่วยแต่ละคนได้ และการบันทึกข้อมูลทำในคอมพิวเตอร์เครื่องเดียวที่มีกำหนดการเข้าถึงการใช้ ผู้วิจัยจะทำลายข้อมูลภายใน 1 ปี หลังดำเนินการวิจัยแล้วเสร็จ การนำเสนอข้อมูลจะเป็นการนำเสนอข้อมูลในภาพรวม งานวิจัยนี้ผู้วิจัย นางอัมภา สีแดด ได้ผ่านการอบรมจริยธรรมงานวิจัย ชื่อหัวข้อการอบรมเรื่อง Human Subject Protection (HSP) และปีที่ศึกษา 2568

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลย้อนหลัง (Retrospective data collection) จากฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์และเวชระเบียนของผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษา ณ โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลห้วยกะปิ ในช่วงระหว่างวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2566 ถึงวันที่ 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดดังนี้

1. การเก็บข้อมูลปัจจัยส่วนบุคคลและข้อมูลทางคลินิกขั้นพื้นฐาน ผู้วิจัยทำการดึงข้อมูลของผู้ป่วยทั้งหมดจากระบบฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ของสถานพยาบาล ออกมาในรูปแบบโปรแกรม Excel spreadsheet ซึ่งข้อมูลจะถูกแทนที่ด้วยรหัสลับเพื่อพรางตัวตนของผู้ป่วย ข้อมูลที่จัดเก็บประกอบด้วย เพศ, อายุ, อาชีพ, ระดับการศึกษา, วันที่ได้รับการวินิจฉัยว่าเป็นโรคเบาหวาน และโรคประจำตัวร่วม (Comorbidities)

2. การเก็บข้อมูลผลลัพธ์การรักษา (Clinical Outcomes) ผู้วิจัยและผู้ช่วยวิจัยร่วมกันทบทวนและบันทึกข้อมูลจากใบบันทึกประวัติการรักษา (เวชระเบียน) ของผู้ป่วยรายบุคคล เพื่อรวบรวมตัวแปรผลลัพธ์หลัก ได้แก่ ระดับ HbA1c และผลลัพธ์รอง ได้แก่ ระดับน้ำตาลในเลือดต่ำ ความดันโลหิต ดัชนีมวลกาย ระดับไขมันในเลือด หน้าที่การทำงานของไต

(eGFR) และระดับไมโครอัลบูมินในปัสสาวะ ทั้งนี้ หากผู้ป่วยมีประวัติการเข้ารับการรักษามากกว่า 1 ครั้งภายในปีเดียวกัน ผู้วิจัยจะเลือกเกณฑ์ข้อมูลจากการเข้ารับการรักษาในครั้งล่าสุดของปีนั้น ๆ เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการศึกษา

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลผู้ป่วยเบาหวานจำนวน 194 คน ที่ติดตามระหว่างปี 2566 และ 2568 รายละเอียดคุณลักษณะของกลุ่มตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของกลุ่มตัวอย่าง

ลักษณะกลุ่มตัวอย่าง	จำนวน (ร้อยละ) (n=194)
เพศ: หญิง	144 (74.2)
อายุ (ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน; min-max)	66.0±10.1 (42-92)
อาชีพ: เกษตรกร/แรงงาน	97 (50.0)
ทำงานบ้าน/ไม่มีงาน	83 (42.8)
ค้าขาย/ธุรกิจ	14 (7.2)
การศึกษา: ไม่ได้เรียน/ต่ำกว่าประถม	71 (36.6)
ประถมศึกษา	105 (54.1)
มัธยมศึกษา/ประกาศนียบัตร/ปวช/ปวส	14 (7.2)
ปริญญาตรี ขึ้นไป	4 (2.1)
ระยะเวลาของการเป็นโรคเบาหวาน (ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน; min-max)	9.5±6.8 (1-32)
หน้าที่การทำงานของไต (ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน; min-max)	
Glomerular filtration rate (eGFR)	78.1 ± 22.4 (6.5-126.4)
Stage 1 (90 or above)	67 (34.4)
Stage 2 (60-89)	89 (45.6)
Stage 3a-3b (30-59)	34 (17.4)
Stage 4-5 (<30)	4 (2.1)
Urine microalbuminuria	248.7 ± 676.5 (0.1-5184.8)
<30 mcg/mg	105 (54.1)
30-300 mcg/mg	61 (31.4)
>300 mcg/mg	28 (14.4)
โรคร่วม: เบาหวานและความดันโลหิตสูง	156 (80.4)
เบาหวาน	38 (19.6)
ยาที่ได้รับ (ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน; min-max)	4.5 ± 1.7 (0-9)

ผลลัพธ์การรักษาผู้ป่วยโรคเบาหวานเปรียบเทียบระหว่างปี 2566 และ 2568 (ดังแสดงในตารางที่ 2) พบว่าผลลัพธ์หลักระดับฮีโมโกลบินเอวันซี (HbA1c) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) สำหรับผลลัพธ์รองพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเฉพาะในผลลัพธ์ไขมันในเลือด ประกอบด้วย ระดับคลอเรสเตอรอลรวม (p=0.014), ไตรกลีเซอร์ไรด์ (p=0.003), ไขมันชนิดดี หรือเอชดีแอล (p=0.019) และไขมันชนิดไม่ดี หรือแอลดีแอล (p=0.016)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลลัพธ์ตามเป้าหมายการรักษา (ดังแสดงในตารางที่ 3) พบว่า อัตราการควบคุมระดับ HbA1c ให้เป็นไปตามเป้าหมายในปี พ.ศ. 2568 คิดเป็น 1.4 เท่าเมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2566 แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Odds Ratio = 1.40, 95% CI: 0.88–2.24, p = 0.156) ในส่วนของผลลัพธ์รอง พบสัดส่วนของผู้ป่วยที่มีระดับไขมันไตรกลีเซอไรด์สูงกว่าเป้าหมายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่สัดส่วนของผู้ป่วยที่สามารถควบคุมระดับไขมันเอชดีแอลได้ตามเป้าหมายกลับมีอัตราส่วนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

พิจารณายาที่ผู้ป่วยได้รับเพื่อป้องกันการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด (primary prevention for cardiovascular diseases) พบว่าการให้ยาแอสไพรินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p =0.021) ในทางกลับกันพบว่าสัดส่วนการได้รับยากลุ่มยับยั้งเอนไซม์เปลี่ยนแอนจิโอเทนซิน (ACEIs) หรือยากลุ่มปิดกั้นตัวรับแอนจิโอเทนซิน (ARBs) กลับเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p =0.001) และรูปแบบการให้ยารักษาความดันโลหิตมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p =0.001) ในระหว่างปี 2566 และ 2568 ซึ่งพิจารณาเห็นได้ว่าผู้ป่วยมีทิศทางได้รับยาความดันโลหิตเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์การรักษาเปรียบเทียบระหว่างปี 2566 และ ปี 2568

ผลลัพธ์	2566	2568	Mean difference (SD)	P value[#]
	ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			
ผลลัพธ์หลัก				
HbA1c	7.9±1.8	7.8±1.8	0.1 ±1.8	.259
ผลลัพธ์รอง				
FBS	148.8±49.5	145.1±51.7	3.6 ±54.5	.353
SBP (มม.ปรอท)	140.1±18.6	139.0±16.5	1.1 ±18.6	.416
DBP (มม.ปรอท)	77.2±10.8	77.5±10.9	-0.3 ±12.0	.723
Body mass index (BMI: กก/ม^2)	26.3±5.1	26.4±11.3	-0.1±10.2	.915
รอบเอว (ซม.)	92.9±10.9	92.4±11.4	0.6±8.0	.325
eGFR	78.1±22.4	77.1±22.8	0.9 ±10.0	.205
Micro albuminuria	222.0±583.0	252.8±740.0	-30.8 ±632.3	.521
Cholesterol (TC)	193.5±50.5	185.7±48.3	7.8±43.7	.014*
Triglyceride (TG)	161.0±97.2	146.2±92.2	14.9±69.3	.003*
High-density lipoprotein (HDL)	52.0±13.8	53.8±13.3	-1.7±1.2	.019*
Low-density lipoprotein (LDL)	109.8±42.9	102.7±40.8	7.1±40.7	.016*

[#] pair t-test ในกลุ่มตัวอย่างเดียวกัน

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์การรักษาตามเป้าหมาย เปรียบเทียบระหว่างปี 2566 และ ปี 2568

ผลลัพธ์	2566 (n=194)	2568 (n=194)	p value[#]	OR (95%CI)	p value[##]
ผลลัพธ์หลัก					
HbA1c control (<6.5 %)	41 (21.1)	53 (27.3)	.050	1.40 (0.879 -2.239)	.156
ผลลัพธ์รอง					
FBS control (80-130 mg/dL)	75 (38.7)	88 (45.4)	.117		
BP control (<140/90 มม.ปรอท)	97 (50.0)	103 (53.1)	.512		
BP control (<130/80 มม.ปรอท)	51 (26.3)	52 (26.8)	1.00		
Cholesterol (<200 mg/dL)	121 (62.4)	131 (67.5)	.184		
Triglyceride (<150 mg/dL)	104 (53.6)	122 (62.9)	.018*		
High-density lipoprotein (HDL) (male ≥40 mg/dL; female ≥50 mg/dL)	172 (88.7)	126 (64.9)	<.001**		
Low-density lipoprotein (LDL) (<100 mg/dL)	97 (50.0)	103 (53.1)	.497		
eGFR: stage 1 (≥90 ml/min/1.73 m^2)	69 (35.6)	70 (36.1)	.094		
stage 2 (60-89 ml/min/1.73 m^2)	88 (45.4)	82 (42.3)			
stage 3a-3b (30-59 ml/min/1.73 m^2)	33 (17.0)	37 (19.1)			
stage 4-5 (<30 ml/min/1.73 m^2)	4 (2.1)	5 (2.6)			
Micro albuminuria (n1=189, n2=178)					
<30 mcg/mg	100 (51.5)	89 (45.9)	.500		
30-300 mcg/mg	61 (31.4)	65 (33.5)			
> 300 mcg/mg	28 (14.4)	24 (12.4)			
Primary prevention medications					
Aspirin	46 (23.7)	38 (19.6)	.021*		
Statins	128 (66.0)	120 (62.4)	.382		
ยาเบาหวาน					
Metformin	177 (91.2)	177 (91.2)	1.00		
Glipizide	96 (49.5)	97 (50.0)	1.00		
Insulin	10 (5.2)	8 (4.1)	.625		
Pioglitazone	30 (15.5)	34 (17.5)	.481		
รูปแบบการได้รับจำนวนยาเบาหวาน					
Diet control	8 (4.1)	9 (4.6)	.393		
Monotherapy	78 (40.0)	79 (40.5)			

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์การรักษาตามเป้าหมาย เปรียบเทียบระหว่างปี 2566 และ ปี 2568 (ต่อ)

ผลลัพธ์	2566 (n=194)	2568 (n=194)	p value[#]	OR (95%CI)	p value[##]
รูปแบบการได้รับจำนวนยาเบาหวาน					
Dual therapy	89 (45.6)	81 (41.5)			
Triple therapy	19 (9.7)	25 (12.8)			
ผลลัพธ์รอง					
ยาความดันโลหิตสูง					
ACEIs or ARBs	129 (66.5)	147 (75.8)	.001**		
Betablockers	21 (10.8)	24 (12.4)	.459		
Diuretics	6 (3.1)	4 (2.1)	.500		
Calcium channel blockers	100 (51.5)	105 (54.1)	.227		
Second line groups	10 (5.2)	1 4 (7.2)			
รูปแบบการได้รับจำนวนยาความดันโลหิตสูง					
No therapy	38 (19.6)	23 (11.9)	.001**		
Monotherapy	70 (36.1)	77 (39.7)			
Dual therapy	68 (35.1)	70 (36.1)			
Triple therapy	12 (6.2)	17 (8.8)			
Multiple therapy	6 (3.1)	7 (3.6)			

[#] McNemar test ในกลุ่มตัวอย่างเดียวกัน; [##]Logistic regression; *p<0.05, **p<0.001

เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ในการควบคุมระดับฮีโมโกลบินเอวันซีให้ได้ตามเป้าหมายคือน้อยกว่า 6.5 %จากปัจจัยนำเข้ามาศึกษาทั้งหมด 8 ปัจจัย (ดังแสดงในตารางที่ 4) พบว่า มีเพียงปัจจัยเดียวที่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ได้แก่ รูปแบบการได้รับยารักษาโรคเบาหวานอย่างน้อย 2 ชนิดขึ้นไป โดยผู้ป่วยที่ได้รับยา 2 ชนิดขึ้นไป มีโอกาสควบคุมระดับ HbA1c ได้ตามเป้าหมายเป็น (OR 2.1, 95% CI 1.031-4.115, p=0.041) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มผู้ป่วยที่ได้รับยาเพียงชนิดเดียวหรือน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อ HbA1c <6.5%

ปัจจัย	B	Exp(B)	95%CI	p value[#]
HbA1c <6.5 mg/dL				
อายุ: ≥ 60 ปี	.73	2.076	.893-4.824	.090
เพศ: หญิง	-.735	.480	.224-1.031	.060
อาชีพ: มีทำงาน	.161	1.174	.581-2.371	.654
eGFR: <60 ml/min	.635	1.888	.847-4.208	.120
ดัชนีมวลกาย: ≥ 25 kg/m^2	.558	1.747	.831-3.674	.141
โรคร่วม: เบาหวาน ร่วมกับความดันโลหิตสูง	.911	2.486	.892-6.925	.081
ยาเบาหวานที่ได้รับ: อย่างน้อย 2 ชนิด	.722	2.059	1.031-4.115	.041[*]
ระยะการเป็นเบาหวาน: ≥10 ปี	-.403	.668	.334-1.337	.255

[#]Logistic regression (Method: Enter); [*] p<0.05

การอภิปรายผล

ค่าเฉลี่ยฮีโมโกลบินเอวันซีเปรียบเทียบระหว่างปี 2566 และ 2568 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อวิเคราะห์สัดส่วนผู้ป่วยมีระดับฮีโมโกลบินเอวันซีตามเป้าหมาย (ต่ำกว่า 6.5%) พบมากขึ้น 1.4 เท่าในปี 2568 เมื่อเปรียบเทียบกับปี 2566 อย่างไรก็ตามไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลลัพธ์รองที่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คือค่าเฉลี่ยของระดับไขมันทุกประเภท เมื่อพิจารณาสัดส่วนของผู้ป่วยที่สามารถควบคุมระดับไขมันตามเป้าหมายพบระดับไขมันไตกลีเซอไรด์ และเอชดีแอล มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในปี 2568 เมื่อพิจารณาการใช้ยาพบว่าการให้ยาแอสไพรินลดลง การให้ยากลุ่ม ACEIs หรือ ARBs เพิ่มขึ้น และรูปแบบการได้รับจำนวนยาความดันโลหิตสูงเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลทำให้ระดับฮีโมโกลบินเอวันซีได้ตามเป้าหมายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือรูปแบบการให้ยาอย่างน้อย 2 ชนิดขึ้นไป

การควบคุมน้ำตาลทั้งระดับฮีโมโกลบินเอวันซี และระดับน้ำตาลหลังอดอาหาร เปรียบเทียบระหว่างปี 2566 และ 2568 พบว่า มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้จำนวนผู้ป่วยที่คุมระดับฮีโมโกลบินเอวันซีได้ตามเป้าหมาย อยู่ที่เพียงร้อยละ 20 เมื่อพิจารณาการรูปแบบการได้รับจำนวนยารักษาเบาหวานแม้ว่าไม่พบความแตกต่างระหว่างปี 2566 และ 2568 แต่ก็เห็นแนวโน้มการให้ยาแบบ 3 ชนิดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 9.7 เป็นร้อยละ 12.8 ซึ่งแสดงให้เห็นการดื้อต่ออินซูลินเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลา 2 ปี แม้ว่าร้อยละ 90 ของผู้ป่วยได้รับ metformin ซึ่งใช้รักษาภาวะดื้อต่ออินซูลิน [13] ซึ่งอาจสืบเนื่องจากหลายปัจจัยได้แก่ ความร่วมมือในการรับประทานยา ความอ้วน การรับประทานอาหาร และการมีกิจกรรมทางกายของผู้ป่วย เพื่อเพิ่มผลลัพธ์ในการรักษา หน่วยบริการจึงจำเป็นต้องมีแนวทางแทรกแซงเพื่อเพิ่มผลลัพธ์ของการรักษาให้ไปถึงเป้าหมายมากขึ้น ซึ่งหลายการศึกษาในปัจจุบันได้มีการพัฒนารูปแบบการจัดการเพื่อสนับสนุนให้ผู้ป่วยเบาหวานให้สามารถควบคุมระดับน้ำตาลได้ดีขึ้น หรือสามารถเข้าสู่เบาหวานระยะสงบได้ โดยมีการทดลองการปรับพฤติกรรมหลายการศึกษา ตั้งแต่การจัดโปรแกรมปรับเปลี่ยนวิถีชีวิตให้กับผู้ป่วยเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ครอบคลุมการจัดอบรมให้ความรู้เรื่องโรค โภชนากร ฝึกปฏิบัติการ (การจัดเมนูอาหาร การออกกำลังกายร่วมกัน การแลกเปลี่ยนประสบการณ์การรับรู้และอุปสรรคในการควบคุมโรคเบาหวาน การ

ตั้งเป้าหมายและการออกแบบปรับเปลี่ยนพฤติกรรม) และการเยี่ยมบ้าน ส่งผลให้ระดับน้ำตาลหลังอดอาหารต่ำกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (120 และ 140 มก./ดล. ตามลำดับ) [14] และการจัดบริการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมแบบเข้มข้นในผู้ป่วยเบาหวาน โดยใช้กระบวนการมีส่วนร่วม ที่อำเภอหนองเรือ จังหวัดขอนแก่น แสดงให้เห็นระดับฮีโมโกลบินเอวันซีลดลง จาก 8.1% เป็น 6.7% อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.001$) หลังดำเนินการกิจกรรม 3 เดือน โดยบริการปรับเปลี่ยนพฤติกรรม ครอบคลุมความรู้ โภชนาการ การออกกำลังกาย ร่วมกับการตั้งเป้าหมายระยะยาวให้ผู้ป่วยเข้าสู่ภาวะเบาหวานระยะสงบ ใช้การประเมินผลร่วมกับใช้แอปพลิเคชั่นแบบเรียลไทม์ รวมถึงการสร้างผู้ป่วยต้นแบบ และรูปแบบการทำงานอย่างมีส่วนร่วมและการพัฒนาระบบถ่ายทอดความรู้และบูรณาการสู่งานประจำ [15] และการศึกษาในสหราชอาณาจักร ที่ใช้รูปแบบเชิงทดลองแบบสุ่มและมีกลุ่มควบคุม (แบบไม่ปกปิด) ติดตามนาน 2 ปี ในผู้ป่วยเบาหวานอายุ 20-65 ปี ที่ได้รับการวินิจฉัยว่าเป็นเบาหวานน้อยกว่า 6 ปี และมีค่าดัชนีมวลกาย 27-45 กิโลกรัมต่อตารางเมตร โดยกลุ่มทดลองเข้าร่วมโปรแกรมลดน้ำหนักโดยพยาบาลหรือนักโภชนาการ ได้รับสูตรการรับประทานอาหารทดแทน สูตรอาหารให้พลังงาน 825-853 กิโลแคลอรี่ต่อวัน) นาน 12-20 สัปดาห์ ตามด้วยการให้เริ่มให้อาหารปกติ (2-8 สัปดาห์) และต่อด้วยการสนับสนุนการควบคุมน้ำหนัก โดยติดตามนาน 2 ปี พบว่าจากผู้ป่วย 53/149 คน เข้าเกณฑ์โรคเบาหวานระยะสงบ ในกลุ่มทดลองเปรียบเทียบกับ 5/149 คน ในกลุ่มควบคุม (adjusted OR 25.8, 95%CI 8.3, 80.8, $p<0.0001$) [16]

ระดับไขมันของผู้ป่วยเบาหวานหลังการติดตาม 2 ปี พบว่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยระดับไขมันไตรกลีเซอไรด์มีสัดส่วนของผู้ป่วยสามารถควบคุมตามเกณฑ์เป้าหมายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่สัดส่วนของผู้ป่วยที่เข้าเกณฑ์ตามเป้าหมายระดับไขมันเอชดีแอลกลับลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อประเมินการได้รับยากลุ่ม statin ก็ไม่พบความแตกต่างในระหว่าง 2 ปี ระดับดัชนีมวลกาย (ค่าเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์อ้วน มากกว่า 25 กก/ม^2) และรอบเอว (ส่วนใหญ่เป็นหญิง ค่าเฉลี่ยเกิน 88 ซม.) ก็ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งการควบคุมระดับไตรกลีเซอไรด์ดีขึ้นอาจสืบเนื่องจากผู้ป่วยมีแนวโน้มในการควบคุมระดับฮีโมโกลบินเอวันซี หรือระดับน้ำตาลหลังอดอาหารที่ดีขึ้น ซึ่ง ระดับฮีโมโกลบินเอวันซีและระดับไตรกลีเซอไรด์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง [17] ในกรณีระดับไขมันเอชดีแอลแม้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่สัดส่วนผู้ป่วยที่เข้าถึงเป้าหมายลดลง กลุ่มยา statins มีผลในการเพิ่มระดับเอชดีแอลเล็กน้อยระหว่างร้อยละ 4-10 [18] อย่างไรก็ตามมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อระดับเอชดีแอล ได้แก่ การควบคุมน้ำหนัก การออกกำลังกาย และการรับประทานอาหาร โดยอาหารบางชนิดมีผลช่วยเพิ่มระดับเอชดีแอล ได้แก่ อาหารที่มีระดับคาร์โบไฮเดรตต่ำ น้ำตาลต่ำ ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง และอาหารที่มีไขมันอิ่มตัว ในขณะเดียวกันอาหารเหล่านี้ก็มีผลเพิ่มระดับไขมันแอลดีแอล เช่นกัน [19]

จากการทดสอบ 8 ปัจจัยคุณลักษณะของกลุ่มตัวอย่างต่อระดับระดับฮีโมโกลบินเอวันซี ผลการวิเคราะห์ปัจจัยพบว่าการได้รับยารักษาโรคเบาหวานร่วมกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เป็นปัจจัยเดียวที่ส่งผลสำเร็จต่อการควบคุมระดับ HbA1c ให้ได้ตามเป้าหมาย (< 6.5%) อภิปรายได้ว่า ยารักษาเบาหวานแต่ละกลุ่มมีกลไกการออกฤทธิ์ที่แตกต่างและเสริมฤทธิ์กัน (Combination therapy) การใช้ยามากกว่า 1 ชนิดจึงสามารถลดระดับน้ำตาลได้มีประสิทธิภาพมากกว่าการเพิ่มขนาดยาชนิดเดียวจนสูงสุด (Monotherapy) ปัจจัยอื่นที่ไม่พบความสัมพันธ์ต่อการควบคุมฮีโมโกลบินตามเป้าหมาย อาจอธิบายได้ว่าความแปรปรวนในกลุ่มตัวอย่างมีขนาดต่ำ หรือปัจจัยเหล่านี้อาจจะไม่ได้เป็นปัจจัยสำคัญจริงที่จะมีผลต่อระดับการควบคุมระดับฮีโมโกลบินเอวันซี เช่นในการศึกษาอื่น พบถึง 35 ปัจจัยที่มีผลต่อความไม่สามารถควบคุมระดับน้ำตาลได้ตามเป้าหมาย [11] รวมถึงปัจจัยรายได้ต่ำและพื้นที่อยู่อาศัยมีความเกี่ยวข้องกับระดับฮีโมโกลบินเอวันซีที่สูงขึ้น [20] และระดับความรู้ของผู้ป่วยต่อโรคเบาหวาน มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการดูแลสุขภาพของตนเอง [21]

เมื่อพิจารณายากลุ่ม ACEIs หรือ ARBs ที่ผู้ป่วยได้รับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งเป็นยาที่แนะนำในผู้ป่วยเบาหวานเป็นทางเลือกแรกหากไม่มีข้อห้าม [22] เนื่องด้วยประสิทธิผลในการลดความดันโลหิตสูง และการลดภาวะอัลบูมินในปัสสาวะ ซึ่งสามารถชะลอการเสื่อมของไตในผู้ป่วยเบาหวาน อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ไม่ได้แสดงให้เห็นประสิทธิภาพของยาต่อสมรรถภาพการทำงานของไต (eGFR) และระดับภาวะไมโครอัลบูมินในปัสสาวะในช่วงระยะเวลา 2 ปี จากการศึกษาแบบ systematic review and meta-analysis ได้ยืนยัน ประสิทธิภาพการลดระดับโปรตีนในปัสสาวะ การชะลอภาวะเสื่อมการทำงานของไตได้ [23] ดังนั้นหากไม่มีข้อห้ามหรืออาการไม่พึงประสงค์ ควรสนับสนุนการให้ผู้ป่วยได้รับยากลุ่มนี้เพิ่มมากขึ้น และการติดตามความปลอดภัยอย่างต่อเนื่องต่อไป นอกจากนี้ยังมียากลุ่มใหม่ SGLT2 inhibitor (sodium-glucose cotransporter 2 ได้แก่ empagliflozin, dapagliflozin) ที่มีประสิทธิภาพเมื่อให้เพิ่มเติมจาก ACEI หรือ ARB ในการลดภาวะอัลบูมินในปัสสาวะ ได้อย่างมีประสิทธิผล และช่วยการลดการเสียชีวิตและการเกิดภาวะไตวายในผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2 ได้ [24] ซึ่งเป็นทางเลือกเพิ่มเติมให้กับผู้ป่วย อย่างไรก็ตามผู้ป่วยอาจมีความจำกัดในการได้รับยานี้ เนื่องด้วยบัญชียาหลักแห่งชาติกำหนดการใช้อยู่ในบัญชี จ และกำหนดเกณฑ์ข้อบ่งชี้ในโรคไตวายเรื้อรัง ภาวะหัวใจล้มเหลวในผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2 [25]

เมื่อพิจารณาการได้รับยา aspirin 81 mg เพื่อเป็นยาป้องกันการเกิดภาวะโรคหัวใจและหลอดเลือด พบว่าสัดส่วนการได้รับยาลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหลังการติดตาม 2 ปี นั้น อาจอธิบายได้จากผู้ป่วยในการศึกษานี้ส่วนใหญ่เป็นผู้สูงอายุ และประกอบกับแนวทางการรักษา American Diabetes Association [26] ที่อ้างอิงการศึกษาขนาดใหญ่เชิงทดลองแบบสุ่ม ASPREE (Aspirin in reducing events in the elderly) ในผู้สูงอายุตั้งแต่ 70 ปีขึ้นไป ซึ่งมีสัดส่วนผู้ป่วยเบาหวานร้อยละ 11 ที่ชี้ให้เห็นว่าไม่พบประโยชน์ของการให้ aspirin แบบป้องกันเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (HR 0.95, 95%CI 0.83-1.08) และอัตราการเกิด major hemorrhage ต่อ 1,000 person-year แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (HR 1.38, 95%CI 1.18-1.62, $p<0.001$) [27]

ในประเด็นการใช้ยาทั้ง ACEI หรือ ARBs และแอสไพริน เป็นแนวโน้มการปรับยาที่ดีขึ้น โดยประเมินจากการที่ยา Aspirin ลดลง และยา ACEIs/ARBs เพิ่มขึ้น สะท้อนให้เห็นว่าแนวทางการรักษาในพื้นที่มีการปรับปรุงตามเกณฑ์มาตรฐานสากลล่าสุด (Clinical Practice Guidelines) ที่ปัจจุบันไม่แนะนำให้ใช้ Aspirin ในการป้องกันขั้นปฐมภูมิในผู้ป่วยเบาหวานทุกรายเนื่องจากเสี่ยงเลือดออก แต่เน้นให้ยาลดความดันกลุ่ม ACEIs/ARBs เพื่อปกป้องไตและหัวใจแทน อย่างไรก็ตามควรมีการสนับสนุนแนวทางการใช้ยาอย่างเข้มข้นขึ้นในการควบคุมระดับฮีโมโกลบินเอวันซี ร่วมกับการปรับเปลี่ยนพฤติกรรม เพื่อช่วยผู้ป่วยให้การรักษาเบาหวานถึงเป้าหมาย เพิ่มคุณภาพชีวิต และชะลอภาวะแทรกซ้อนที่รุนแรงของเบาหวานต่อไป

การศึกษานี้มีข้อจำกัดในการศึกษา ได้แก่ 1) การบันทึกข้อมูลการรักษาข้อมูลอิเลคทรอนิกส์ยังไม่เป็นปัจจุบันและยังไม่สมบูรณ์ ทำให้ผู้วิจัยต้องใช้การค้นประวัติจาก OPD card นอกจากนี้ผู้ป่วยหลายคนไม่ได้รับการติดตามผลทางปฏิบัติการด้วยหลายปัจจัย (เช่นมาครั้งเดียวและไม่มีประวัติต่อเนื่อง) จึงเป็นข้อจำกัดในการคัดเข้าผู้ป่วย และ 2) เนื่องด้วยความจำกัดของจำนวนผู้ป่วยที่ได้ โดยแนวทางการประมาณจำนวนขนาดของตัวอย่าง เพื่อให้ได้ effect sizes ระดับปานกลางหรือมากต้องใช้ขนาดตัวอย่าง 500 คน [28] สำหรับการศึกษานี้ แม้การวิเคราะห์แบบปัจจัยเดียว (univariate analysis) ไม่สามารถควบคุมตัวแปรกวนอื่นได้ทั้งหมด แต่สามารถตอบวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อสำรวจหาปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับฮีโมโกลบินเอวันซี ให้เป็นข้อมูลนำเข้าในหน่วยบริการในการพัฒนาการให้บริการผู้ป่วยเบาหวานต่อไป

ข้อเสนอแนะในการจัดการเชิงคลินิกควรมุ่งเน้นการทำงานร่วมกันเป็นทีมสหวิชาชีพ เพื่อการควบคุมความดันโลหิตและระดับน้ำตาลในเลือดให้ได้ตามเป้าหมายอย่างเข้มงวดขึ้น ผู้ป่วยควรได้รับยาแบบป้องกันตามคำแนะนำของแนวทางการรักษาโรคเบาหวานหากไม่มีข้อห้าม รวมถึงการติดตามความปลอดภัยในการใช้ยาอย่างต่อเนื่อง การตรวจคัดกรองภาวะไตเป็นประจำ การให้ความรู้และการสร้างความตระหนักรู้ด้านสุขภาพเพื่อการปรับพฤติกรรมที่ปรับให้เหมาะกับระดับการศึกษาและบริบทของผู้ป่วยอย่างสม่ำเสมอ เพื่อชะลอการดำเนินโรคและลดภาระภาวะแทรกซ้อนในระยะยาว ข้อเสนอแนะในเชิงงานวิจัย ควรสนับสนุนมีการศึกษาเชิงทดลองแบบมีกลุ่มควบคุมในระยะยาวโดยเฉพาะการแทรกแซงในการลดน้ำหนัก การควบคุมอาหาร การออกกำลังกาย ที่เน้นผู้ป่วยเป็นศูนย์กลางในการขับเคลื่อนการรักษา และประเมินผลของระดับน้ำตาล และภาวะแทรกซ้อน ในผู้ป่วยเบาหวานได้ ข้อเสนอแนะในเชิงนโยบาย ควรสนับสนุนการส่งเสริมสุขภาพอย่างมีส่วนร่วมกับผู้ป่วยที่เป็นรูปธรรมให้มากขึ้นในรพ.สต. รวมถึงสนับสนุนให้มีช่องทางการเข้าถึงยาที่มีประสิทธิผลมากขึ้นในการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด การป้องกันการเสื่อมของไตและการติดตามความปลอดภัยจากการใช้ยา

สรุปผลการวิจัย

1. ระดับฮีโมโกลบิน เอ วัน ซี (HbA1c) และความสำคัญทางคลินิกผลการวิจัยพบว่าค่าเฉลี่ย HbA1c ระหว่างปี พ.ศ. 2566 และ พ.ศ. 2568 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และอัตราการควบคุมน้ำตาลตามเป้าหมาย (< 6.5%) แม้จะเพิ่มขึ้น 1.4 เท่าในปี พ.ศ. 2568 แต่ก็ยังไม่พบความแตกต่างทางสถิติอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ในมิติด้านการแพทย์และคลินิก (Clinical significance) แนวโน้มการควบคุมระดับน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นนี้ถือว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ UKPDS 35 ที่ระบุว่าการลดลงของระดับน้ำตาลสะสมแม้เพียงร้อยละ สามารถลดความเสี่ยงทุกความเสี่ยงที่เกี่ยวกับโรคเบาหวานได้ร้อยละ 21 ความเสี่ยงต่อโรคการเสียชีวิตได้ร้อยละ 21 ความเสี่ยงต่อโรคกล้ามเนื้อหัวใจขาดเลือดได้ร้อยละ 14 และความเสี่ยงต่อภาวะ microvascular complication ได้ร้อยละ 37 ได้อย่างมีนัยสำคัญ [29] การที่ผลทางสถิติไม่พบนัยสำคัญอาจเนื่องมาจากข้อจำกัดด้านขนาดประชากร หรือระยะเวลาในการติดตามผลที่สั้นเกินไป

2. ระดับไขมันในเลือด คือ ค่าเฉลี่ยระดับไขมันรวมมีการเปลี่ยนแปลงทางสถิติ แต่สัดส่วนของผู้ป่วยที่ควบคุมไขมันไตรกลีเซอไรด์และเอชดีแอล (HDL-C) ให้ได้ตามเป้าหมายกลับมีอัตราส่วนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ปรากฏการณ์นี้อาจสะท้อนให้เห็นว่า ผู้ป่วยเบาหวานในชุมชนยังคงมีพฤติกรรมการบริโภคอาหารกลุ่มแป้ง น้ำตาล และไขมันทรานส์สูง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อระดับไตรกลีเซอไรด์และลดระดับไขมันดี (HDL-C) ประกอบกับในเวชปฏิบัติทั่วไป มักมุ่งเน้นการให้ยาลดไขมันเพื่อควบคุมระดับแอลดีแอล (LDL-C) เป็นเป้าหมายหลัก ทำให้การจัดการและให้คำแนะนำด้านพฤติกรรมเพื่อควบคุมไขมันไตรกลีเซอไรด์และ HDL-C ยังทำได้ไม่ครอบคลุมเท่าที่ควร

3. รูปแบบการสั่งใช้ยารักษาโรคหัวใจและหลอดเลือด การศึกษานี้แสดงให้เห็นทิศทางการปรับเปลี่ยนรูปแบบการสั่งจ่ายยาที่สอดคล้องกับแนวทางเวชปฏิบัติระดับสากลยุคใหม่ (Modern Clinical Practice Guidelines) โดยพบสัดส่วนการให้ยาแอสไพริน (Aspirin) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากหลักฐานเชิงประจักษ์ในปัจจุบันไม่แนะนำการใช้ยาแอสไพรินเพื่อป้องกันโรคหลอดเลือดในขั้นปฐมภูมิ (Primary prevention) ทุกรายเนื่องจากความเสี่ยงในการเกิดเลือดออก ในทางกลับกันการสั่งจ่ายยากลุ่ม ACEIs หรือ ARBs และยาลดความดันโลหิตชนิดอื่น ๆ มีสัดส่วนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงถึงความ

ตระหนักในการปกป้องการเสื่อมของไต (Renoprotection) และการลดความเสี่ยงต่อโรคหัวใจและหลอดเลือดในผู้ป่วยเบาหวานที่มีภาวะความดันโลหิตสูงร่วมด้วยอย่างเหมาะสม

4. รูปแบบการใช้ยาตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปกับการคุมน้ำตาล ผลการวิเคราะห์ปัจจัยพบว่า การได้รับยารักษาโรคเบาหวานร่วมกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เป็นปัจจัยเดียวที่ส่งผลสำเร็จต่อการควบคุมระดับ HbA1c ให้ได้ตามเป้าหมาย (< 6.5%) อภิปรายได้ว่า ยารักษาเบาหวานแต่ละกลุ่มมีกลไกการออกฤทธิ์ที่แตกต่างและเสริมฤทธิ์กัน (Combination therapy) การใช้ยามากกว่า 1 ชนิดจึงสามารถลดระดับน้ำตาลได้มีประสิทธิภาพมากกว่าการเพิ่มขนาดยาชนิดเดียวจนสูงสุด (Monotherapy)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณที่ปรึกษา ดร.สันติภาพ สุขเอนกนันท์ คณะบัญชีและการจัดการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และรองศาสตราจารย ดร.พยอม สุขเอนกนันท์ โอล์สัน Reukert-Hartman College for Health Professions School of Pharmacy, Regis University, Denver,CO, USA สำหรับคำแนะนำ ขอรับรองจริยธรรมงานวิจัย และการสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการเขียนบทความเพื่อการเผยแพร่ และขอขอบคุณโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลหัวยกะปิ ที่ให้ความสนับสนุน และความร่วมมือ ให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จตามแผน

เอกสารอ้างอิง

1. International Diabetes Federation. IDF diabetes atlas. International Diabetes Federation [Internet]. 2025 [cited 2025 April 25]. Available from: https://diabetesatlas.org/resources/idf-diabetes-atlas-2025
2. Aekplakorn, W., Chariyalertsak, S., Bumrerraj, S., Assanangkornchai, S., Taneepanichskul, S., Neelapaichit N., Ongphiphadhanakul, B., Nitiyanant, W., Patanavanich, R. Diabetes trends and determinants among Thai adults from 2004 to 2020. Scientific reports. 2025; 15(1): 31620. https://doi.org/10.1038/s41598-025-17619-5
3. สมาคมโรคเบาหวานแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี สมาคมต่อมไร้ท่อแห่งประเทศไทย. แนวทางเวชปฏิบัติสำหรับโรคเบาหวาน 2566. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท ศรีเมืองการพิมพ์. 2566. 259.
4. สมหมาย จันทร์เรือง. รพ.สต. ทางเลือกหรือทางหลักของระบบสุขภาพไทย. หนังสือพิมพ์มติชน 7 กรกฎาคม 2558. คอลัมน์ที่ 1. https://www.hfocus.org/content/2015/07/10346
5. กองโรคไม่ติดต่อ กรมควบคุมโรค. แนวทางการดำเนินงาน NCD ในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล (รพ.สต.). [อินเทอร์เน็ต]. นนทบุรี: กระทรวงสาธารณสุข; 2568 [เข้าถึงเมื่อ 20 มกราคม 2568]. เข้าถึงได้จาก: https://shorturl.asia/hStIm

6. อุษณีย์ บุญเมือง, เยาวลักษณ์ อ่ำรำไพ, ชูเกียรติ เพียรชนะ. คุณภาพการดูแลรักษาผู้ป่วยเบาหวานในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล เครือข่ายบริการโรงพยาบาลพระจอมเกล้าจังหวัดเพชรบุรี. วารสารวิชาการ Veridian E-Journal, Silpakorn University สาขามนุษยศาสตร์ สังคมศาสตร์และศิลปะ. 2560; 10(2): 1990-2008. https://he02.tci-thaijo.org/index.php/Veridian-E-Journal/article/view/102475
7. สุทธิดา คำมะภา, กิตติภูมิ ภิญโย. สถานการณ์การดูแลผู้ป่วยเบาหวานที่ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดไม่ได้ ตำบลนาดี อำเภอยางตลาด จังหวัดกาฬสินธุ์. วารสารวิจัยและพัฒนาระบบสุขภาพ. 2565; 15(2): 1-15. https://he02.tci-thaijo.org/index.php/RDHSJ/article/view/255707
8. หทัยรัตน์ กันหาชิน, เพชรไสว ลิ้มตระกูล. การพัฒนาการดูแลผู้ป่วยเบาหวานในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลแห่งหนึ่ง อำเภอพิบูลย์รักษ์ จังหวัดอุดรธานี. วารสารการพยาบาลและการดูแลสุขภาพ. 2563; 38(3): 186-195. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/jnat-ned/article/view/244403
9. Matthew C. Riddle, William T. Cefalu, Philip H. Evans, Hertzel C. Gerstein, Michael A. Nauck, William K. Oh, Amy E. Rothberg, Carel W. le Roux, Francesco Rubino, Philip Schauer, Roy Taylor, Douglas Twenefour; Consensus Report: Definition and Interpretation of Remission in Type 2 Diabetes. Diabetes Care. 2021; 44(10): 2438-2444. https://doi.org/10.2337/dci21-0034
10. กองโรคไม่ติดต่อ กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข. แนวทางการดำเนินงาน การดูแลผู้ป่วยเบาหวานให้เข้าสู่ระยะสงบ [อินเตอร์เน็ต]. 2566 (เข้าถึงเมื่อ 21 มกราคม 2568). เข้าถึงได้จาก: https://ddc.moph.go.th/uploads/publish/1517720240105042138.pdf
11. Siddiquea, B.N., Magliano, D.J., Chowdhury, H.A., Chowdhury, M.R.K., Afroz, A., Shah, S.S., Billah, B. Glycaemic control and its related factors among people with type 2 diabetes in low- and middle-income countries: a systematic review and meta-analysis. 2025; 6: 1-21. https://6:1695235. doi: 10.3389/fcdhc.2025.1695235
12. Devkota, BP. Medscape creatinine reference range [Internet]. 2025 [cited 2026 July 4]. Available from: https://emedicine.medscape.com/article/2054342-overview?form=fpf
13. Zhao X, An X, Yang C, Sun W, Ji H, Lian F. The crucial role and mechanism of insulin resistance in metabolic disease. 2023; 14: 1-24. https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1149239
14. จิมาพร เกตุหิรัญ, สุทธีพร มูลศาสตร์, สมนึก สกุลหงส์โสภณ. ประสิทธิผลของโปรแกรมปรับเปลี่ยนวิถีชีวิตเพื่อนำไปสู่เบาหวานระยะสงบ สำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวานชนิดที่ 2 จังหวัดสมุทรสาคร. วารสารวิทยาลัยพยาบาลพระจอมเกล้า จังหวัดเพชรบุรี. 2569; 9(1): 35-51. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/pck/article/view/282311

15. กรรณิการณ์ ตฤณวุฒิพงษ์, ธวัชชัย คำป้อง, ศรีไพร พลดื้อ, วิภาพร ภูสง่า, สุภาวดี ประทาน, ปรีญานงค์ ดงหาษ์. การพัฒนาและประเมินผลรูปแบบการจัดบริการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมแบบเข้มข้นในผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2 โดยกระบวนการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วม พื้นที่นำร่องเขตสุขภาพที่ 7. วารสารสำนักงานป้องและควบคุมโรคที่ 7 ขอนแก่น. 2569; 33(1): 144-157. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/jdpc7kk/article/view/287021
16. Lean, M.E.J., Leslie, W.S., Barnes, A.C., Brosnahan, N., Tom, G., McCombie, L., Peters, c., Zhyzhneuskaya, S., Al-Mrabeh, A., Hollingsworth, KG., Rodrigues, A.M., Rehackova, L., Adamson, A.J., Sniehotta, F.F., Mathers, J.C., Ross, H.M., Ross, H.M., McIlvenna, Y., Welsh, P., Kean, .S, Ford, I., McConnachie, A., Messow, C.M., Satta,r N., Taylor, R. Durability of a primary care-led weight-management intervention for remission of type 2 diabetes: 2-year results of the DiRECT open-label, cluster-randomised trial. The Lancet Diabetes & Endocrinology. 2019; 7(5): 344-355. https://doi:10.1016/S2213-8587(19)30068-3
17. Naqvi, S., Naveed, S., Ali, Z., Ahmad, S. M., Asadullah Khan, R., Raj, H., Shariff, S., Rupareliya, C., Zahra, F., Khan, S. Correlation between Glycated Hemoglobin and Triglyceride Level in Type 2 Diabetes Mellitus. Cureus. 2017; 9(6): e1347. https://doi.org/10.7759/cureus.1347
18. McTaggart, F., Jones, P. Effects of statins on high-density lipoproteins: a potential contribution to cardiovascular benefit. Cardiovascular drugs and therapy. 2008; 22(4): 321-338. https://doi.org/10.1007/s10557-008-6113-z
19. Yanai, H., Tada, N. Which Nutritional Factors Are Good for HDL. Journal of clinical medicine research. 2018; 10(12): 936-939. https://doi.org/10.14740/jocmr3646
20. Mousavi, S., Greenberg D.T., Ndjaboué R., Greiver M., Dresche,r O., Chipenda Dansokho, S.C., Boutin, D., Chouinard, J.M., Dostie, S., Fenton, R., Greenberg, M., McGavock, J.. Najam, A., Rekik, M., Weisz, T., Willison, D.J., Durand, A., Witteman, H.O. The Influence of Age, Sex, and Socioeconomic Status on Glycemic Control Among People With Type 1 and Type 2 Diabetes in Canada: Patient-Led Longitudinal Retrospective Cross-sectional Study With Multiple Time Points of Measurement. J Med Internet Res Diabetes. 2023; 8: e35682. https://Doi:10.2196/35682
21. กัลยา กุระนา, นภาพร ศรีเนตร, อาทิตยา สุมาศวรรนา. พฤติกรรมการดูแลสุขภาพตนเองของผู้ป่วยโรคเบาหวานในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลขั้นไดใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดยโสธร. วารสารวิชาการเฉลิมกาญจนา. 2563: 7(2): 1-14. https://cnu.ac.th/journal/JournalPDF/7_2_07.pdf
22. สมาคมโรคความดันโลหิตสูงแห่งประเทศไทย. แนวทางการรักษาโรคความดันโลหิตสูงในเวชปฏิบัติทั่วไป พ.ศ. 2567. พิมพ์ครั้งที่ 1. เชียงใหม่: โรงพิมพ์ ทริค ธิงค์. 2567. 282.

23. Wang, K., Hu, J., Luo, T., Wang, Y., Yang, S., Qing, H., Cheng, Q., Li, Q. Effects of Angiotensin-Converting Enzyme Inhibitors and Angiotensin II Receptor Blockers on All-Cause Mortality and Renal Outcomes in Patients with Diabetes and Albuminuria: a Systematic Review and Meta-Analysis. Kidney & blood pressure research. 2018; 43(3): 768-779. https://doi.org/10.1159/000489913
24. Büttner, F., Barbosa, C.V., Lang, H., Tian, Z., Melk, A., Schmidt, B.M.W. Treatment of diabetic kidney disease. A network meta-analysis. PLoS One. 2023; 18(11): e0293183. https://doi: 10.1371/journal.pone.0293183
25. กองนโยบายแห่งชาติด้านยา. ประกาศคณะกรรมการพัฒนาระบบยาแหล่งชาติ เรื่อง บัญชียาหลักแห่งชาติ พ.ศ. 2569 ลงวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2569. 2569 [เข้าถึงเมื่อ 4 กรกฎาคม 2569]. เข้าถึงได้จาก: https://ndi.fda.moph.go.th/ndi_news_detail/index/414
26. American Diabetes Association Professional Practice Committee for Diabetes*; 10. Cardiovascular Disease and Risk Management: Standards of Care in Diabetes—2026. Diabetes Care. 2026; 49 (Supplement_1): S216-S245. https://doi.org/10.2337/dc26-S010
27. McNeil, J.J., Wolfe, R., Woods, R.L., Tonkin, A.M., Donnan, G.A., Nelson, M.R., Reid, C.M., Lockery, J.E., Kirpach, B., Storey, E., Shah, R.C., Williamson, J.D., Margolis, K.L., Ernst, M.E., Abhayaratna, W.P., Stocks, N., Fitzgerald, S.M., Orchard, S.G., Trevaks, R.E., Beilin, L.J., Johnston, C.I., Ryan, J., Radziszewska, B., Jelinek, M., Malik, M., Eaton, C.B., Brauer, D., Cloud, G., Wood, E.M., Mahady, S.E., Satterfield, S., Grimm, R., Murray, A.M. ASPREE Investigator Group. Effect of aspirin on cardiovascular events and bleeding in the healthy elderly. The New England journal of medicine. 2018; 379(16): 1509-1518. https://doi.org/10.1056/NEJMoa1805819
28. Bujang, M. A., Sa'at, N., Sidik, T. M. I. T. A. B., Joo, L. C. Sample Size Guidelines for Logistic Regression from Observational Studies with Large Population: Emphasis on the Accuracy Between Statistics and Parameters Based on Real Life Clinical Data. The Malaysian journal of medical sciences: MJMS. 2018; 25(4): 122-130. https://DOI:10.21315/mjms2018.25.4.12
29. Stratton, I. M., Adler, A. I., Neil, H. A., Matthews, D. R., Manley, S. E., Cull, C. A., Hadden, D., Turner, R. C., Holman, R. R. Association of glycaemia with macrovascular and microvascular complications of type 2 diabetes (UKPDS 35): prospective observational study. BMJ (Clinical research ed.). 2000; 321(7258): 405-412. https://doi.org/10.1136/bmj.321.7258.405

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการวิเคราะห์ปัจจัยด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (DOE)

Development of Tamarind Seed Shelling Machine Using Factor Analysis with Design of Experiments (DOE)

อัครพล น้ำใจดี[1] มีโชค มากมี[1] ราชัน แก้วผดุง[1] ศิวกร แสนขวา[1] พจน์ ชัยอ้าย[1] และ ศุทธินี กล่อมแสร์[1*]
Akkarapon Namjaidee[1], Meechock Markmee[1], Rachan Geawpadung[1], Siwakon Saenkha[1], Poth Chaiaye[1] and Sutthinee Klomsae[1*]
[1]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
[1]Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University
*Corresponding author; email: klomsae.uru@gmail.com

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
7 มิถุนายน 2569	20 กรกฎาคม 2569	20 กรกฎาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เพื่อพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม และ 2) เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการออกแบบการทดลอง ซึ่งได้มีการออกแบบช่องปล่อยเมล็ดมะขามให้มี 2 ขนาด คือ 10 และ 13 มม. ใบตีมี 2 รูปแบบ คือ ใบตีแบบตันและใบตีแบบเจาะรู และชุดส่งกำลังที่มีความเร็วรอบ 2 ระดับ คือ 720 และ 1,080 รอบ/นาที การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเมล็ดมะขามโดยการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามจึงมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ปัจจัย คือ ขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขาม ใบตีและความเร็วรอบในการกะเทาะ ผลการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ สำหรับศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ (2^3 Factorial Design) พบว่า ค่าความเหมาะสมของปัจจัยในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามซึ่งต้องมีการพิจารณาค่าความเหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามที่มากที่สุด ร่วมกับเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามที่น้อยที่สุด จะมีการใช้ใบตีแบบตัน โดยมีขนาดรูช่องปล่อยเมล็ด 13 มม.ที่ความเร็วรอบในการกะเทาะเมล็ดมะขาม 1,080 รอบ/นาที เป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยสามารถกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามได้ในปริมาณเฉลี่ย 147.30 กรัม ด้วยเวลาเฉลี่ย 18.00 วินาที และมีประสิทธิภาพการกะเทาะเฉลี่ยเท่ากับ 95.3% เพิ่มขึ้น 7.25%

คำสำคัญ: เครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม, การออกแบบการทดลอง, การวิเคราะห์ปัจจัย, ประสิทธิภาพการกะเทาะ, เมล็ดมะขาม

Abstract

This research aims to 1) develop a tamarind seed shelling machine and 2) study the factors affecting the efficiency of a tamarind seed shelling machine by using Design of Experiments (DOE). There were 2 sizes of tamarind-seed discharge port designed, 10 and 13 mm., and 2 types of crushing blades, solid blades and perforated blades, with 2 power transmission speeds, 72 and 1,080 rpm. The study of factors affecting the efficiency of a tamarind seed shelling machine by design of experiments was to find the optimization of 3 factors involving seed discharge port size, crushing blade type, and speeds. A full factorial design, 2^3 Factorial Design with 2 levels, was used in this study. The results revealed that the optimal operating conditions for a tamarind seed shelling machine were considered factors affecting the largest quantity of shelled tamarind seeds with the shortest time with the solid crushing blades of a seed-discharge-hole size of 13 mm., at a speed of 1,080 rpm. It was deemed the optimal factor level that was able to crush tamarind seeds in an average of 147.30 grams of 18.00 seconds of an average time. The average shelling efficiency was 95.3% with an increase of 7.25%

Keywords: Tamarind Seed Shelling Machine, Design of Experiment, Factor Analysis, Shelling Efficiency, Tamarind Seeds

บทนำ

มะขามเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ มีการเพาะปลูกอย่างแพร่หลายในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง โดย 3 จังหวัดแรกที่สามารถผลิตมะขามได้มากที่สุดในปี 2566 คือ จังหวัดเพชรบูรณ์ จังหวัดเลยและจังหวัดอุตรดิตถ์ โดยมีปริมาณ 36,519,776 และ 16,373,920 และ 8,364,740 กก./ปี ตามลำดับ [1] เกษตรกรในจังหวัดอุตรดิตถ์จะมีลักษณะการขายมะขามแบบเหมาสวนให้กับพ่อค้าคนกลางที่มารับซื้อในรูปแบบของมะขามฝักสด และมีการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากมะขามในหลายรูปแบบ เช่น มะขามผลสด มะขามไร้เมล็ด มะขามสามรสไร้เมล็ด มะขามคลุก เพื่อเพิ่มมูลค่า [2] ขณะที่เมล็ดมะขามเป็นส่วนเหลือทิ้งที่ถูกมองข้ามและทิ้งเป็นขยะ ทั้งที่เมล็ดมะขามสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น การนำเนื้อเมล็ดมาทำการผลิตเป็นแป้งเมล็ดมะขามทดแทนแป้งสาลี [3] การพัฒนาผลิตภัณฑ์พอกผิวกายจากเนื้อเมล็ดมะขาม [4] เปลือกเมล็ดสามารถนำไปสกัดเพื่อใช้เป็นสารเสริมในการเลี้ยงไก่ ช่วยลดต้นทุนการผลิต [5] การผลิตผ้าไหมย้อมสีด้วยเมล็ดมะขามเพื่อเพิ่มมูลค่าเชิงพาณิชย์ [6] การนำเมล็ดมะขามมาใช้ประโยชน์จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือใช้และเป็นการใช้วัตถุดิบในท้องถิ่นอย่างคุ้มค่า โดยเฉพาะจังหวัดอุตรดิตถ์ที่มีมะขามเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ การนำเปลือกเมล็ดมะขามซึ่งเป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งจากการแปรรูปผลิตภัณฑ์มะขามไร้เม็ด มาใช้เป็นวัตถุดิบในการสกัดสีย้อมเพื่อนำไปใช้ในการย้อมผ้า เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มจากเปลือกเมล็ดมะขามและสร้างสีที่เป็นอัตลักษณ์ให้กับจังหวัดอุตรดิตถ์

เครื่องกะเทาะเปลือกมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเปลือกที่ห่อหุ้มเมล็ดออก และเมล็ดเกิดความเสียหายน้อยที่สุด โดยอาศัยหลักการของแรงกระแทก แรงกด แรงเฉือน และแรงขัดสีที่กระทำต่อเมล็ดด้วยเครื่องกะเทาะแบบต่างๆ [7, 8] เช่น เครื่องกะเทาะแบบลูกกลิ้งยาง เครื่องกะเทาะแบบจานหิน เครื่องกะเทาะแบบขัดสี เครื่องกะเทาะแบบแรงเหวี่ยงหรือแบบตี เป็นต้น ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพในการกะเทาะเปลือกจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การออกแบบกลไกและปรับตั้งเครื่องจักร (อัตราการปล่อย, ความเร็วรอบ, มุมใบตี, ระยะกะเทาะ) ลักษณะทางกายภาพของเมล็ด (ความชื้น, ขนาด, รูปร่าง, ปริมาตร, น้ำหนัก) วิธีการเตรียมเมล็ด (การคั่ว, การอบ, อุณหภูมิ, เวลาที่ใช้) เป็นต้น และจากการศึกษาการกะเทาะเปลือกด้วย

เครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม พบว่า Singh et al. (2015) [9] ได้นำเมล็ดมะขามที่ทำการคั่วที่อุณหภูมิ 220 °C ไปทำการกะเทาะเปลือกออกด้วยเครื่องกะเทาะแบบเหวี่ยงที่มีชุดลูกกลิ้งที่เป็นซี่ตี (spike tooth) หมุนที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบ/นาที เพื่อนำไปทำเป็นผงเมล็ดมะขามและน้ำมันเมล็ดมะขาม งานวิจัยของวิโรจน์ (2558) [10] ได้ทำการพัฒนาเครื่องกะเทาะเมล็ดมะขามแบบตีและแบบสี พบว่า การนำเมล็ดมะขามเปรี้ยวไปคั่วที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 10 นาที มาทำการกะเทาะด้วยเครื่องตีที่ความเร็วรอบใบตี 1,000 รอบ/นาที และขนาดรูตะแกรงกะเทาะ 4 มม. จะได้เปอร์เซ็นต์การกะเทาะเมล็ดมะขามสูงสุดเท่ากับ 52.18 และการกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกแบบสีที่มีความเร็วรอบแกนสี 200 รอบ/นาที น้ำหนักถ่วงเท่ากับ 250 กรัม ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์กะเทาะเมล็ดมะขามสูงสุดเท่ากับ 52.17 การกะเทาะทั้งสองแบบให้ผลเปอร์เซ็นต์กะเทาะเมล็ดมะขามที่ใกล้เคียงกัน แต่การกะเทาะเมล็ดมะขามนั้นควรเลือกใช้เครื่องกะเทาะแบบตีจะดีกว่าเครื่องกะเทาะแบบสีด้วยแกนเหล็กเพราะใช้เวลาการกะเทาะที่สั้นกว่า ขณะที่งานวิจัยของจิรวัฒน์ และคณะ (2566) [11] ได้ออกแบบและสร้างเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามที่มีการออกแบบให้ใบตีมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ขนาดความกว้าง 80 มม. ยาว 14 มม. เจาะรูบนใบตีขนาด 8 มม. จำนวน 3 รู และขนาด 12 มม. จำนวน 2 รู ความเร็วรอบในการกะเทาะ 1,080 รอบ/นาที มีการทดสอบการกะเทาะเมล็ดมะขามที่ผ่านการคั่วที่เวลา 4, 5 และ 6 นาที ที่อุณหภูมิ 100 และ 120 °C พบว่า เมล็ดมะขามที่ผ่านการคั่ว 5 นาที ใช้อุณหภูมิ 120 °C เป็นค่าที่เหมาะสมกับการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม โดยมีเปอร์เซ็นต์การกะเทาะเมล็ดมะขามเฉลี่ยเท่ากับ 88.05 และใช้เวลาในการกะเทาะเมล็ดมะขาม 150 กรัม เป็นเวลา 42.29 วินาที ทั้งนี้จากการทดลองใช้เครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามดังกล่าว พบปัญหาช่องปล่อยเมล็ดที่มีขนาดใหญ่ โดยมีความกว้าง 90 มม. ความยาว 90 มม. การปล่อยเมล็ดมะขามให้หล่นไปกระทบกับใบตีจะต้องดึงลิ้นเปิดปิดช่องปล่อยออก โดยการใช้แรงงานคนเป็นผู้กำหนดอัตราความเร็วในการปล่อยเมล็ดมะขาม ทำให้ผลการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามที่ได้จากผู้ปฏิบัติงานแต่ละคนมีประสิทธิภาพในการกะเทาะเมล็ดที่แตกต่างกัน

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยขจัดปัญหาเรื่องความเร็วในการดึงลิ้นเปิดช่องปล่อยเมล็ดมะขามของผู้ปฏิบัติงาน และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเมล็ดมะขาม เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการออกแบบการทดลอง เพื่อนำเปลือกเมล็ดมะขามไปใช้ในการย้อมสีธรรมชาติต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการออกแบบการทดลอง

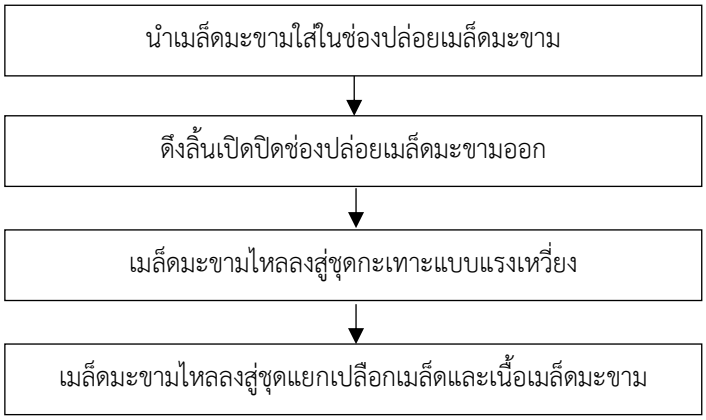
วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาการทำงานของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามต้นแบบ

การทำงานของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามต้นแบบ (ภาพที่ 1) จะเริ่มจากการที่ผู้ปฏิบัติงานนำเมล็ดมะขามใส่ในช่องปล่อยเมล็ดมะขาม จากนั้นจะทำการดึงลิ้นที่กั้นระหว่างช่องปล่อยเมล็ดกับใบตีออก เมื่อเมล็ดมะขามตกกระทบกับใบตีจะเกิดการกะเทาะเปลือกเมล็ดแล้วไหลลงบนตะแกรงที่มีการสั่น เพื่อช่วยแยกเปลือกเมล็ดและเนื้อเมล็ดมะขามออกจากกัน ดังแสดงขั้นตอนการทำงานในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 เครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามต้นแบบ
ที่มา: จิรวัฒน์ และคณะ (2566) [11]



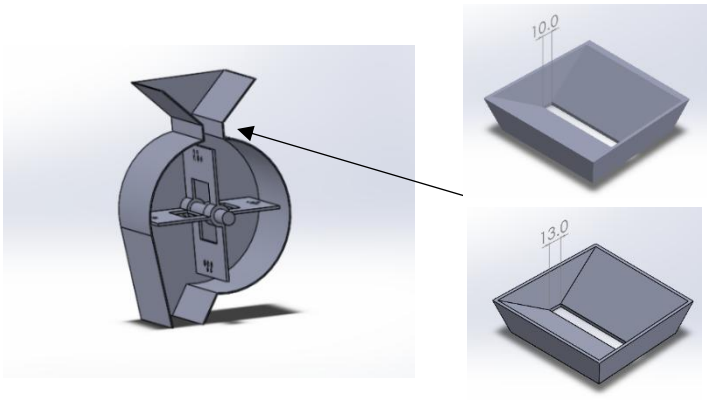
ภาพที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

2. การออกแบบและพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

จากการศึกษาการทำงานของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามต้นแบบ พบปัญหาจากการใช้แรงงานคนเป็นผู้กำหนดความเร็วในการดึงลิ้นเพื่อเปิดช่องปล่อยเมล็ดมะขาม ทำให้ประสิทธิภาพในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามมีความแตกต่างกัน ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกโดยการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องจักรและความปลอดภัยตามหลักการออกแบบเครื่องกล [12] เนื่องจากขนาดช่องปล่อยที่ไม่เหมาะสมทำให้การเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดกะเทาะไม่สม่ำเสมอ [7] การเจาะรูใบตีทำให้มีพื้นที่สัมผัสน้อยและแรงกระแทกลดลง [10] ส่งผลให้ความสามารถในการกะเทาะลดลง และความเร็วเพลาในการกะเทาะมีผลทำให้ความสามารถในการทำงานของชุดกะเทาะมีค่าแตกต่างกัน [7] ดังนั้นการออกแบบและเลือกวัสดุ ขนาด รูปร่างของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลให้เหมาะสมกับการใช้งานจะทำให้เครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม โดยมีการดำเนินการดังนี้

2.1 การออกแบบและพัฒนาชุดกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม ได้มีการนำข้อมูลขนาดเมล็ดมะขามที่สุ่มมาจำนวน 100 เมล็ดมาใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบ ซึ่งพบว่า ด้านที่กว้างและด้านที่ยาวที่สุดของเมล็ดมะขามเท่ากับ 9.8 และ 12.7 มม. ดังนั้นเพื่อให้เมล็ดมะขามสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดกะเทาะเปลือกเมล็ดได้สม่ำเสมอ จึงออกแบบช่องปล่อยเมล็ด

มะขามที่มีขนาดรูช่องปล่อยเมล็ด 2 ขนาด คือ 10 มม. และ 13 มม. (ภาพที่ 3) โดยทำการขึ้นรูปจากเครื่องปริ้นซ์ 3 มิติ รุ่น Creality Ender 3 V3se Printer ด้วยเส้นพลาสติก PLA+ 1.75 มม. และเพิ่มการทดสอบโดยใช้ใบตีแบบตัน



ภาพที่ 3 ช่องปล่อยเมล็ดขนาด 10 มม. และ 13 มม.

2.2 การออกแบบชุดส่งกำลังของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม มีการออกแบบโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1/3 แรง 220 โวลต์ ความเร็วรอบ 1,440 รอบ/นาที เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนพลูเล่ย์แบบอัตราทดหลายชั้น โดยพลูเล่ย์ตัวที่ 1 เป็นแบบ 1 ร่อง A ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของชุดกะเทาะ มี 2 ขนาด คือ 50.8 และ 76.2 มม. พลูเล่ย์ตัวที่ 2 เป็นแบบ 2 ร่อง A เป็นพลูเล่ย์ของชุดกะเทาะขนาด 101.6 มม. และพลูเล่ย์ตัวที่ 3 เป็นแบบ 1 ร่อง A เป็นพลูเล่ย์ชุดกำลังของชุดแยกเปลือกเมล็ดและเนื้อเมล็ดมะขามขนาด 152.4 มม.

ทั้งนี้ในกรณีที่มีการใช้พลูเล่ย์ตัวที่ 1 ขนาด 50.8 มม. จะทำให้มีความเร็วรอบของชุดกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม (n1) = 720 รอบ/นาที แต่หากมีการใช้พลูเล่ย์ตัวที่ 1 ขนาด 76.2 มม. จะทำให้มีความเร็วรอบของชุดกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม (n1) = 1,080 รอบ/นาที

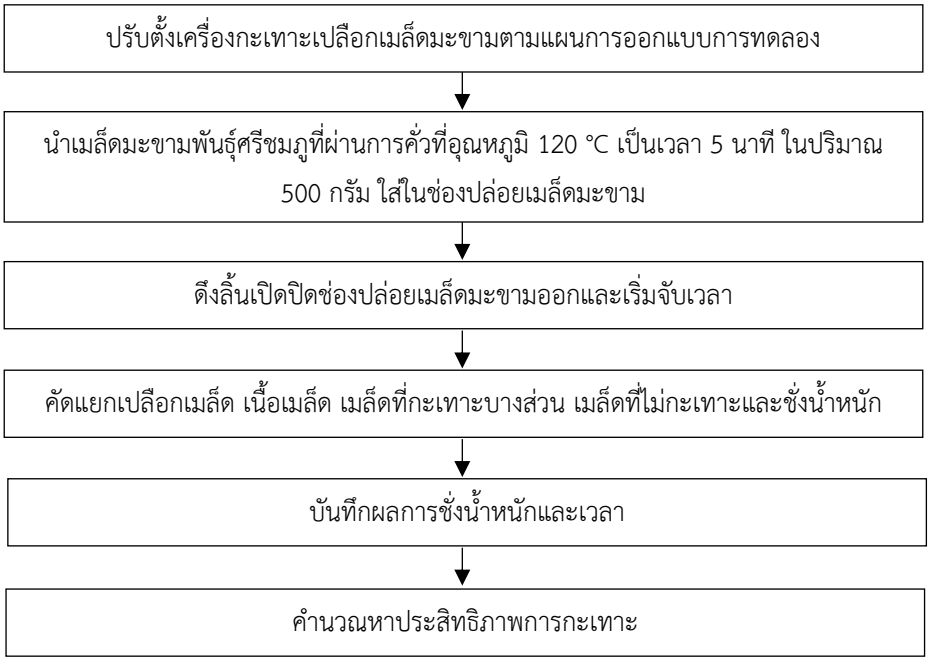
3. การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) เป็นเครื่องมือทางสถิติที่ประยุกต์ใช้อย่างเป็นระบบสำหรับการออกแบบ การดำเนินการและประเมินผลการทดลอง [13] ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมนำไปใช้ในงานต่างๆ อย่างแพร่หลาย [14, 15, 16] ผู้วิจัยจึงได้นำกรอบแนวคิดสำหรับการออกแบบการทดลอง [17] มาใช้ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม ซึ่งจากการพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามมีปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้อง 3 ปัจจัย คือ ใบตี ขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขามและความเร็วรอบในการกะเทาะ โดยใบตีมี 2 แบบ คือ แบบใบตันและแบบเจาะรู ขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขามมี 2 ขนาด คือ 10 และ 13 มม. ส่วนความเร็วรอบในการกะเทาะเมล็ดมะขามมี 2 ระดับ คือ 720 และ 1,080 รอบ/นาที ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ สำหรับศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ ซึ่งเท่ากับ 2^3 การทดลองหรือ 8 การทดลอง และมีการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ ทำให้มีการทดลองทั้งสิ้น 24 การทดลอง โดยมีลำดับการทดลองแบบสุ่ม

ทั้งนี้ในการหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามซึ่งมีตัวแปรตอบสนอง 2 ตัว คือ ปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามที่ได้จากการกะเทาะและเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม จะสามารถประเมินตัวแปรเหล่านั้นแยกกันได้ แต่การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะต้องนำตัวแปรตอบสนองที่แตกต่างกันมาพิจารณาร่วมกัน [13]

4. การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

การทดสอบเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม และหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการออกแบบการทดลอง มีขั้นตอนการดำเนินการทดลองดังนี้



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

การหาประสิทธิภาพการกะเทาะของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม คำนวณได้ดังสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพการกะเทาะ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักเปลือกเมล็ดมะขาม + น้ำหนักเนื้อเมล็ดมะขาม}}{\text{น้ำหนักเมล็ดมะขามก่อนการกะเทาะ}} \times 100 \qquad (1)$$

5. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ในการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบจะมีการนำผลการทดลองคือ ปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามและเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม มาทำการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด (Residual) เพื่อยืนยันความถูกต้องของตัวแบบ และวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างประชากร ดังนั้นการวิเคราะห์ความแปรปรวนจึงเป็นการวิเคราะห์ผลหลักของปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย คือ ใบตี ขนาดรูของช่องปล่อยเมล็ดมะขามและความเร็วรอบในการกะเทาะ รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย 3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกัน และในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม จะมีการพิจารณาภายใต้เป้าหมายของปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามที่ได้จากการกะเทาะที่มากที่สุด และเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามที่น้อยที่สุด โดยใช้ Response Optimizer

ผลการวิจัย

ผลการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามตามเงื่อนไขของการออกแบบการทดลอง สามารถแสดงผลการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม คือ ปริมาณเปลือกเมล็ด ปริมาณเนื้อเมล็ด และเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม ดังตารางที่ 1 ซึ่งจากการคำนวณหาประสิทธิภาพการกะเทาะของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม พบว่า มีประสิทธิภาพการกะเทาะอยู่ในช่วง 67.16 – 97.38% และมีเวลาในการกะเทาะเปลือกอยู่ในช่วง 14.90 – 50.81 วินาที โดยตัวอย่างผลการกะเทาะเมล็ดมะขาม คือ เปลือกเมล็ดมะขาม เนื้อเมล็ดมะขาม เมล็ดมะขามที่ถูกกะเทาะบางส่วนและเมล็ดมะขามที่ไม่ถูกกะเทาะ แสดงดังภาพที่ 5

ตารางที่ 1 ผลการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามตามการวางแผนการออกแบบการทดลอง

ลำดับที่	การทดลอง	ใบตี	ขนาดช่อง (มม.)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	เปลือกเมล็ด (กรัม)	เนื้อเมล็ด (กรัม)	เวลา (วินาที)
23	1	เจาะรู	13	720	122.9	267.3	19.03
6	2	เจาะรู	10	1080	124.7	280.2	23.59
20	3	ใบตัน	13	1080	148.2	332.1	18.07
10	4	ใบตัน	10	1080	150.0	336.9	25.53
1	5	ใบตัน	10	720	135.4	292.3	43.11
2	6	ใบตัน	10	1080	148.0	331.9	33.29
19	7	ใบตัน	13	720	104.0	231.8	15.01
14	8	เจาะรู	10	1080	137.6	303.1	31.24
18	9	ใบตัน	10	1080	147.9	329.0	28.60
13	10	เจาะรู	10	720	123.6	278.2	34.76
4	11	ใบตัน	13	1080	148.4	326.4	20.49
7	12	เจาะรู	13	720	112.4	260.9	14.93
9	13	ใบตัน	10	720	127.4	299.0	45.36
12	14	ใบตัน	13	1080	145.3	329.1	15.45
24	15	เจาะรู	13	1080	124.6	275.0	13.56
21	16	เจาะรู	10	720	118.2	271.5	42.29
11	17	ใบตัน	13	720	104.5	233.7	17.64
8	18	เจาะรู	13	1080	129.9	294.8	16.39
16	19	เจาะรู	13	1080	120.8	271.1	20.94
5	20	เจาะรู	10	720	131.1	284.9	37.92
3	21	ใบตัน	13	720	111.1	243.0	14.90
22	22	เจาะรู	10	1080	127.3	286.5	28.66
15	23	เจาะรู	13	720	126.1	274.4	16.29
17	24	ใบตัน	10	720	138.2	294.6	50.81



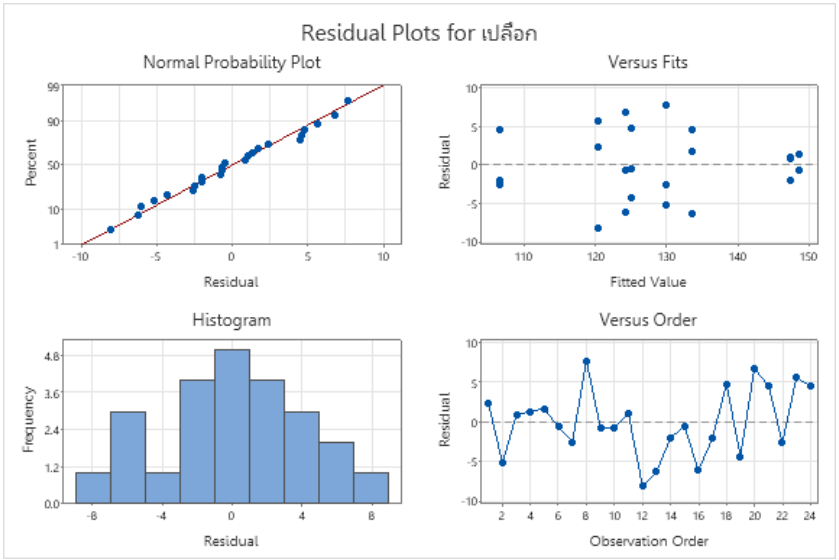
ภาพที่ 5 ตัวอย่างผลการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

1. ผลการทดลองแบบแยกพิจารณาตัวแปรตอบสนอง

ผลการทดลองการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ เพื่อหาค่าความเหมาะสมของปัจจัยแบบแยกพิจารณาตัวแปรตอบสนอง เป็นการแยกพิจารณาผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับปริมาณเปลือกเมล็ดมะขาม และผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามที่ได้จากการกะเทาะ

การทดลองเพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับปริมาณเปลือกเมล็ดมะขาม จะเริ่มต้นจากการตรวจสอบคุณภาพข้อมูลปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามที่กะเทาะได้ว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ ด้วยการวิเคราะห์แผนภาพแสดงค่าความคาดเคลื่อน (Residual Plot) ดังภาพที่ 6 พบว่า ค่าความผิดพลาด (Residual) ของข้อมูลมีการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดเป็นการแจกแจงแบบปกติ ความแปรปรวนคงที่ของค่าความผิดพลาดมีการกระจายตัวแบบสุ่ม และข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน จึงสามารถกล่าวได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องและเหมาะสมต่อการใช้วิเคราะห์ และการวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (ANOVA) ดังตารางที่ 2 พบว่า ใบตี ขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขามและความเร็วรอบในการกะเทาะ มีค่า $P<0.05$ แสดงว่า มีอิทธิพลต่อปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาการเกิดอันตรกิริยาแบบ 2 ปัจจัย และแบบ 3 ปัจจัย พบว่า ค่า $P<0.05$ แสดงว่า มีอิทธิพลต่อกันอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 6 ค่าความคลาดเคลื่อน (Residual Plot) ของปริมาณเปลือกเมล็ดมะขาม

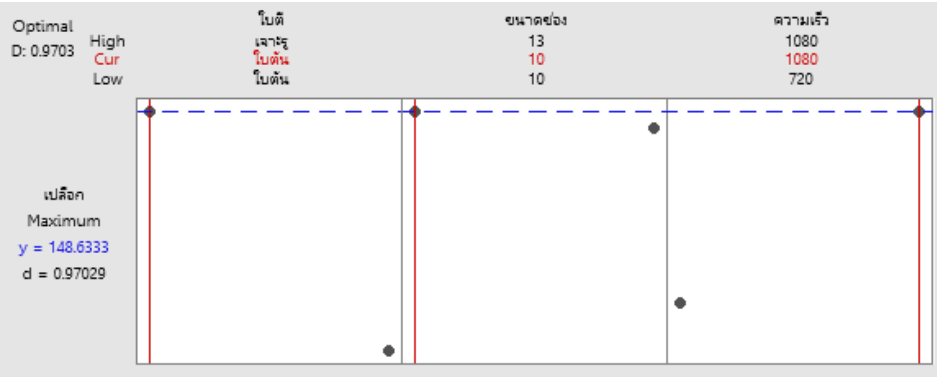
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปริมาณเปลือกเมล็ดมะขาม

แหล่งที่มา	องศาเสรี	ผลบวกกำลังสอง	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	ค่าสถิติ (F_0)	P-Value
ตัวแบบจำลอง	7	4067.7	581.09	21.90	0.000
การถดถอยเชิงเส้น	3	2642.3	880.76	33.19	0.000
ใบตี	1	496.9	496.86	18.72	0.001
ขนาดช่อง	1	515.2	515.23	19.42	0.000
ความเร็วรอบ	1	1630.2	1630.20	61.43	0.000
อันตรกิริยา 2 ปัจจัย	3	1157.4	385.79	14.54	0.000
ใบตี*ขนาดช่อง	1	148.0	148.01	5.58	0.031
ใบตี*ความเร็วรอบ	1	777.5	777.48	29.30	0.000
ขนาดช่อง*ความเร็วรอบ	1	231.9	231.88	8.74	0.009
อันตรกิริยา 3 ปัจจัย	1	268.0	268.00	10.10	0.006
ใบตี*ขนาดช่อง*ความเร็วรอบ	1	268.0	268.00	10.10	0.006
ค่าผิดพลาด	16	424.6	26.54		
ผลรวม	23	4492.3			

การวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้เป้าหมายของปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามที่ได้จากการกะเทาะมากที่สุด โดยใช้ Response Optimizer พบว่า การใช้ใบตีแบบตัน โดยมีขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขาม 10 มม.ที่ความเร็วรอบในการกะเทาะเมล็ดมะขาม 1,080 รอบ/นาที เป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม (ภาพที่ 7) โดยมีปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามเฉลี่ย 148.63 กรัม ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับปริมาณเปลือกเมล็ดมะขาม

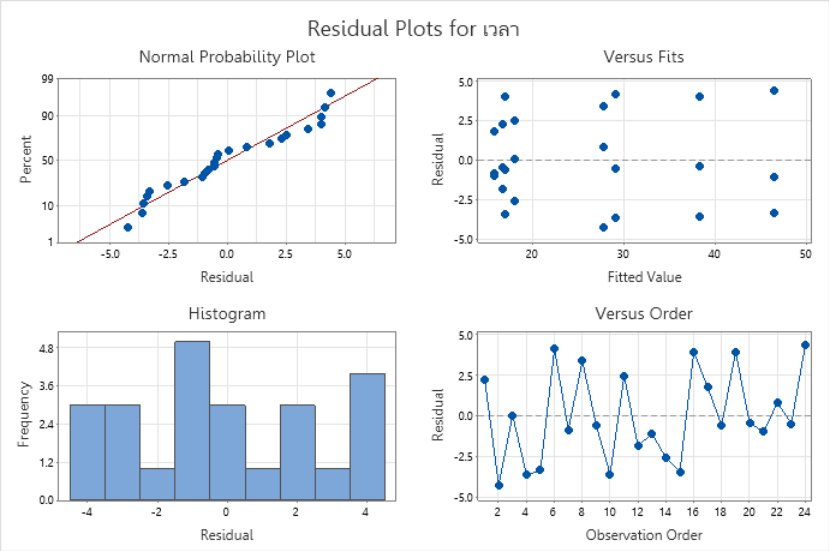
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
เปลือก	148.63	2.97	(142.33, 154.94)	(136.02, 161.24)



ภาพที่ 7 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับปริมาณเปลือกเมล็ดมะขาม

1.2 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

การทดลองเพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม จะเริ่มต้นจากการตรวจสอบคุณภาพข้อมูลเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ ด้วยการวิเคราะห์แผนภาพแสดงค่าความคาดเคลื่อน (Residual Plot) ดังภาพที่ 8 พบว่า ค่าความผิดพลาด (Residual) ของข้อมูลมีการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดเป็นการแจกแจงแบบปกติ ความแปรปรวนคงที่ของค่าความผิดพลาดมีการกระจายตัวแบบสุ่ม และข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน จึงสามารถกล่าวได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องและเหมาะสมต่อการใช้วิเคราะห์ และการวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (ANOVA) ดังตารางที่ 4 พบว่า ขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขาม และความเร็วรอบในการกะเทาะ มีค่า $P<0.05$ แสดงว่า มีอิทธิพลต่อเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามอย่างมีนัยสำคัญ แต่ใบตีมีค่า $P>0.05$ แสดงว่า ไม่มีอิทธิพลต่อเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาการเกิดอันตรกิริยาแบบ 2 ปัจจัย พบว่า ปัจจัยระหว่างขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขามและความเร็วรอบในการกะเทาะมีค่า $P<0.05$ แสดงว่า มีอิทธิพลต่อกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ปัจจัยปัจจัยระหว่างใบตีและขนาดช่องปล่อย ใบตีและความเร็วรอบ และการเกิดอันตรกิริยา 3 ปัจจัย มีค่า $P>0.05$ แสดงว่า ไม่มีอิทธิพลต่อกันอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 8 ค่าความคลาดเคลื่อน (Residual Plot) ของเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

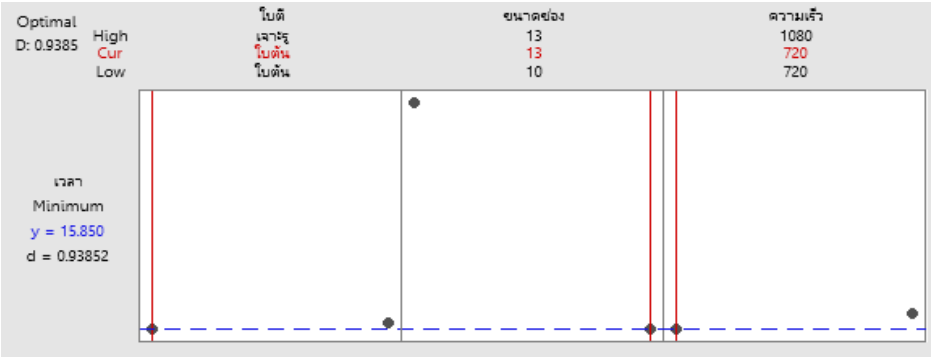
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

แหล่งที่มา	องศาเสรี	ผลบวกกำลังสอง	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	ค่าสถิติ (F_0)	P-Value
ตัวแบบจำลอง	7	2748.92	392.70	35.95	0.000
การถดถอยเชิงเส้น	3	2338.43	779.48	71.37	0.000
ใบตี	1	34.22	34.22	3.13	0.096
ขนาดช่อง	1	2062.02	2062.02	188.79	0.000
ความเร็วรอบ	1	242.19	242.19	22.17	0.000
อันตรกิริยา 2 ปัจจัย	3	381.89	127.30	11.65	0.000
ใบตี*ขนาดช่อง	1	32.25	32.25	2.95	0.105
ใบตี*ความเร็วรอบ	1	8.83	8.83	0.81	0.382
ขนาดช่อง*ความเร็วรอบ	1	340.81	340.81	31.20	0.000
อันตรกิริยา 3 ปัจจัย	1	28.60	28.60	2.62	0.125
ใบตี*ขนาดช่อง*ความเร็วรอบ	1	28.60	28.60	2.62	0.125
ค่าผิดพลาด	16	174.75	10.92		
ผลรวม	23	2923.68			

การวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้เป้าหมายของเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามที่น้อยที่สุด โดยใช้ Response Optimizer พบว่า การใช้ใบตีแบบตัน โดยมีขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขาม 13 มม.ที่ความเร็วรอบในการกะเทาะเมล็ดมะขาม 720 รอบ/นาที เป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม (ภาพที่ 9) โดยมีเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามเฉลี่ย 15.85 วินาที ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
เวลา	15.85	1.91	(11.81, 19.89)	(7.76, 23.94)



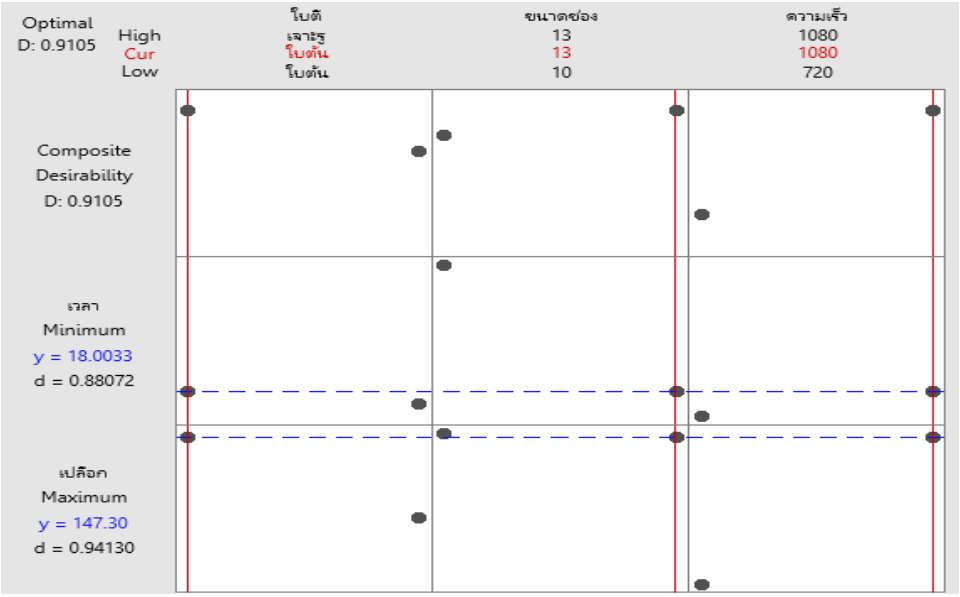
ภาพที่ 9 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

2. ผลการวิเคราะห์ค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

ผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการออกแบบการทดลอง พบว่า ค่าปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามที่มากที่สุด และค่าปัจจัยที่มีผลต่อเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามที่น้อยที่สุด มีระดับของปัจจัยที่เหมาะสมแตกต่างกันตามเงื่อนไขการทดลอง ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามจึงต้องมีการนำผลการทดลองมาพิจารณาร่วมกัน โดยใช้ Response Optimizer พบว่า การใช้ใบตีแบบตัน โดยมีขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขาม 13 มม.ที่ความเร็วรอบในการกะเทาะเมล็ดมะขาม 1,080 รอบ/นาที เป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม (ภาพที่ 10) โดยมีเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามเฉลี่ย 18.00 วินาที และมีปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามเฉลี่ย 147.30 กรัม ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
เวลา	18.00	1.91	(13.96, 22.05)	(9.91, 26.09)
เปลือกเมล็ดมะขาม	147.30	2.97	(141.00, 153.60)	(134.69, 159.91)



ภาพที่ 10 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

อภิปรายผล

การพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ได้มีการออกแบบช่องปล่อยเมล็ดมะขามให้มีการปล่อยเมล็ดมะขามผ่านช่องปล่อยที่มี 2 ขนาด คือ 10 และ 13 มม. เนื่องจากขนาดช่องปล่อยที่ไม่เหมาะสมทำให้การเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดกะเทาะไม่สม่ำเสมอ สอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐพล และคณะ (2562) [7] ได้ทำการศึกษาผลของระยะกะเทาะและความเร็วเพลาของจานกะเทาะต่อสมรรถนะของชุดกะเทาะเปลือกดาวอินคา พบว่า ช่องป้อนที่มีขนาดไม่เหมาะสมทำให้ฝักดาวอินคาเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดกะเทาะไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ความสามารถในการทำงานของชุดกะเทาะลดลดลง

การออกแบบใบตีให้มี 2 รูปแบบ คือ ใบตีแบบตันและใบตีแบบเจาะรู เนื่องจากการเจาะรูใบตีทำให้มีพื้นที่สัมผัสน้อยและแรงกระแทกลดลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกะเทาะเปลือก สอดคล้องกับงานวิจัยของวิโรจน์ (2558) [10] ได้ทำการพัฒนาเครื่องกะเทาะเมล็ดมะขาม ซึ่งมีการเจาะรูใบตีขนาด 6 มม. จำนวน 40 รู ขณะที่เมล็ดมะขามมีความกว้างเฉลี่ย 10.73 มม. ความยาวเฉลี่ย 14.14 มม. ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการกะเทาะสูงสุด 52.18% และการออกแบบชุดส่งกำลังให้มีความเร็วรอบ 2 ระดับ คือ 720 รอบ/นาที และ 1,080 รอบ/นาที สอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐพล และคณะ (2562) [7] พบว่า ระยะกะเทาะและความเร็วเพลาของจานกะเทาะมีผลทำให้ความสามารถในการทำงานของชุดกะเทาะมีค่าแตกต่างกัน ผลจากการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทำให้มีปัจจัยสำคัญ 3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม คือ ขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขาม ใบตี และความเร็วรอบในการกะเทาะ ดังนั้นในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเมล็ดมะขามโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสม สอดคล้องกับงานวิจัยของเอราวัณ และ ยศวรรธน์ (2565) [14] ซึ่งมีการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ปรับตั้งเครื่องอัดยางขอบมุ้งลวดด้วยวิธีออกแบบการทดลอง ส่งผลให้สามารถลดเวลาการทำงานและเพิ่มกำลังการผลิต การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการในการปรับตั้งเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า การกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามควรมีการเลือกใช้ใบตีแบบตัน เนื่องจากใบตีแบบตันจะมีแรงกระแทกที่สูงกว่าใบตีแบบเจาะรู ซึ่งสอดคล้องกับกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน [18] และการเลือกใช้ความเร็วรอบในการกะเทาะ 1,080 รอบ/นาที ซึ่งมีค่าความเร็วรอบที่สูงกว่า ทำให้ใบตีหมุนเร็วกว่า แรงเหวี่ยงและแรงกระแทกจะสูง ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการกะเทาะสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐพล และคณะ (2562) [7] ซึ่งพบว่า การเพิ่มความเร็วรอบทำให้เปอร์เซ็นต์การกะเทาะเมล็ดน้ำตาลของถั่วดาวอินคาเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่การเลือกใช้ช่องปล่อยเมล็ดมะขามที่มีขนาด 13 มม. จะมีประสิทธิภาพการกะเทาะระหว่าง 67.16 – 96.06% ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพสูงสุดเป็นอันดับที่ 2 เนื่องจากการใช้ช่องปล่อยที่มีขนาดใหญ่ทำให้การปล่อยเมล็ดมะขามเข้าสู่ชุดกะเทาะมีปริมาณมาก การรับแรงกระแทกและแรงเหวี่ยงจะลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกะเทาะลดลงเล็กน้อย แต่เวลาที่ใช้ในการกะเทาะเมล็ดมะขามก็ลดลงด้วยเช่นกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Patil et al. [19] ซึ่งพบว่า การลดอัตราการปล่อยข้าวฟ่างเข้าสู่เครื่องกะเทาะเปลือกจะทำให้ขีดความสามารถในการกะเทาะเปลือกลดลง เนื่องจากใช้เวลาในการปล่อยข้าวฟ่างนาน แต่ประสิทธิภาพของการกะเทาะเปลือกจะเพิ่มขึ้น ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามที่เพิ่มขึ้น 7.25% ด้วยการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม ทั้งนี้ในการทดลองมีการนำเมล็ดมะขามพันธุ์ศรีชมภูที่มีการเตรียมเมล็ดด้วยการคั่วที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 5 นาที มาใช้ทำการทดลอง โดยไม่ได้นำค่าความชื้นมาเป็นข้อกำหนดในการทดลอง การนำเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามไปใช้อาจได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างออกไป เนื่องจากความแตกต่างของคุณลักษณะของเมล็ดมะขาม ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งต่อไปจึงควรใช้ค่าความชื้นของเมล็ดมาเป็นข้อกำหนดในการทดลอง และทำการทดลองกับเมล็ดมะขามสายพันธุ์อื่นๆ เพื่อให้เครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามสามารถใช้ได้กับทุกสายพันธุ์

สรุปผล

จากการพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการวิเคราะห์ปัจจัยด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม คือ การใช้ใบตีแบบตัน โดยมีช่องปล่อยเมล็ดขนาด 13 มม. และมีความเร็วรอบในการกะเทาะเมล็ดมะขาม 1,080 รอบ/นาที ซึ่งทำให้สามารถกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามได้ในปริมาณเฉลี่ย 147.30 กรัม และมีเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามเฉลี่ย 18.00 วินาที ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% ลดลงจากเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามต้นแบบ 24.29 นาที แต่มีการใช้เมล็ดมะขามในการทดลองเพิ่มขึ้น 350 กรัม และมีประสิทธิภาพการกะเทาะเฉลี่ย 95.3%

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ ตลอดจนการสนับสนุนงบประมาณในการเผยแพร่งานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. กรมส่งเสริมการเกษตร. รายงานข้อมูลภาวะการผลิตพืช จำแนกตามชนิดพืช/แมลง [อินเตอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: กรมส่งเสริมการเกษตร; 2566 [เข้าถึงเมื่อ 18 มิถุนายน 2567]. เข้าถึงได้จาก: https://production.doae.go.th
2. เพิ่มศักดิ์ พันธ์แตง, ธนกิจ ถาหมี, ดุษฎี บุญธรรม. การพัฒนาโมเดลธุรกิจแคนวาสแบบมีส่วนร่วมเพื่อเพิ่มความสามารถในการประกอบธุรกิจของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลไม้แปรรูปบ้านเสี้ยว. วารสารการจัดการสมัยใหม่. 2566; 22(1): 42-59. https://so04.tci-thaijo.org/index.php/stou-sms-pr/article/view/271208
3. ปัญจภัสร์ จิรณิศราวิทย์, พนัชกร สุทธไชย. การศึกษาปริมาณแป้งเมล็ดมะขามทดแทนแป้งสาลีที่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์คุกกี้. วารสารสุขภาพและอาหารเชิงสร้างสรรค์. 2567; 2(2): 1-13. https://he03.tci-thaijo.org/index.php/JHFC/article/view/3291
4. ซุวารี เจ๊ะอาแว, สุไฮนี ขาเดร์, ปิยะนุช สุวรรณรัตน์, ศิริรัตน์ ศรีรักษา. การพัฒนาผลิตภัณฑ์พอกผิวกายจากเนื้อเมล็ดมะขาม. วารสารการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก. 2564; 19(1): 135-146. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/JTTAM/article/view/240002
5. ครุปกรณ์ ละเอียดอ่อน, สมหมาย ปะติตังโข, กิ่งแก้ว ปะติตังโข. การเลี้ยงไก่ด้วยสารเสริมจากเปลือกเมล็ดมะขามเพื่อลดต้นทุนการผลิตของเกษตรกรในจังหวัดบุรีรัมย์. วารสารวิจัยราชภัฏเชียงใหม่, 2562; 20(1): 31-40. https://so05.tci-thaijo.org/index.php/cmruresearch/article/view/153263
6. อรนุช นาคชาติ. การพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ในการผลิตผ้าไหมย้อมสีด้วยเมล็ดมะขามเพื่อเพิ่มมูลค่าเชิงพาณิชย์ : กรณีศึกษาผ้าขาวม้า บ้านทัพกระบือ ตำบลสำโรง อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์. วารสารวิจัยวัฒนธรรม. 2564; 4(1): 106-119. https://book.culture.go.th/reseach_jul_dec_64/mobile/index.html#p=109
7. ณัฐพล โสกุดเลาะ, กิตติพงษ์ ลาลุน, ศักดิ์ดา จาปานา, สมโภชน์ สุดาจันทร์, นิรัติศักดิ์ คงทน. ผลของระยะกะเทาะและความเร็วเพลาของจานกะเทาะต่อสมรรถนะของชุดกะเทาะเปลือกดาวอินคา. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา). 2562; 19(3): 61-71. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/gskku/article/view/208431
8. Singh, SM, Joshi, TJ, Rao, PS. Technological advancements in millet dehulling and polishing process: An insight into pretreatment methods, machineries and impact on nutritional quality. Grain & Oil Science and Technology. 2024; 7(3): 186-195. https://doi.org/10.1016/j.gaost.2024.05.007
9. Rao, AS, Kumar, AA, Ramana, MV. Tamarind seed processing and by-products. CIGR Journal [Internet]. 2015 [cited 2015 June 23]; 17(2): 200-204. Available from: https://cigrjournal.org/index.php/Ejounral/article/view/3125/2135

10. วิโรจน์ ตรีมงคล. การพัฒนาเครื่องกะเทาะเมล็ดมะขาม (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). คณะวิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2558. https://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2015/TU_2015_5510032047_4395_2766.pdf
11. จิรวัฒน์ ธรรมชัย, ปรัชญา มาอยู่, ธนกฤต จุมจา, ณัฐพงศ์ เสือปรางค์. เครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม (ปริญญานิพนธ์ปริญญาเทคโนโลยีบัณฑิต). คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. อุตรดิตถ์: มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์; 2566.
12. อิเคดะ, ชิเงรุ, นากานิชิ, ยูจิ. การออกแบบเครื่องจักรกล. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น); 2561.
13. Bosch. Design of Experiments (DoE). Germany: Robert Bosch GmbH; 2010. 98.
14. เอราวัณ ชาญพหล, ยศวรรธน์ จันทนา. การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ปรับตั้งเครื่องอัดยางขอบมุ้งลวดด้วยวิธีออกแบบการทดลอง. วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม. 2565; 15(2): 156-164. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/eng_ubu/article/view/244047
15. Brahmi M, Ba M, Hidri Y, Hassen A. Factorial experimental design intended for the optimization of the alumina purification conditions. Journal of Molecular Structure. 2018; 1157: 567-578. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.12.071
16. Gürkan EH, Tibet Y, Çoruh S. Application of Full Factorial Design Method for Optimization of Heavy Metal Release from Lead Smelting Slag. Sustainability. 2021; 13(9): 4890. https://doi.org/10.3390/su13094890
17. Proust M. Design of Experiments Guide. Cary, NC: JMP Statistical Discovery LLC; 2024. 846.
18. เซอร์เวย์, เรย์มอนด์ เอ, จีเวท, จอร์น ดับเบิลยู. ฟิสิกส์ 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: เซนเกจ เลินนิ่ง อินโด-ไชน่า; 2561. 704.
19. Patil, M, Gupta, AK, Nayak, P. Design, development and performance evaluation of minor millet de-husker. International Journal of Farm Sciences. 2018; 8(1): 63-69. https://doi.org/10.5958/2250-0499.2018.00015.0

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน

Development of a Care System for Drug Addict Patients with High Risk of Violence in Community

นรากร สารีแหล้ [1] และ กฤษณา ทรัพย์สิริโสภา[1*]
Narakorn Sareelae[1] and Krissana Sapsirisopa[1*]
[1]อาจารย์ วิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี อุดรธานี คณะพยาบาลศาสตร์ สถาบันพระบรมราชชนก
[1]Lecturer, Boromarajonani College of Nursing, Udon Thani, Faculty of Nursing, Praboromarajchanok Institute
*Corresponding author; email: krissana_h@yahoo.com

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
9 มิถุนายน 2569	4 กรกฎาคม 2569	15 กรกฎาคม 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยและพัฒนาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน และศึกษาประสิทธิผลของระบบการดูแลที่พัฒนาขึ้น ดำเนินการเป็น 3 ระยะคือ 1) ระยะประเมินสถานการณ์ 2) ระยะพัฒนารูปแบบ และ 3) ระยะประเมินผล กลุ่มตัวอย่างคือผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรง จำนวน 70 คน ผู้ดูแลจำนวน 70 คน และบุคลากรเครือข่ายสุขภาพชุมชนจำนวน 26 คน โดยการคัดเลือกแบบเจาะจง ทำการศึกษาระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2567-30 กันยายน 2568 เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วยแบบประเมินพฤติกรรมก้าวร้าวรุนแรง (OAS) แบบประเมินความเครียด (ST-5) แบบประเมินการใช้ยาเสพติดซ้ำ แบบประเมินการขาดนัด แบบติดตามประเมินผล แนวทางการสนทนากลุ่มและการสัมภาษณ์เชิงลึก วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา และสถิติอ้างอิงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ผลการวิจัยพบว่า การพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน “COMMUNITY Model” ประกอบด้วย 9 องค์ประกอบ ได้แก่ 1) คัดกรองกลุ่มเสี่ยงในชุมชนและเฝ้าระวังสัญญาณเตือน 2) ทีมเชิงรุกลงเยี่ยมบ้านและเข้าถึงผู้ป่วยรวดเร็ว 3) ติดตามอาการและพฤติกรรมต่อเนื่อง 4) ทีมสหวิชาชีพร่วมวางแผนดูแล 5) ใช้ Google Map และ Line กลุ่มติดตามผู้ป่วย 6) สร้างการมีส่วนร่วมของครอบครัว และเครือข่าย 7) วางแผนดูแลรายบุคคล 8) ติดตามต่อเนื่องหลังจำหน่าย และ 9) เสริมพลังครอบครัวในการดูแลผู้ป่วย และพบว่าหลังการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลการประเมินก่อนและหลังการใช้รูปแบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .001$)

คำสำคัญ: การดูแลผู้ป่วย, ผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรง, ชุมชน

Abstract

This research and development study aimed to develop a care system for patients with substance use disorders at high risk of violence in the community and to evaluate the effectiveness of the developed care system. The study was conducted in three phases: 1) situational assessment, 2) model development, and 3) evaluation. The participants consisted of 70 substance abuse patients at high risk of violence, 70 caregivers, and 26 community health network personnel selected using purposive sampling. The study was conducted from October 1, 2024, to September 30, 2025. Research instruments included the Overt Aggression Scale (OAS), Stress Test-5 (ST-5), drug relapse assessment form, missed appointment assessment form, follow-up evaluation form, focus group discussion guidelines, and in-depth interview guidelines. Data were analyzed using descriptive statistics and inferential statistics at a significance level of 0.05.

The findings revealed that the developed care system for substance abuse patients at high risk of violence in the community, named the "COMMUNITY Model," consisted of nine components: 1) Community Risk Screening and Early Warning Surveillance, 2) Mobile Outreach and Rapid Home Visits, 3) Continuous Symptom and Behavioral Monitoring, 4) Multidisciplinary Care Team, 5) Use of Google Maps and LINE Group for Patient Monitoring, 6) Family and Community Network Participation, 7) Individual Care Plan, 8) Treatment Continuity and 9) Empowering Families in Patient Care. Finally, the mean post-intervention assessment scores were significantly better than the pre-intervention scores ($p < .001$)

Keywords: Care System, Substance Use Disorder, High-Risk Violence, Community Mental Health

บทนำ

ปัญหาการใช้ยาและสารเสพติดเป็นปัญหาสาธารณสุขที่สำคัญของประเทศไทย และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ป่วยที่มีการใช้สารเสพติดชนิดกระตุ้นประสาท เช่น เมทแอมเฟตามีน ซึ่งอาจส่งผลต่อพฤติกรรมก้าวร้าว หวาดระแวง และเสี่ยงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน ทั้งต่อครอบครัว บุคคลรอบข้าง และสังคมโดยรวม องค์กรอนามัยโลก เปิดเผยเกี่ยวกับโรคทางจิตเวช (Mental Health Disorder) ในปี พ.ศ. 2562 พบว่า ในประชากร 8 คน จะพบผู้ที่มีโรคทางจิตเวช 1 คน หรือประชากร 970 ล้านคน ทั่วโลกอาศัยอยู่ร่วมกับผู้ป่วยจิตเวช ซึ่งมีความผิดปกติทางด้านความคิด อารมณ์และพฤติกรรม นอกจากนี้ ยังพบว่าผู้ป่วยจิตเวชเรื้อรังกลุ่มเสี่ยงมักขาดโอกาสการสนับสนุนจากสังคม ความเหลื่อมล้ำและความไม่สามารถเข้าถึงบริการทางด้านสุขภาพจิตในชุมชน ซึ่งปัญหาสุขภาพจิตไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อผู้ป่วยเองยังส่งผลกระทบต่อครอบครัว ญาติ หรือแม้แต่ในชุมชน อาจนำไปสู่ผลกระทบปัญหาในด้านอื่นๆ มากขึ้น เช่น ปัญหาผู้ป่วยจิตเวชก่อความรนแรงในชุมชน ซึ่งอาจก่อให้เกิดคามเสียหายเป็นวงกว้างมากขึ้น [1]

สำหรับสถานการณ์ปัญหาสุขภาพจิตในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากรายงานศูนย์วิจัยและสารสนเทศโรคซึมเศร้า พบว่า ปีพ.ศ. 2565 มีจำนวนผู้ป่วยโรคซึมเศร้าคาดการณ์ประมาณ 1.36 ล้านคน และข้อมูลจากศูนย์เฝ้าระวังการฆ่าตัวตายของโรงพยาบาลจิตเวชขอนแก่นราชนครินทร์ รายงานสถานการณ์ฆ่าตัวตายในประเทศไทย พบว่า ปี พ.ศ. 2562 - 2564 มีอัตราการฆ่าตัวตายสำเร็จ ยังเพิ่มสูงขึ้นเป็น 7.38 ต่อแสนประชากร นอกจากปัญหาสุขภาพจิตอัตราการฆ่าตัวตายที่เพิ่มขึ้นยังพบปัญหาผู้ป่วยจิตเวชที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรง (Serious Mental Illness with High Risk to Violence: SMI-V) ปี พ.ศ. 2566 จากสถิติพบว่ามีผู้ป่วยจิตเวชที่มีความเสี่ยงสูงต่อความรุนแรงใหม่ จำนวน 871 คน [2]

ปัญหาดังกล่าวมีความเชื่อมโยงอย่างใกล้ชิดกับการใช้ยาเสพติด โดยเฉพาะสารกระตุ้นประสาท เช่น เมทแอมเฟตามีน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อระบบประสาทและสมอง ทำให้เกิดอาการหวาดระแวง หูแว่ว อารมณ์แปรปรวน ขาดการควบคุมตนเอง และเพิ่มความเสี่ยงต่อพฤติกรรมก้าวร้าวรุนแรง ผู้ใช้ยาเสพติดบางรายอาจพัฒนาไปสู่ภาวะจิตเวชจากสารเสพติด (Substance-Induced Psychosis) ซึ่งส่งผลให้เกิดอันตรายต่อตนเอง ครอบครัว และชุมชน อีกทั้งยังมีโอกาสกลับไปใช้สารเสพติดซ้ำสูง หากขาดระบบการดูแลต่อเนื่องและการติดตามในชุมชนอย่างเหมาะสม

ข้อมูลจากกรมสุขภาพจิต ระบุว่า ในปี พ.ศ. 2564 ประเทศไทยมีผู้ใช้สารเสพติดประมาณ 1.4 ล้านคน แบ่งเป็นผู้ใช้สารเสพติด 1.1 ล้านคน และผู้ติดสารเสพติดประมาณ 320,000 คน ในจำนวนนี้ เข้าสู่ระบบการบำบัดของกรมสุขภาพจิต จำนวน 24,196 คน และพบว่าเป็นผู้ป่วยจิตเวชจากสารเสพติดรุนแรงจำนวน 5,757 คน รวมถึงมีผู้ป่วยจิตเวชยาเสพติดที่เสี่ยงต่อการก่อความรุนแรง (SMI-V) จำนวน 577 คน นอกจากนี้ ยังพบว่าผู้ป่วยยาเสพติดที่มีอาการทางจิตเวชก่อเหตุรุนแรงในสังคมเพิ่มขึ้นถึง 3.92 เท่า โดยในปี 2561 มีผู้ก่อเหตุรุนแรงจำนวน 267 ราย ส่วนใหญ่เป็นเพศชาย และลักษณะการก่อเหตุที่พบบ่อย ได้แก่ การทำร้ายตนเองและผู้อื่น การทำร้ายผู้อื่นจนเสียชีวิต และการทำลายทรัพย์สิน ขณะเดียวกันงานวิจัยล่าสุดเกี่ยวกับปัจจัยทำนายความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในผู้ป่วยยาและสารเสพติด ซึ่งศึกษาจากผู้ป่วยจำนวน 4,507 ราย พบว่า การใช้สารกระตุ้นประสาท กัญชา และสุรา มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับความเสี่ยงต่อการก่อความรุนแรง โดยเฉพาะผู้ใช้สารกระตุ้นประสาทมีโอกาสเกิดพฤติกรรมรุนแรงมากกว่ากลุ่มอื่นกว่า 3 เท่า [3]

ผู้ป่วยจิตเวชที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรง (SMI-V) หมายถึง ผู้ป่วยโรคจิตเวชรุนแรงที่ได้รับการประเมินว่ามีความเสี่ยงต่อการทำร้ายตนเองหรือผู้อื่น และจำเป็นต้องได้รับการเฝ้าระวังอย่างใกล้ชิดในชุมชน อย่างไรก็ตามการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้น ผู้ป่วยยาเสพติดที่ได้รับการคัดกรองว่ามีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรง โดยใช้แบบประเมิน Overt Aggression Scale (OAS) ตั้งแต่ 1 คะแนนขึ้นไป ร่วมกับการประเมินของทีมสหวิชาชีพ แม้ว่าผู้ป่วยกลุ่มนี้จะไม่ใช่ผู้ป่วย SMI โดยตรง แต่ผู้ใช้สารกระตุ้นประสาทอาจเกิดอาการทางจิตและพฤติกรรมก้าวร้าวที่มีลักษณะใกล้เคียงกับ SMI-V จึงจำเป็นต้องได้รับการดูแลและติดตามอย่างต่อเนื่องในชุมชน ผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรง มักเผชิญปัญหาการเข้าถึงบริการสุขภาพที่ล่าช้า ขาดการรักษาต่อเนื่อง และขาดระบบติดตามดูแลหลังจำหน่ายอย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ผู้ป่วยจำนวนมากขาดยา ไม่มารับการรักษาตามนัด และกลับไปใช้สารเสพติดซ้ำ จนนำไปสู่อาการกำเริบทางจิตเวชและพฤติกรรมก้าวร้าวรุนแรงในชุมชน โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ใช้สารกระตุ้นประสาท เช่น เมทแอมเฟตามีน ซึ่งมีผลต่อระบบประสาท ทำให้เกิดอาการหวาดระแวง หูแว่ว อารมณ์แปรปรวน และขาดการควบคุมตนเอง นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยสำคัญที่เป็นอุปสรรคต่อการดูแลผู้ป่วยจิตเวชและยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน ได้แก่ การเข้าถึงบริการที่ไม่ต่อเนื่อง การขาดการติดตามเชิงรุกในชุมชน การประสานงานระหว่างหน่วยงานที่ยังไม่ครอบคลุม รวมถึงข้อจำกัดด้านบุคลากรและระบบเฝ้าระวังในระดับพื้นที่ ส่งผลให้ผู้ป่วยจำนวนหนึ่งหลุดจากระบบการรักษาและกลับไปก่อเหตุรุนแรงซ้ำ [4] เนื่องจากขาดแรงสนับสนุนจากครอบครัวและชุมชน รวมทั้งขาดระบบติดตามต่อเนื่องหลังจำหน่าย ส่งผลให้เกิดอาการกำเริบและเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดพฤติกรรมรุนแรง [5] แม้ว่าจะมีงานวิจัยเกี่ยวกับการดูแลผู้ป่วย SMI-V หลายการศึกษา แต่ยังไม่พบรูปแบบที่บูรณาการการติดตามเชิงรุก เทคโนโลยีดิจิทัล และการมีส่วนร่วมของเครือข่ายชุมชน

ดังนั้น การพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน จึงจำเป็นต้องอาศัยการบูรณาการการทำงานร่วมกันของทีมสหวิชาชีพ ครอบครัว ชุมชน และเครือข่ายสุขภาพในพื้นที่ โดยเน้นการคัดกรองเชิงรุก การติดตามต่อเนื่อง การเฝ้าระวังสัญญาณเตือน และการเสริมพลังครอบครัว เพื่อป้องกันการกลับไปใช้สารเสพติดซ้ำ ลดพฤติกรรมรุนแรง และส่งเสริมให้ผู้ป่วยสามารถดำรงชีวิตอยู่ในชุมชนได้อย่างปลอดภัยและยั่งยืน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสถานการณ์การดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน
2. เพื่อพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน
3. เพื่อศึกษาประสิทธิผลของระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. รูปแบบการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) และใช้กระบวนการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วม (Participatory Action Research: PAR) เฉพาะในระยะการพัฒนารูปแบบ เพื่อให้ผู้เกี่ยวข้อง ได้แก่ ผู้ป่วย ผู้ดูแล อสม. ผู้นำชุมชน และบุคลากรสุขภาพ มีส่วนร่วมในการวิเคราะห์ปัญหา วางแผน ดำเนินการ และสะท้อนผลการดำเนินงาน

2. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

การศึกษาครั้งนี้คัดเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive sampling) จากผู้ป่วยยาเสพติดที่ได้รับการคัดกรองว่ามีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชนตามเกณฑ์ที่กำหนด และเป็นผู้ที่อยู่ในพื้นที่ดำเนินการวิจัย โดยไม่ได้ใช้การคำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่าง เนื่องจากเป็นการวิจัยและพัฒนาระบบบริการในพื้นที่เฉพาะ และใช้กลุ่มเป้าหมายทั้งหมดที่เข้าเกณฑ์ในช่วงเวลาการศึกษา ซึ่งแบ่งกลุ่มตัวอย่างเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1) กลุ่มผู้ป่วยผู้ป่วยยาเสพติดที่ได้รับการวินิจฉัยว่ามีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรง จำนวน 70 คน ในกลุ่มผู้ป่วยที่เข้ารับการคัดกรองในชุมชนระหว่างวันที่ 1 มีนาคม – 30 กันยายน 2567 โดยใช้เกณฑ์คัดเข้าคือ (1) แบบประเมินก้าวร้าวรุนแรง ที่มีคะแนนตั้งแต่ 1 คะแนนขึ้นไป และ (2) ยินยอมเข้าร่วมโครงการ

2) กลุ่มผู้ดูแล คือญาติหรือผู้ดูแลหลักของผู้ป่วยได้รับการวินิจฉัยว่ามีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรง จำนวน 70 คน ในกลุ่มผู้ป่วยที่เข้ารับการคัดกรองในชุมชนระหว่างวันที่ 1 มีนาคม – 30 กันยายน 2567 โดยใช้เกณฑ์การคัดเข้าคือ (1) เป็นญาติสายตรง หรือเป็นผู้ดูแลหลัก (2) เป็นผู้ที่ดูแลผู้ป่วยมาแล้วอย่างน้อย 6 เดือน และ (3) ยินยอมเข้าร่วมโครงการ

3) กลุ่มบุคลากรเครือข่าย จำนวน 26 คน ประกอบด้วย แพทย์ประจำโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล (รพ.สต.) จำนวน 1 คน พยาบาลวิชาชีพ เจ้าหน้าที่โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล (รพ.สต.) จำนวน 5 คน อาสาสมัครสาธารณสุขประจำหมู่บ้าน (อสม.) จำนวน 10 คน ฝ่ายปกครอง ตำรวจ และผู้นำชุมชน จำนวน 10 คน

3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย

1) ส่วนที่ 1 แบบบันทึกข้อมูลผู้ป่วยและผู้ดูแล

2) ส่วนที่ 2 แนวทางการสนทนากลุ่มและการสัมภาษณ์เชิงลึก ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น

3) ส่วนที่ 3 ประเมินพฤติกรรมก้าวร้าวรุนแรง (Overt Aggression Scale: OAS) แบ่งคะแนนเป็น 3 คะแนน ได้แก่ (1) กึ่งเร่งด่วน (Semi-urgency) OAS = 1 คะแนน (2) เร่งด่วน (Urgency) OAS = 2 คะแนน (3) ฉุกเฉิน (Emergency) OAS = 3 คะแนน

4) ส่วนที่ 4 แบบประเมินความเครียด (Stress test questionnaires: ST-5) เป็นแบบประเมินอาการหรือความรู้สึกที่เกิดในระยะ 2-4 สัปดาห์ที่ผ่านมา จำนวน 5 ข้อคำถาม คะแนนเต็ม 15 คะแนน แบ่งเป็นคะแนน 4 คะแนน ได้แก่ (1) คะแนน 0 หมายถึง เป็นน้อยมากหรือแทบไม่มี (2) คะแนน 1 หมายถึง เป็นบางครั้ง (3) คะแนน 2 หมายถึง เป็นบ่อยครั้ง (4) คะแนน 3 หมายถึง เป็นประจำ มีการแปลผลดังนี้

คะแนน 0-4 ความเครียดน้อย

คะแนน 5-7 ความเครียดปานกลาง

คะแนน 8-9 ความเครียดมาก

คะแนน 10-15 ความเครียดมากที่สุด

5) แบบประเมินการใช้ยาเสพติดซ้ำ หรือการประเมินปัญหาสารเสพติด (Drug Abuse Screening Test: DAST-10) เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบพฤติกรรมการเสพยาในช่วง 1 ปีที่ผ่านมา โดยคำถามจะมุ่งเน้นไปที่การใช้ยาเกินความจำเป็น การสูญเสียการควบคุม และผลกระทบต่อชีวิต มีทั้งหมด 10 ข้อคำถาม แบ่งเป็นคะแนน 2 คะแนน คือ (1) ใช่ และ (2) ไม่ใช่ มีการแปลผล ดังนี้

คะแนน 0 คะแนน : ไม่พบปัญหาการใช้สารเสพติด

คะแนน 1-5 : ความเสี่ยงระดับปานกลาง (อาจมีพฤติกรรมเสพซ้ำ)

คะแนน 6 คะแนนขึ้นไป: ความเสี่ยงสูง/มีแนวโน้มติดยา

6) แบบประเมินการขาดนัด ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น มีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงพฤติกรรมแบบสองกลุ่ม ได้แก่ มาตามนัด และขาดนัด ผู้วิจัยตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือโดยการประเมินความตรงเชิงเนื้อหาจากผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน มีค่า IOC=1.00

7) แบบติดตามประเมินผล สำหรับบุคลากรผู้ปฏิบัติงาน ประกอบด้วย ด้านอาการทางจิต ด้านการกินยา ด้านผู้ดูแล/ ญาติ ด้านการทำกิจวัตรประจำวัน ด้านการประกอบอาชีพ ด้านสัมพันธภาพในครอบครัว ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านการสื่อสาร ด้านความสามารถในการเรียนรู้เบื้องต้น และด้านการใช้สารเสพติด (บุหรี่/สุรา/ยาเสพติด) แต่ละด้านประเมินความรุนแรงเป็น 3 ระดับ แบ่งระดับความรุนแรง 3 ระดับ ดังนี้

ระดับที่ 1 ปกติ/ ดี (คะแนน 10-15)

ระดับที่ 2 เสี่ยง/ ต้องเฝ้าระวัง (คะแนน 16-20)

ระดับที่ 3 มีปัญหา/ ต้องการความช่วยเหลือ (คะแนน 21-30)

4. การตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือ

การตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือด้านความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) โดยผู้วิจัยนำแบบสอบถามและแนวทางการสัมภาษณ์เชิงลึกที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน เพื่อตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) และความเหมาะสมของภาษาที่ใช้ (Wording) จากนั้นผู้เชี่ยวชาญจะประเมินค่าดัชนีความสอดคล้องของข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (Item Objective Congruence; IOC) โดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน พบว่าทุกข้อคำถามมีค่าดัชนีความสอดคล้อง มากกว่า 0.50

การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. ทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการการพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน โดยมีการประชุมทีมวิจัยเพื่อพัฒนาเครื่องมือให้เหมาะสมกับการดำเนินงานในชุมชน

2. หลังจากพัฒนาเครื่องมือ ทีมวิจัยส่งเครื่องมือให้ทีมผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบความถูกต้องของเนื้อหา โดยใช้ทีมผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 คน ที่มีความเชี่ยวชาญในการทำงานด้านการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน

3. ตรวจสอบความเชื่อมั่นของเครื่องมือ

4. ประชาสัมพันธ์ให้กลุ่มตัวอย่างเข้าร่วมโครงการ

5. ดำเนินการตามแผนปฏิบัติการที่กำหนดไว้ ดังนี้

5.1 ระยะประเมินสถานการณ์ ระยะนี้เป็นการประเมินสถานการณ์การการพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน โดยการสนทนากลุ่ม การสัมภาษณ์เจาะลึก มีกิจกรรมดังนี้ 1) การสนทนากลุ่มทำที่โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล 2) การสัมภาษณ์เจาะลึก ผู้ศึกษาเลือกผู้ให้ข้อมูลหลัก หรือผู้ถูกสัมภาษณ์เชิงลึก

5.2 ระยะพัฒนารูปแบบ ระยะนี้ถือเป็นการพัฒนา ตามขั้นตอนดังนี้ 1) ศึกษาแนวคิด ทฤษฎีการพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน และจากผลการประเมินสถานการณ์ใยระยะที่ 1 เพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน 2) ออกแบบกิจกรรมการพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน ร่วมกับกลุ่มตัวอย่างและเครือข่าย 3) กำหนดทีมที่เกี่ยวข้องและบทบาทในการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน 4) พัฒนาศักยภาพผู้ดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรง 5) นำรูปแบบที่พัฒนาไปใช้ โดยทำการชี้แจงกลุ่มเป้าหมายที่เกี่ยวข้อง

5.3 ระยะประเมินผล เป็นการติดตามประเมินผลการดำเนินงานโครงการ โดยการเยี่ยมบ้านและมีการประชุมระดมสมองและสะท้อนคิด ซึ่งผู้ศึกษาได้นำเสนอผลการติดตามเยี่ยมบ้านและสัมภาษณ์ผู้ร่วมศึกษา สรุปจากการนำรูปแบบไปใช้จริงกับกลุ่มตัวอย่าง

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ การแจกแจงความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ใช้วิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง

2. สถิติเชิงอนุมาน ใช้สถิติ Paired t-test เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยก่อนและหลังการใช้รูปแบบการดูแล โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 พร้อมรายงานค่าขนาดอิทธิพล (Effect Size: Cohen's d) และช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (95% Confidence Interval; 95% CI)

การพิทักษ์สิทธิ์กลุ่มตัวอย่าง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตระหนักถึงหลักความปลอดภัย การยอมรับในความเป็นบุคคลของผู้ให้ข้อมูล เพื่อขออนุญาตในการเก็บข้อมูลผู้วิจัยได้อธิบายถึง วัตถุประสงค์ของการศึกษาและขอความยินยอมจากกลุ่มตัวอย่างเป็นลายลักษณ์อักษรผ่านแบบฟอร์มให้ความยินยออม (Informed consent form) และกลุ่มตัวอย่างสามารถแจ้งยุติก่อนสิ้นสุดการศึกษาได้ตลอดเวลาและข้อมูลทุกอย่างจะถูกปิดเป็นความลับ ผลการวิจัยจะถูกนำเสนอในภาพรวมเพื่อใช้ประโยชน์สำหรับการศึกษา หากมีข้อสงสัยสามารถติดต่อผู้วิจัยได้ตลอดเวลา ทั้งนี้ได้เสนอขอรับรองจริยธรรมโครงการวิจัยจาก สยบช. เลขที่ 006/2567 ลงวันที่ 13 กพ. 2567 และใช้ Chat GPT เพื่อช่วยในการ Generative Artificial Intelligence ภาพรูปแบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. สถานการณ์การดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน

ข้อมูลทั่วไป

ข้อมูลทั่วไปของผู้ป่วย พบว่าส่วนใหญ่เป็นเพศชาย จำนวน 63 คน คิดเป็นร้อยละ 90.00 มีอายุเฉลี่ย 37.49 ปี (S.D.= 9.74) ส่วนใหญ่มีอายุระหว่าง 30-40 ปี ร้อยละ 60.00 และส่วนใหญ่มีสถานะภาพโสด จำนวน 32 คน คิดเป็นร้อยละ 45.71

ข้อมูลทั่วไปของผู้ดูแล พบว่าส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง จำนวน 58 คน คิดเป็นร้อยละ 82.85 มีอายุเฉลี่ย 58.68 ปี (S.D.= 8.86) ส่วนใหญ่มีอายุระหว่าง 50-60 ปี ร้อยละ 64.28 และผู้ดูแลส่วนใหญ่เป็นบิดามารดา จำนวน 56 คน คิดเป็นร้อยละ 80.00

ผลการประเมินพฤติกรรมก้าวร้าวรุนแรง (Overt Aggression Scale: OAS) พบว่า พฤติกรรมก้าวร้าวรุนแรงต่อตนเอง จำนวน 12 คน คิดเป็นร้อยละ 17.14 พฤติกรรมก้าวร้าวรุนแรงต่อคนอื่นทั้งคำพูดและการแสดงออกจำนวน 70 คน คิดเป็นร้อยละ 100.00 และพฤติกรรมก้าวร้าวรุนแรงต่อทรัพย์สิน จำนวน 22 คน คิดเป็นร้อยละ 31.42

ผลการประเมินความเครียด (ST-5) พบว่าผู้ป่วยส่วนใหญ่มีความเครียดอยู่ระบบปานกลาง จำนวน 44 คน คิดเป็นร้อยละ 62.85 รองลงมาคือระดับน้อย จำนวน 24 คน คิดเป็นร้อยละ 32.28 ส่วนผู้ดูแลส่วนใหญ่มีความเครียดระดับมาก จำนวน 59 คน คิดเป็นร้อยละ 84.28 รองลงมาคือระดับปานกลาง จำนวน 7 คน คิดเป้นร้อยละ 10.00 ตามลำดับ

ผลการประเมินการใช้ยาเสพติดซ้ำ หรือการประเมินปัญหาสารเสพติด (DAST-10) พบว่าส่วนใหญ่มีความเสี่ยงระดับปานกลาง (อาจมีพฤติกรรมเสพซ้ำ) จำนวน 42 คน คิดเป็นร้อยละ 60.00 รองลงมาคือมีความเสี่ยงสูง/มีแนวโน้มติดยา จำนวน 12 คน คิดเป็นร้อยละ 17.14

ผลการประเมินการขาดนัด พบว่า ผู้ป่วยส่วนใหญ่มีการขาดนัดจำนวน 38 คน คิดเป็นร้อยละ 54.28 การติดตามประเมินผล สำหรับบุคลากรผู้ปฏิบัติงานในการติดตามผู้ป่วย พบว่าผู้ป่วยส่วนใหญ่อยู่ในระดับเสี่ยง/เฝ้าระวัง จำนวน 42 คน คิดเป็นร้อยละ 60.00 รองลงมาคือระดับมีปัญหา/ต้องการความช่วยเหลือจำนวน 12 คน คิดเป็นร้อยละ 17.14

2. การพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน

การพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน มีระบบติดตามประเมินผลอย่างต่อเนื่องทีมเจ้าหน้าที่และทีมสหวิชาชีพที่เกี่ยวข้อง ร่วมกับการพัฒนาแนวทางสนับสนุนการดูแลสุขภาพอย่างต่อเนื่อง พัฒนาช่องทางการส่งต่อและเชื่อมโยงกับเครือข่ายด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วม (Participatory Action Research) พร้อมทั้งแบ่งออกเป็น 3 ปฏิบัติการ ดังนี้

ปฏิบัติการที่ 1: การสร้างความตระหนักถึงการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชนเพื่อร่วมกันหาแนวทางแก้ไข การดูแลต่อเนื่องกลุ่มผู้ป่วยยาเสพติดแก่ผู้ดูแลหลัก จำนวน 30 ครอบครัว และอาสาสมัครสาธารณสุขประจำหมู่บ้าน จำนวน 10 คน ร่วมกับพยาบาลวิชาชีพและเจ้าหน้าที่ประจำโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลจำนวน 5 คน และทีมผู้นำชุมชน จำนวน 10 คน ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้ศึกษาสภาพปัญหาของการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน ร่วมกับการทบทวนแนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำไปสู่การวางแผนในการแก้ไขปัญหาร่วมกับทีมแกนนำทางสุขภาพในเขตพื้นที่ในชุมชน โดยการจัดอบรมเชิงปฏิบัติการระดมความคิดของทีมผู้ให้บริการ เพื่อเสนอประเด็นการทำงานการดูแลผู้ป่วย รวมทั้งครอบครัวและผู้ดูแล รวมทั้งการหาแนวทางการดำเนินงานอย่างมีส่วนร่วม ในขั้นตอนนี้สามารถทราบถึงสถานการณ์ ในการนำมาวางแผนการแก้ไขและพัฒนารูปแบบได้

ปฏิบัติการ 2 : การพัฒนาทักษะของผู้ปฏิบัติงานในการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน ประกอบด้วย 1) การพัฒนาทักษะของสมาชิกครอบครัวในการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน การพัฒนาทักษะของอาสาสมัครสาธารณสุขประจำหมู่บ้าน (อสม.) เกี่ยวกับการประเมินผู้ป่วยเบื้องต้นที่มีภาวะฉุกเฉิน การส่งต่อและการประสานงานกับเจ้าหน้าที่ประจำโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล ได้มีการประสานงานกับแม่ข่ายโรงพยาบาล ในการใช้ระบบให้คำปรึกษาเป็นรายผู้ป่วยที่มีปัญหา

ปฏิบัติการ 3 : การปฏิบัติงาน ซึ่งในขั้นตอนนี้เป็นการเสริมสร้างทักษะหลังจากการอบรมเชิงปฏิบัติการ การเยี่ยมบ้าน การประเมินภาวะสุขภาพของผู้ป่วย และการดูแลของทีมสหวิชาชีพ ร่วมกับกระบวนการเสริมพลังอำนาจแก่ผู้ป่วย ผู้ดูแล

และอาสาสมัครสาธารณสุข (อสม.) โดยการมีส่วนร่วมของทีมเจ้าหน้าที่ มีการกำหนดเป้าหมายสร้างแนวทางพัฒนาเพื่อเกิดการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชนอย่างต่อเนื่อง

ผู้วิจัยได้เพิ่มเติมผลการวิจัยเชิงคุณภาพจากการสนทนากลุ่มและการสัมภาษณ์เชิงลึก เพื่อสะท้อนสถานการณ์ปัญหา กระบวนการพัฒนาระบบ และปัจจัยที่สนับสนุนความสำเร็จของ COMMUNITY Model เพื่อให้ผลการศึกษาเชิงปริมาณมีความสมบูรณ์และอธิบายบริบทของพื้นที่ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์สถานการณ์ปัญหาและความต้องการในการพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน จากการสนทนากลุ่มและการสัมภาษณ์เชิงลึก

ประเด็นหลัก (Theme)	ประเด็นย่อย (Category)	ข้อค้นพบสำคัญ (Findings)	ตัวอย่างคำกล่าว (Quotation)
การเข้าถึงบริการ	ขาดนัดรักษา	ผู้ป่วยจำนวนมากขาดการรักษาต่อเนื่อง	"ผู้ป่วยบางรายหายไปหลายเดือน ไม่มารับยา"
การดูแลในครอบครัว	ขาดทักษะผู้ดูแล	ผู้ดูแลไม่มั่นใจในการรับมืออาการกำเริบ	"เวลาเขาเริ่มอาละวาด ไม่รู้จะทำอย่างไร"
ระบบบริการ	การประสานงาน	การส่งต่อระหว่างหน่วยงานไม่ต่อเนื่อง	"แต่ละหน่วยงานทำงานแยกกัน"
การใช้เทคโนโลยี	ระบบติดตาม	ต้องการระบบติดตามผู้ป่วยแบบ Real-time	"ถ้ามี Line กลุ่ม จะติดตามผู้ป่วยได้เร็วขึ้น"

รูปแบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน สามารถพัฒนาระบบการดูแล “COMMUNITY Model” ประกอบด้วย 9 องค์ประกอบ ได้ดังนี้ 1) คัดกรองกลุ่มเสี่ยงในชุมชนและเฝ้าระวังสัญญาณเตือน (Community Screening) 2) ทีมเชิงรุกลงเยี่ยมบ้านและเข้าถึงผู้ป่วยรวดเร็ว (Outreach Service) 3) ติดตามอาการและพฤติกรรมต่อเนื่อง (Monitoring) 4) ทีมสหวิชาชีพร่วมวางแผนดูแล (Multidisciplinary Team) 5) ใช้ Google Map และ Line กลุ่มติดตามผู้ป่วย (Use Technology) 6) สร้างการมีส่วนร่วมของครอบครัว และฝ่ายปกครอง (Network Participation) 7) วางแผนดูแลรายบุคคล (Individual Care Plan) 8)ติดตามต่อเนื่องหลังจำหน่าย (Treatment Continuity) และ 9) เสริมพลังครอบครัวในการดูแลผู้ป่วย (Yielding Family Empowerment) ดังแผนภาพที่ 1



ภาพที่ 1 รูปแบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน

3. ประสิทธิผลของระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน

ผู้วิจัยดำเนินการใช้ COMMUNITY Model เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ โดยเริ่มจากการคัดกรองและจัดระดับความเสี่ยงของผู้ป่วย การจัดทำแผนดูแลรายบุคคล และการชี้แจงบทบาทของทีมเครือข่ายในชุมชน หลังจากนั้นทีมสหวิชาชีพร่วมกับ อสม. และผู้นำชุมชนดำเนินการเยี่ยมบ้านผู้ป่วยอย่างน้อยเดือนละ 1 ครั้ง รวม 3 ครั้งต่อราย และมีการติดตามอาการการกินยา การขาดนัด และสัญญาณเตือนผ่านโทรศัพท์หรือ Line group ทุก 2 สัปดาห์ รวม 6 ครั้งตลอดระยะดำเนินการ

ในกรณีที่พบผู้ป่วยมีสัญญาณเตือน เช่น ขาดยา ขาดนัด มีอาการหวาดระแวง หูแว่ว อารมณ์แปรปรวน กลับไปใช้สารเสพติดซ้ำ หรือมีพฤติกรรมก้าวร้าว ทีมเครือข่ายจะดำเนินการติดตามเชิงรุกภายใน 24–48 ชั่วโมง และประสานส่งต่อโรงพยาบาลหรือหน่วยบริการที่เกี่ยวข้องตามระดับความรุนแรง หลังครบ 12 สัปดาห์ ผู้วิจัยประเมินผลลัพธ์หลังการใช้รูปแบบด้วยแบบประเมิน OAS, ST-5, DAST-10 แบบประเมินการขาดนัด แบบประเมินความสามารถในการอยู่ร่วมในชุมชนอย่างปลอดภัย และแบบประเมินคุณภาพการติดตามดูแลต่อเนื่อง

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลการประเมินก่อนและหลังการใช้รูปแบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน พบว่าพฤติกรรมก้าวร้าวรุนแรง (OAS) ระดับความเครียดของผู้ป่วย (ST-5) ความเสี่ยงการกลับไปใช้สารเสพติดซ้ำ (DAST-10) การขาดนัดรักษา ความสามารถในการอยู่ร่วมในชุมชนอย่างปลอดภัย คุณภาพการติดตามดูแลต่อเนื่อง ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .001$) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลการประเมินก่อนและหลังการใช้รูปแบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน

ตัวแปรที่ศึกษา	ก่อนพัฒนา Mean (SD)	หลังพัฒนา Mean (SD)	t	Mean Difference (95% CI)	Effect Size	*P*-value
พฤติกรรมก้าวร้าวรุนแรง (OAS)	8.54 (2.31)	5.68 (2.12)	6.28	2.86 (1.95 to 3.77)	1.29	< .001*
ระดับความเครียดของผู้ป่วย (ST-5)	7.68 (1.92)	5.31 (1.71)	6.23	2.37 (1.61 to 3.13)	1.30	< .001*
ความเสี่ยงการกลับไปใช้สารเสพติดซ้ำ (DAST-10)	6.25 (1.73)	4.18 (1.58)	6.09	2.07 (1.39 to 2.75)	1.25	< .001*
การขาดนัดรักษา	2.15 (0.88)	1.04 (0.71)	5.66	1.11 (0.72 to 1.50)	1.39	< .001*
ความสามารถในการอยู่ร่วมในชุมชนอย่างปลอดภัย	2.84 (0.71)	3.69 (0.69)	-5.74	-0.85 (-1.15 to -0.55)	1.21	< .001*
คุณภาพการติดตามดูแลต่อเนื่อง	2.97 (0.69)	4.08 (0.61)	-6.12	-1.11 (-1.47 to -0.75)	1.70	< .001*

* p-value < 0.05

สรุปและอภิปรายผล

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) เพื่อศึกษาสถานการณ์การดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน พัฒนาระบบการดูแลและประเมินประสิทธิผลของระบบที่พัฒนาขึ้น โดยสามารถอภิปรายผลตามวัตถุประสงค์การวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาสถานการณ์การดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน ผลการศึกษาพบว่า ผู้ป่วยส่วนใหญ่เป็นเพศชาย อายุเฉลี่ย 37.49 ปี และมีสถานภาพโสด ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของกรมสุขภาพจิต [6] ที่พบว่าผู้ป่วยจิตเวชจากสารเสพติดและผู้ป่วยกลุ่มเสี่ยงต่อการก่อความรุนแรงส่วนใหญ่เป็นเพศชายวัยทำงาน เนื่องจากเป็นกลุ่มที่มีโอกาสเข้าถึงสารเสพติดสูง และมีปัจจัยด้านสังคม เศรษฐกิจ และความเครียดจากการดำรงชีวิตเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยเฉพาะผู้ที่ขาดบทบาททางครอบครัวหรือขาดแรงสนับสนุนทางสังคม จะมีความเสี่ยงต่อการเกิดพฤติกรรมก้าวร้าวและการกลับไปใช้สารเสพติดซ้ำสูงกว่ากลุ่มอื่น

ผลการประเมินพฤติกรรมก้าวร้าวรุนแรง (OAS) พบว่าผู้ป่วยทุกคนมีพฤติกรรมก้าวร้าวต่อผู้อื่นทั้งทางคำพูดและการแสดงออก สะท้อนให้เห็นว่าผู้ป่วยยาเสพติดที่มีภาวะเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรง มักมีปัญหาด้านการควบคุมอารมณ์และพฤติกรรม ซึ่งอาจสัมพันธ์กับผลของสารเสพติดต่อระบบประสาท โดยเฉพาะสารกระตุ้นประสาท เช่น เมทแอมเฟตามีน ที่ส่งผลให้เกิดอาการหวาดระแวง หูแว่ว และพฤติกรรมก้าวร้าว สอดคล้องกับการศึกษาของ Thumwong, Kanato .[7] ที่พบว่าผู้ป่วยจิตเวชจากสารเสพติดมีความเสี่ยงต่อการก่อความรุนแรงมากกว่าประชากรทั่วไปหลายเท่า และหากขาดการรักษาต่อเนื่องจะเพิ่มโอกาสเกิดเหตุรุนแรงในชุมชน

นอกจากนี้ ผลการศึกษายังพบว่าผู้ป่วยส่วนใหญ่มีความเครียดระดับปานกลาง ขณะที่ผู้ดูแลมีความเครียดระดับมาก ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรง ส่งผลกระทบต่อภาระทางอารมณ์และจิตใจของผู้ดูแลอย่างชัดเจน สอดคล้องกับแนวคิด Caregiver Burden ของ Zarit, Reever, and Bach-Peterson[8] ที่อธิบายว่าผู้ดูแลผู้ป่วยจิตเวชและผู้ป่วยติดสารเสพติดมักเกิดความเหนื่อยล้าทางอารมณ์ ความวิตกกังวล และความเครียดจากการเผชิญพฤติกรรมที่ไม่แน่นอนของผู้ป่วย

ผลการประเมิน DAST-10 และการขาดนัดรักษา พบว่าผู้ป่วยส่วนใหญ่ยังมีความเสี่ยงต่อการกลับไปใช้สารเสพติดซ้ำและมีปัญหาการขาดนัดสูง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Marlatt and Donovan[9] ที่ระบุว่า ผู้ป่วยติดสารเสพติดที่ขาดการติดตามต่อเนื่อง ขาดแรงสนับสนุนจากครอบครัว และยังอยู่ในสิ่งแวดล้อมเดิมที่เอื้อต่อการใช้สาร จะมีโอกาสกลับไปใช้สารเสพติดซ้ำสูง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ นันท์พญาน์ พิมพ์บุตร และนิตยา ฤทธิ์ศรี [10] ที่พบว่าการขาดนัดรักษาในผู้ป่วยยาเสพติดสัมพันธ์กับการกลับไปใช้สารเสพติดซ้ำและการเกิดอาการกำเริบทางจิตเวช

ดังนั้น สถานการณ์ที่พบจากการศึกษาสะท้อนให้เห็นว่าการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน ยังมีข้อจำกัดด้านการติดตามต่อเนื่อง การเฝ้าระวังอาการเตือน และการมีส่วนร่วมของครอบครัวและชุมชน จึงจำเป็นต้องพัฒนาระบบการดูแลที่มีความต่อเนื่องและเชื่อมโยงเครือข่ายในพื้นที่อย่างเป็นระบบ

2. การพัฒนาระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน ผลการศึกษาพบว่าการพัฒนาระบบการดูแล “COMMUNITY Model” ซึ่งประกอบด้วย 9 องค์ประกอบ สามารถพัฒนาให้เหมาะสมกับบริบทชุมชนได้ ทั้งนี้เนื่องจากผู้วิจัยใช้กระบวนการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วม (Participatory Action Research: PAR) ที่เปิดโอกาสให้ผู้เกี่ยวข้องทุกภาคส่วน ได้แก่ ผู้ดูแล อาสาสมัครสาธารณสุข ผู้นำชุมชน และบุคลากรสุขภาพ ได้ร่วมกันวิเคราะห์ปัญหา วางแผน ดำเนินการ และประเมินผลอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองต่อปัญหาและความต้องการของพื้นที่ได้จริง ผลการศึกษาสอดคล้องกับแนวคิดของ Kemmis and McTaggart [11] ที่อธิบายว่ากระบวนการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบวงรอบ ช่วยให้เกิดการเรียนรู้ร่วมกันและนำไปสู่การพัฒนาระบบงานที่เหมาะสมกับบริบทจริง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของStringer[12] ที่พบว่าการมีส่วนร่วมของชุมชนในการแก้ปัญหาสุขภาพ จะช่วยให้เกิดความร่วมมือ ความต่อเนื่อง และความยั่งยืนของระบบบริการสุขภาพในพื้นที่

ผลการศึกษาที่พบว่าการใช้เทคโนโลยี เช่น Google Map และ Line Group สามารถช่วยติดตามผู้ป่วยได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับแนวคิด Digital Health ของ World Health Organization[13] ที่สนับสนุนการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในการเชื่อมโยงระบบบริการสุขภาพ โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ป่วยเรื้อรังและผู้ป่วยจิตเวช เพื่อเพิ่มการเข้าถึงบริการและลดการหลุดจากระบบรักษา นอกจากนี้การที่ระบบมีองค์ประกอบด้านการเสริมพลังครอบครัว (Family Empowerment) และการมีส่วนร่วมของเครือข่ายชุมชน ยังสอดคล้องกับแนวคิด Recovery Model ที่มุ่งเน้นการฟื้นฟูศักยภาพของผู้ป่วยผ่านแรงสนับสนุนจากครอบครัวและชุมชน เพื่อให้ผู้ป่วยสามารถดำรงชีวิตอยู่ในสังคมได้อย่างมีคุณค่าและปลอดภัย [14]

การลดลงของพฤติกรรมก้าวร้าวอาจเกิดจากการที่ COMMUNITY Model เน้นการคัดกรองเชิงรุก การเยี่ยมบ้านอย่างต่อเนื่อง และการติดตามการรับประทานยาร่วมกับการเฝ้าระวังอาการเตือนผ่านเครือข่ายชุมชน ทำให้สามารถค้นหาผู้ป่วยที่เริ่มมีอาการกำเริบได้รวดเร็ว ลดการขาดยา ลดการกลับไปใช้สารเสพติดซ้ำ และลดความรุนแรงของอาการทางจิต ส่งผลให้พฤติกรรมก้าวร้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Drake et al [15] และ WHO [1] อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาครั้งนี้แตกต่างจากการศึกษาของ Penzenstadler, Soares, Anci, Molodynski, & Khazaal [18] ซึ่งไม่พบความแตกต่างของพฤติกรรมก้าวร้าวหลังการติดตามในชุมชน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการศึกษาดังกล่าวใช้เพียงการติดตามทาง

โทรศัพท์ ขณะที่ COMMUNITY Model มีการเยี่ยมบ้านเชิงรุก การประเมินซ้ำโดยทีมสหวิชาชีพ และการมีส่วนร่วมของครอบครัวอย่างต่อเนื่อง จึงอาจทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีกว่า

3. ประสิทธิผลของระบบการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน ผลการศึกษาพบว่า หลังการใช้ “COMMUNITY Model” ผู้ป่วยมีพฤติกรรมก้าวร้าวรุนแรงลดลง ระดับความเครียดลดลง ความเสี่ยงต่อการกลับไปใช้สารเสพติดซ้ำลดลง และการขาดนัดรักษาลดลง ขณะที่ความสามารถในการอยู่ร่วมในชุมชนอย่างปลอดภัยและคุณภาพการติดตามดูแลต่อเนื่องเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value < .001) ผลการศึกษาดังกล่าวอาจอธิบายได้ว่าการดูแลเชิงรุกในชุมชนร่วมกับการติดตามอย่างต่อเนื่อง ช่วยให้สามารถค้นหาปัญหาและเข้าถึงผู้ป่วยได้รวดเร็ว ลดการขาดยาและลดโอกาสเกิดอาการกำเริบ สอดคล้องกับการศึกษาของ Drake et al. [15] ที่พบว่าระบบการดูแลผู้ป่วยจิตเวชและผู้ติดสารเสพติดแบบบูรณาการในชุมชน สามารถลดการกลับเข้ารักษาซ้ำและลดพฤติกรรมรุนแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ผลการศึกษาที่พบว่าความสามารถในการอยู่ร่วมในชุมชนอย่างปลอดภัยเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับแนวคิด Community Reinforcement Approach (CRA) ของ Meyers and Smith[16] ที่เน้นการเสริมสร้างสิ่งแวดล้อมทางสังคมเชิงบวก เพื่อช่วยให้ผู้ป่วยลดพฤติกรรมเสี่ยงและสามารถกลับมาใช้ชีวิตในชุมชนได้อย่างเหมาะสม ขณะเดียวกันการที่คุณภาพการติดตามดูแลต่อเนื่องดีขึ้น สะท้อนให้เห็นว่าการมีส่วนร่วมของครอบครัว อสม. และเครือข่ายสุขภาพในพื้นที่ มีบทบาทสำคัญต่อความต่อเนื่องของการรักษา สอดคล้องกับการศึกษาของ Test and Stein[17] เกี่ยวกับ Assertive Community Treatment (ACT) ที่ระบุว่า การติดตามเชิงรุกโดยทีมสหวิชาชีพในชุมชน ช่วยลดการหลุดจากระบบรักษาและเพิ่มคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยจิตเวชเรื้อรังได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น ผลการศึกษาครั้งนี้จึงสะท้อนให้เห็นว่า “COMMUNITY Model” เป็นระบบการดูแลที่มีประสิทธิภาพในการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน เนื่องจากเป็นระบบที่เน้นการมีส่วนร่วมของครอบครัว ชุมชน และเครือข่ายสุขภาพ ร่วมกับการติดตามเชิงรุกและการใช้เทคโนโลยีในการดูแลอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ผู้ป่วยได้รับการดูแลอย่างเหมาะสม ลดพฤติกรรมรุนแรง ลดการกลับไปใช้สารเสพติดซ้ำ และสามารถดำรงชีวิตอยู่ในชุมชนได้อย่างปลอดภัยและยั่งยืน

ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะจากการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการวิจัยแบบกลุ่มเดียววัดก่อนหลัง ดำเนินการในพื้นที่ชุมชนเพียงแห่งเดียวและใช้กลุ่มตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจง จึงอาจมีข้อจำกัดในการอ้างอิงผลไปยังบริบทพื้นที่อื่น นอกจากนี้ระยะเวลาการติดตามผลยังเป็นระยะสั้น ทำให้ยังไม่สามารถสะท้อนผลลัพธ์ด้านความยั่งยืนของระบบการดูแลในระยะยาวได้อย่างชัดเจน

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. หน่วยบริการสุขภาพควรนำ “COMMUNITY Model” ไปประยุกต์ใช้ในการดูแลผู้ป่วยยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงในชุมชน โดยเน้นการมีส่วนร่วมของครอบครัว ชุมชน และเครือข่ายสุขภาพอย่างต่อเนื่อง

2. ควรพัฒนาศักยภาพของผู้ดูแล อาสาสมัครสาธารณสุข และบุคลากรเครือข่าย ให้มีทักษะในการเฝ้าระวังอาการเตือน การติดตามผู้ป่วย และการจัดการภาวะเสี่ยงในชุมชน

3. ควรสนับสนุนการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ เช่น Line Group หรือระบบติดตามออนไลน์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามผู้ป่วย การสื่อสาร และการส่งต่อข้อมูลระหว่างเครือข่ายบริการสุขภาพ

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรศึกษาประสิทธิผลของ “COMMUNITY Model” ในพื้นที่หรือบริบทอื่น เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์และประเมินความเหมาะสมของรูปแบบในระดับที่กว้างขึ้น

2. ควรมีการศึกษาติดตามผลระยะยาว เพื่อประเมินความยั่งยืนของระบบการดูแล โดยเฉพาะการลดการกลับไปใช้สารเสพติดซ้ำและการลดพฤติกรรมก้าวร้าวรุนแรงในชุมชน

เอกสารอ้างอิง

1. World Health Organization. Mental disorders. [internet]. 2022 [cited 2026, Fab 13]. Available from: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders
2. กรมสุขภาพจิต. มาตรฐานการปฏิบัติงานการดูแลผู้ป่วยจิตเวชและยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรง. นนทบุรี: กระทรวงสาธารณสุข. 2566. 48.
3. สิริยาภรณ์ บรรณสิทธิ์, รวินันท์ โสมา. ปัจจัยทำนายความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรง (SMI-V) ในผู้ป่วยยาและสารเสพติด: การศึกษาย้อนหลังในสถาบันบำบัดรักษาและฟื้นฟูผู้ติดยาเสพติดแห่งชาติบรมราชชนนี. วารสารสาธารณสุขและวิทยาศาสตร์สุขภาพ. 2569. 9(1): 74-85. https://he02.tci-thaijo.org/index.php/tjph/article/view/278377/190511
4. ขัติยา แก้วสมบัติ, อิศรา ขุนพิลึก, ชินกร สุจิมงคล, อัญชลี วิจิตรปัญญา. การวิเคราะห์บริบทของปัจจัยที่เอื้อและเป็นอุปสรรคต่อการจัดบริการสุขภาพจิต ระดับชุมชน สำหรับผู้ป่วยจิตเวชและยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรง: การศึกษาแบบผสานวิธีในหลายระดับ. 2567. 17(3): 157-171. https://he02.tci-thaijo.org/index.php/RDHSJ/article/view/270774
5. ทิพย์วิมล ตั้งชูทวีทรัพย์, พุทธิพร พงศ์นันทกุลกิจ, สุภาพ ขวัญพูล. การพัฒนารูปแบบการดูแลผู้ป่วยจิตเวชใช้สารเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงโดยกระบวนการมีส่วนร่วมของภาคีเครือข่าย จังหวัดจันทบุรี. 2568. 26(2): 290-299. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/JRTAN/article/view/276597/188268
6. Department of Mental Health. Guidelines for the care of psychiatric patients at high risk of violence (SMI-V Care System). Nonthaburi: Department of Mental Health; 2023.
7. Thumwong N, Kanato M. Methamphetamine use behavior, abnormal symptoms, and domestic violence among drug users in Thailand. Addictive Disorders & Their Treatment. 2020; 19(2): 88-98. https://doi.org/10.1097/ADT.0000000000000188
8. Zarit SH, Reever KE, Bach-Peterson J. Relatives of the impaired elderly: Correlates of feelings of burden. The Gerontologist. 1980; 20(6): 649-655. https://doi.org/10.1093/geront/20.6.649
9. Marlatt GA, Donovan DM. Relapse prevention: Maintenance strategies in the treatment of addictive behaviors. New York: Guilford Press; 2005.
10. นันทพญาน์ พิมพ์บุตร, นิตยา ฤทธิ์ศรี. การพัฒนารูปแบบการดูแลผู้ป่วยจิตเวชยาเสพติดที่มีความเสี่ยงสูงต่อการก่อความรุนแรงด้วยการระดมพลังทางสังคมร่วมกับการจัดการรายกรณี อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม. วารสารโรงพยาบาลมหาสารคาม. 2568. 22(2): 177-192. https://he02.tci-thaijo.org/index.php/MKHJ/article/view/275640/188087
11. Kemmis S, McTaggart R. The action research planner. Victoria: Deakin University Press; 1988.

12. Stringer ET. Action research. 4th ed. Thousand Oaks, CA: Sage Publications; 2014.
13. World Health Organization. Community mental health services: Promoting person-centred and rights-based approaches. Geneva: WHO; 2021. Available from: https://www.who.int/publications/b/57927
14. Anthony WA. Recovery from mental illness: The guiding vision of the mental health service system in the 1990s. Psychosocial Rehabilitation Journal. 1993; 16(4): 11-23. https://psycnet.apa.org/buy/1993-46756-001
15. Drake RE, Mercer-McFadden C, Mueser KT, McHugo GJ, Bond GR. Review of integrated mental health and substance abuse treatment for patients with dual disorders. Schizophrenia Bulletin. 1998; 24(4): 589-608. https://academic.oup.com/schizophreniabulletin/article-abstract/24/4/589/1929004
16. Meyers RJ, Smith JE. Clinical Guide to alcohol treatment: The community reinforcement approach. New York: Guilford Press; 1995. https://shorturl.asia/DqQmi
17. Test MA., Stein LI. Alternative to mental hospital treatment: Conceptual model, treatment program, and clinical evaluation. Archives of General Psychiatry. 1980; 37(4): 392-407. https://cir.nii.ac.jp/crid/1573668924708385664
18. Penzenstadler L, Soares C, Anci E, Molodynski A, Khazaal Y. Effect of Assertive Community Treatment for Patients with Substance Use Disorder: A Systematic Review. European Addiction Research. 2019; 25(2): 56-67. https://doi.org/10.1159/000496742

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อก ด้วยโปรแกรมซีร่าคอร์

Development and Performance Evaluation of a Helmet Detection Prototype System Using CIRA CORE

สมเจตน์ บุญชื่น[1] สารัลย์ กระจง[1] วัชรพล แก้วเปี้ย[1] ภัณฑิรา วรรณชิด[1] ฐิติณัฐ ไชยกาล[1]
สุวรรณษา ตันดี[1] ทวีศักดิ์ วรจักร์[1] นัฐพงษ์ เนินชัด[1] และ สุภัตรา ปินจันทร์[1*]
Somjate Bunchuen[1], Saran Krachong[1], Watcharaphol Kaewpia[1], Pantira Wannachid[1], Thitinut Chaiyakan[1],
Suwannasa Tandee[1], Thaweesak Worachak[1], Nattapong Nernchad[1] and Supattra Pinchan[1*]
[1]*คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์*
[1]*Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University*
[*]Corresponding author; email: supattra.pin@live.uru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อก และทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจจับหมวกกันน็อกภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ระบบพัฒนาด้วยโปรแกรม ซีร่าคอร์ร่วมกับการฝึกโมเดลด้วยชุดข้อมูลภาพจำนวน 200, 300, 400 และ 500 รูปภาพ กระบวนการทดลองประกอบด้วยการเตรียมภาพ การทำป้ายกำกับบริเวณหมวกกันน็อก และการฝึกโมเดลด้วยเครื่องมือฝึกการเรียนรู้เชิงลึก จากนั้นนำผลการตรวจจับมาเปรียบเทียบกับโมเดลโยโลวี 3 ผลการทดสอบพบว่า โมเดลที่ฝึกด้วยภาพจำนวน 200 และ 300 รูป ยังไม่สามารถตรวจจับหมวกกันน็อกได้ ส่วนโมเดลที่ฝึกด้วยภาพจำนวน 400 รูป มีความแม่นยำเฉลี่ย 13.5% และโมเดลที่ฝึกด้วยภาพจำนวน 500 รูป มีความแม่นยำเฉลี่ย 57.9% เมื่อเปรียบเทียบกับโยโลวี 3 พบว่าโยโลวี 3 มีความแม่นยำเฉลี่ย 48.3% นอกจากนี้ การทดสอบมุมกล้องพบว่า มุมกล้อง 45 องศา ตรวจพบจำนวน 9 ครั้ง มีความแม่นยำเฉลี่ย 57.2% ส่วนมุมกล้อง 90 องศา ตรวจพบจำนวน 6 ครั้ง มีความแม่นยำเฉลี่ย 35.4% ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าจำนวนภาพที่ใช้ฝึกโมเดลและมุมกล้องมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบตรวจจับหมวกกันน็อก

คำสำคัญ: การตรวจจับหมวกกันน็อก, การเรียนรู้เชิงลึก, โยโลวี 3, ซีร่าคอร์

Abstract

This research aimed to design and develop a helmet detection prototype system and evaluate its detection performance within Uttaradit Rajabhat University. The system was developed using CIRA CORE and trained with image datasets consisting of 200, 300, 400, and 500 images. The experimental process included image preparation, helmet annotation, and model training using a deep learning training tool. The detection performance of the developed models was subsequently compared with that of the YOLOv3 model. The experimental results revealed that the models trained with 200 and 300 images were unable to detect helmets. The model trained with 400 images achieved an average accuracy of 13.5%, whereas the model trained with 500 images achieved an average accuracy of 57.9%. In comparison, the YOLOv3 model achieved an average accuracy of 48.3%. Furthermore, camera-angle evaluation showed that at the 45-degree angle, the system successfully detected helmets 9 times, achieving an average accuracy of 57.2%, whereas at the 90-degree angle, the system detected helmets 6 times, with an average accuracy of 35.4%. The findings indicate that both the number of training images and the camera angle affect the performance of the helmet detection system.

Keywords: Helmet Detection, Deep Learning, YOLOv3, CIRA CORE

บทนำ

ประเทศไทยมีอัตราการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน 25.4 คนต่อประชากร 100,000 คน [1] ในปัจจุบันรถจักรยานยนต์เป็นยานพาหนะที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความคล่องตัวสูง ประหยัดค่าใช้จ่าย เหมาะสมกับการเดินทางในระยะใกล้ โดยเฉพาะในกลุ่มนักเรียน นักศึกษา และบุคลากรในสถาบันการศึกษา อย่างไรก็ตาม การใช้รถจักรยานยนต์มีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุสูงกว่ายานพาหนะหลายประเภท เนื่องจากผู้ขับขี่และผู้โดยสารมีการป้องกันร่างกายน้อย เมื่อเกิดอุบัติเหตุจึงมีโอกาสได้รับบาดเจ็บรุนแรง โดยเฉพาะบริเวณศีรษะและสมอง การสวมหมวกกันน็อกหรือหมวกนิรภัยจึงเป็นมาตรการสำคัญที่ช่วยลดความรุนแรงของการบาดเจ็บและการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน อย่างไรก็ตาม จากบริบทของมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์พบว่านักศึกษาบางส่วนใช้รถจักรยานยนต์ในการเดินทางภายในพื้นที่มหาวิทยาลัย และยังพบปัญหาการไม่สวมหมวกกันน็อกในบางกรณี ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนาระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อกเพื่อสนับสนุนการเฝ้าระวังและส่งเสริมความปลอดภัยในการขับขี่

การตรวจสอบการสวมหมวกกันน็อกโดยเจ้าหน้าที่มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ต้องใช้กำลังคนจำนวนมาก การตรวจสอบไม่สามารถทำได้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา และอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากสภาพแวดล้อมหรือปริมาณรถจักรยานยนต์ที่ผ่านเข้าออกพร้อมกันจำนวนมาก ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับการประมวลผลภาพจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมต่อการพัฒนาระบบตรวจจับแบบอัตโนมัติ โดยเฉพาะเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning) ซึ่งสามารถเรียนรู้ลักษณะของวัตถุจากข้อมูลภาพและนำไปใช้จำแนกหรือระบุตำแหน่งวัตถุในภาพได้ งานวิจัยของบุญญากร ท่องมนต์วิทย์ และคณะ [2] ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับตรวจจับการสวมใส่หมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ด้วยเทคนิคการเพิ่มข้อมูล ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าจำนวนและความหลากหลายของชุดข้อมูลภาพเป็นปัจจัยสำคัญต่อความแม่นยำของระบบตรวจจับหมวกกันน็อก นอกจากนี้งานวิจัยด้านการตรวจจับอุปกรณ์ป้องกันอันตราย

ส่วนบุคคลด้วยการเรียนรู้เชิงลึกยังแสดงให้เห็นว่าโมเดลตรวจจับวัตถุสามารถนำไปใช้เฝ้าระวังความปลอดภัยในสภาพแวดล้อมจริงได้ โดยสามารถตรวจจับอุปกรณ์หลายประเภท เช่น หมวกนิรภัย เสื้อสะท้อนแสง และแว่นตานิรภัย [3]

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา อัลกอริทึมกลุ่มโยโล (YOLO) ได้รับความนิยมอย่างมากสำหรับงานตรวจจับวัตถุ เนื่องจากสามารถประมวลผลภาพได้รวดเร็วและเหมาะกับงานแบบใกล้เคียงเวลาจริง งานวิจัยที่นำโยโลไปใช้กับงานตรวจจับวัตถุในบริบทต่าง ๆ เช่น การตรวจจับความผิดปกติจากภาพในวิดีโอ [4] การตรวจจับและแบ่งระดับความรุนแรงของแผลกดทับด้วยโยโลวี 8 [5] การตรวจจับใบหน้าจากสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันด้วยโยโลวี 4 [6] การเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับป้ายทะเบียนรถด้วยโยโล ร่วมกับการรู้จำตัวอักษรด้วยแสง [7] และการเปรียบเทียบโมเดลตรวจจับวัตถุด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันในงานภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ [8] งานวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า โยโล มีความยืดหยุ่นสูง สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งงานด้านความปลอดภัย การคมนาคม การเกษตร อุตสาหกรรม และการแพทย์ อีกทั้งยังมีแนวโน้มให้ผลลัพธ์ที่ดีเมื่อนำไปฝึกด้วยชุดข้อมูลที่เหมาะสม

นอกจากโยโล แพลตฟอร์มสำหรับพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์แบบใช้งานง่าย เช่น ซีร่าคอร์ (CIRA CORE) ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะกับการพัฒนาระบบต้นแบบ เนื่องจากช่วยลดความซับซ้อนของการเขียนโปรแกรมและสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รับภาพหรือระบบแสดงผลได้ งานวิจัยเกี่ยวกับระบบตรวจจับบุคคลอันตรายและแนะนำเส้นทางหนีภายในโรงเรียนด้วยแพลตฟอร์ม ซีร่าคอร์แสดงให้เห็นว่าแพลตฟอร์มดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้กับการประมวลผลภาพจากกล้องวงจรปิดและการตรวจจับวัตถุในสถานการณ์ด้านความปลอดภัยได้ [9] เช่นเดียวกับงานวิจัยด้านการตรวจจับรอยตำหนิบนตัวถังรถยนต์จำลองหลังการพ่นสี ซึ่งมีการเปรียบเทียบระบบตรวจจับวัตถุ รวมถึงซอฟต์แวร์ CIRA และระบบตรวจจับเชิงพาณิชย์อื่น ๆ [10] จึงกล่าวได้ว่า ซีร่าคอร์มีความเหมาะสมต่อการนำมาพัฒนาระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อกในพื้นที่จริง โดยเฉพาะงานวิจัยระดับประยุกต์ที่ต้องการสร้างระบบให้สามารถใช้งานร่วมกับกล้องและอุปกรณ์ควบคุมได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเฝ้าระวังและแจ้งเตือนอุบัติเหตุยังสนับสนุนแนวคิดการใช้การเรียนรู้เชิงลึกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยเช่น งานที่พัฒนาระบบตรวจจับและแจ้งเตือนอุบัติเหตุโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ภาพจากกล้องสามารถช่วยเพิ่มความรวดเร็วในการตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติและสนับสนุนการแจ้งเตือนได้ [11] งานด้านความปลอดภัยในพื้นที่อื่น ๆ เช่น การตรวจจับช้างป่าบุกรุกพื้นที่เกษตรกรรมด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน [12] การตรวจจับวัตถุจากภาพถ่ายทางอากาศ [8] ล้วนชี้ให้เห็นว่าการเรียนรู้เชิงลึกสามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาที่มีสภาพแวดล้อมซับซ้อนและมีความหลากหลายของภาพได้ ขณะเดียวกันงานวิจัยด้านการคัดแยกพริกชี้ฟ้าด้วยเทคนิคโยโล [13] การคัดแยกมะขามหวานด้วยการประมวลผลภาพ [14] และการพัฒนาระบบสาธิตตรวจสอบวัตถุด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน [15] ยังสะท้อนว่าความแม่นยำของระบบขึ้นอยู่กับการจัดเตรียมภาพ การกำหนดฉลากข้อมูล และการเลือกโมเดลที่เหมาะสม

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ ชุดข้อมูลภาพสำหรับฝึกโมเดล อัลกอริทึมหรือแพลตฟอร์มที่ใช้ในการตรวจจับ และสภาพแวดล้อมของการติดตั้งใช้งานจริง งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและพัฒนาระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อกภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ โดยใช้ซีร่าคอร์ร่วมกับกล้องตรวจจับภาพ และทดสอบประสิทธิภาพของระบบจากจำนวนภาพฝึกที่แตกต่างกัน รวมถึงศึกษาผลของมุมกล้องต่อการตรวจจับ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อกภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ โดยใช้โปรแกรมซีร่าคอร์ ร่วมกับการประมวลผลภาพจากกล้องตรวจจับ เพื่อประเมินความสามารถของระบบในการตรวจจับการสวมหมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การออกแบบและสร้างระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อค

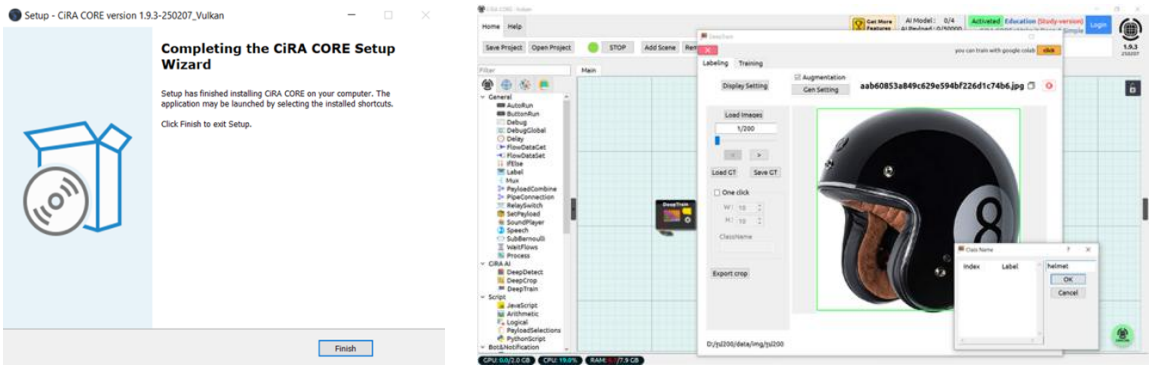
อุปกรณ์ประกอบไปด้วยกล้องเว็บแคมสามารถบันทึกวิดีโอบนคอมพิวเตอร์ กล้องเว็บแคมเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่าน USB แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อก

2. แพลตฟอร์มซีร่าคอร์

ซีร่าคอร์ (CIRA CORE) [16] แสดงดังภาพที่ 2 a) เป็นแพลตฟอร์มสำหรับพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์และระบบประมวลผลภาพที่สามารถสร้างกระบวนการทำงานในรูปแบบบล็อกโค้ด (Block Code) ทำให้ลดความซับซ้อนของการเขียนโปรแกรม และสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รับภาพ เช่น กล้องเว็บแคมและกล้องไอพีได้ ในงานวิจัยนี้ ซีร่าคอร์ถูกนำมาใช้ในการสร้างชุดข้อมูล ฝึกโมเดลด้วยการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) และทดสอบโมเดลด้วยการตรวจจับเชิงลึก (Deep Detect) เพื่อพัฒนาระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์



a) b)

ภาพที่ 2 แพลตฟอร์มซีร่าคอร์ a)การติดตั้งโปรแกรม ซีร่าคอร์ [16] b) การติดตั้งเครื่องมือฝึกการเรียนรู้เชิงลึก

สำหรับการเรียนรู้เชิงลึกเป็นเครื่องมือในโปรแกรม ซีร่าคอร์ที่ใช้สำหรับฝึกโมเดลปัญญาประดิษฐ์ให้สามารถเรียนรู้และจดจำวัตถุจากชุดข้อมูลภาพ กระบวนการทำงานเริ่มจากการเตรียมภาพชุดข้อมูล (Dataset) หลายมุมมอง จากนั้นนำภาพเข้าสู่โปรแกรมเพื่อทำการป้ายกำกับ (Labeling) โดยตีกรอบบริเวณวัตถุเป้าหมายและกำหนดชื่อวัตถุดังภาพที่ 2 b) เมื่อ

บันทึกข้อมูลฉลากภาพแล้วจึงนำไปใช้ในการฝึกโมเดล (Train Model) โดยพิจารณาค่าการเรียนรู้ของโมเดลเช่น ค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (Avg Loss) เมื่อโมเดลมีค่าความคลาดเคลื่อนลดลงหรือคงที่ จึงทำการบันทึกโมเดลเพื่อนำไปทดสอบการตรวจจับต่อไป ในงานวิจัยนี้ใช้การเรียนรู้เชิงลึกเพื่อฝึกระบบให้สามารถตรวจจับหมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากจำนวนภาพฝึก 200, 300, 400 และ 500 รูปภาพ

โยโลวี 3 (You Only Look Once version 3, YOLOv3) [17] เป็นอัลกอริทึมตรวจจับวัตถุด้วยการเรียนรู้เชิงลึกที่สามารถตรวจจับตำแหน่งและจำแนกประเภทของวัตถุภายในภาพจากการประมวลผลเพียงครั้งเดียว จึงเหมาะสมกับงานตรวจจับวัตถุแบบเรียลไทม์เช่นในงานตรวจจับการสวมหมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์และงานเฝ้าระวังความปลอดภัยจากภาพหรือวิดีโอ [18] ในงานวิจัยนี้นำโยโลวี 3 สำเร็จรูปที่ได้รับการฝึกรูปหมวกกันน็อกแล้ว [19] มาใช้เป็นโมเดลเปรียบเทียบกับโมเดลที่ฝึกด้วยโปรแกรมซีร่าคอร์ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อก

3. ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนที่ 3.1 หลังจากดำเนินการออกแบบและสร้างระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อกเสร็จสมบูรณ์ ได้ดำเนินการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ โดยติดตั้งกล้องเว็บแคมบริเวณด้านหน้ามหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์สัญจรผ่าน ดังแสดงในภาพที่ 3

ขั้นตอนที่ 3.2 การเตรียมและปรับชุดข้อมูลภาพ ผู้วิจัยได้เตรียมชุดข้อมูลภาพสำหรับฝึกโมเดลตรวจจับหมวกกันน็อก โดยรวบรวมภาพของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ทั้งกรณีสวมหมวกกันน็อกและไม่สวมหมวกกันน็อก ภาพที่นำมาใช้ประกอบด้วยภาพจากหลายมุมมอง หลายระยะ และหลายสภาพแสง เพื่อให้โมเดลสามารถเรียนรู้ลักษณะของหมวกกันน็อกได้หลากหลายมากขึ้น

ขั้นตอนที่ 3.3 การแบ่งข้อมูลและการฝึกโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) โดยนำภาพเข้าสู่โปรแกรมซีร่าคอร์ เพื่อทำป้ายกำกับข้อมูล (Labeling) ด้วยการตีกรอบบริเวณหมวกกันน็อกและกำหนดชื่อวัตถุเป้าหมายเป็น “helmet” จากนั้นบันทึกข้อมูลป้ายกำกับเป็นไฟล์จีที (GT) เพื่อนำไปใช้ในการฝึกโมเดล โดยแบ่งจำนวนภาพสำหรับฝึกโมเดลออกเป็น 4 ชุด ได้แก่ 200 300 400 และ 500 รูปภาพ เพื่อให้ระบบสามารถเรียนรู้ลักษณะของหมวกกันน็อกจากชุดข้อมูลภาพที่แตกต่างกัน สำหรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของการฝึกโมเดลได้แก่ ขนาดภาพนำเข้า (Width) เท่ากับ 416 พิกเซล ค่าจำนวนภาพที่ระบบใช้ประมวลผลในหนึ่งรอบการอัปเดตค่าน้ำหนักของโมเดล (Batch size) เท่ากับ 64 และค่าชุดย่อยของ Batch size (Subdivisions) เท่ากับ 8 จากนั้นทำการฝึกโมเดลจนค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (Avg Loss) ลดลงจนมีแนวโน้มคงที่จึงนำโมเดลเพื่อนำไปทดสอบ

ขั้นตอนที่ 3.4 เมื่อฝึกโมเดลด้วยการเรียนรู้เชิงลึกเสร็จสิ้น ผู้วิจัยได้นำโมเดลที่ได้ไปทดสอบการตรวจจับหมวกกันน็อก โดยกำหนดจำนวนการทดลองระบบของแต่ละชุดข้อมูลเป็น 10 ครั้ง โดยใช้เกณฑ์ในการประเมินผลประกอบด้วย ค่าร้อยละของการตรวจพบผู้สวมหมวกกันน็อก ค่าร้อยละของการตรวจจับผิดพลาด และผลการตรวจจับภายใต้มุมกล้องที่แตกต่างกันได้แก่ มุมกล้อง 45 องศา และมุมกล้อง 90 องศา

ขั้นตอนที่ 3.5 นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้นำโมเดลโยโลวี 3 มาใช้เปรียบเทียบกับโมเดลที่ฝึกด้วยโปรแกรมซีร่าคอร์ เพื่อพิจารณาความแตกต่างของประสิทธิภาพในการตรวจจับหมวกกันน็อก โดยเลือกติดตั้งกล้องในตำแหน่งที่ให้ผลการตรวจจับเหมาะสม และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบในด้านความแม่นยำและความผิดพลาดของระบบ



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการทดลองการตรวจจับหน้ามหาวิทยาลัย

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อกดำเนินการโดยใช้โปรแกรมซีร่าคอร์ ในการฝึกโมเดลตรวจจับภาพ และเปรียบเทียบผลการตรวจจับจากชุดข้อมูลภาพที่มีจำนวนแตกต่างกัน ได้แก่ 200 300 400 และ 500 รูปภาพ รวมถึงเปรียบเทียบกับโมเดลโยโลวี 3 เพื่อพิจารณาความสามารถของระบบในการตรวจจับผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ที่สวมหมวกกันน็อกภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่กำหนด

1. การฝึกรูปภาพจำนวน 200 รูป

จากผลการทดสอบโมเดลที่ฝึกด้วยภาพจำนวน 200 รูป พบว่าระบบไม่สามารถตรวจจับหมวกกันน็อกได้ โดยมีค่าการตรวจพบผู้สวมหมวกกันน็อกเฉลี่ยเท่ากับ 0% และเกิดการตรวจจับผิดพลาดเฉลี่ย 54.6% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 8.3 แสดงดังตารางที่ 1 ลักษณะดังกล่าวสะท้อนว่าโมเดลยังไม่สามารถเรียนรู้ลักษณะเฉพาะของหมวกกันน็อกได้เพียงพอ เนื่องจากจำนวนภาพที่ใช้ฝึกมีน้อยเกินไป และอาจยังไม่ครอบคลุมความแตกต่างของรูปทรง สี มุมมอง แสง และสภาพแวดล้อมจริง ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานของ บุญญากร ท่องมนต์วิทย์และคณะ [2] ที่ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อตรวจจับการสวมหมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ และชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มข้อมูลภาพมีผลสำคัญต่อประสิทธิภาพของโมเดลตรวจจับ เนื่องจากช่วยเพิ่มความหลากหลายของข้อมูลและลดข้อจำกัดจากชุดข้อมูลขนาดเล็ก

ตารางที่ 1 การฝึก 200 รูปภาพ สำหรับคนสวมใส่หมวกกันน็อก

ครั้งที่ทดสอบ	ผลการตรวจสอบคนสวมใส่หมวกกันน็อก			
	ตรวจพบคนสวมใส่หมวกกันน็อก (เปอร์เซ็นต์)	ตรวจจับผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	มุมกล้อง 45 องศา (เปอร์เซ็นต์)	มุมกล้อง 90 องศา (เปอร์เซ็นต์)
1	0	55	0	0
2	0	57	0	0
3	0	50	0	0
4	0	53	0	0
5	0	56	0	0
6	0	55	0	0
7	0	51	0	0
8	0	54	0	0
9	0	60	0	0
10	0	55	0	0

ตารางที่ 2 การฝึก 300 รูปภาพ สำหรับคนสวมใส่หมวกกันน็อก

ครั้งที่ทดสอบ	ผลการตรวจสอบคนสวมใส่หมวกกันน็อก			
	ตรวจพบคนสวมใส่หมวกกันน็อก (เปอร์เซ็นต์)	ตรวจจับผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	มุมกล้อง 45 องศา (เปอร์เซ็นต์)	มุมกล้อง 90 องศา (เปอร์เซ็นต์)
1	0	51	0	0
2	0	55	0	0
3	0	52	0	0
4	0	50	0	0
5	0	51	0	0
6	0	54	0	0
7	0	54	0	0
8	0	53	0	0
9	0	51	0	0
10	0	51	0	0

2. การฝึกรูปภาพจำนวน 300 รูป

เมื่อเพิ่มจำนวนภาพฝึกเป็น 300 รูป ผลการทดสอบยังคงพบว่าระบบไม่สามารถตรวจจับหมวกกันน็อกได้ โดยมีค่าการตรวจพบผู้สวมหมวกกันน็อกเฉลี่ย 0% และมีการตรวจจับผิดพลาดเฉลี่ย 52.2% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 2.8 แสดงดังตารางที่ 2 แม้ว่าค่าการตรวจจับผิดพลาดจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการฝึกด้วยภาพ 200 รูป แต่ยังไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานจริง การเพิ่มจำนวนภาพเพียงเล็กน้อยยังไม่สามารถทำให้โมเดลเรียนรู้คุณลักษณะของวัตถุได้อย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะวัตถุที่มีความหลากหลายสูงอย่างหมวกกันน็อก ซึ่งมีทั้งแบบเต็มใบ ครึ่งใบ สีเข้ม สีอ่อน มีลาย หรือมีรูปร่างใกล้เคียงกับเส้นผมและศีรษะของผู้ขับขี่ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของงานวิจัยด้านการตรวจจับอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลด้วยการเรียนรู้เชิงลึก [3] ซึ่งระบุว่าระบบตรวจจับอุปกรณ์นิรภัยต้องอาศัยข้อมูลภาพที่หลากหลายและมีการกำหนดฉลากข้อมูลอย่างเหมาะสม เพื่อให้โมเดลสามารถจำแนกวัตถุที่มีลักษณะคล้ายกันได้ดีขึ้น

3. การฝึกรูปภาพจำนวน 400 รูป

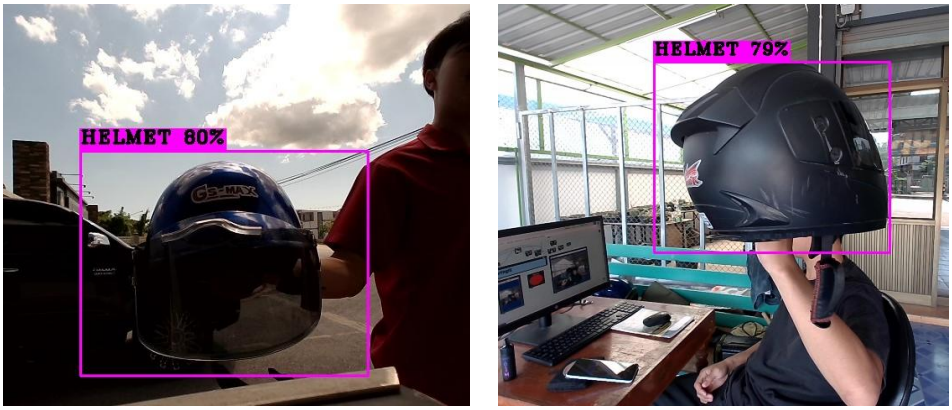
ในการฝึกโมเดลด้วยภาพจำนวน 400 รูป ระบบเริ่มสามารถตรวจจับหมวกกันน็อกได้ จากตารางที่ 3 ระบบตรวจพบหมวกกันน็อกได้ถูกต้องเฉลี่ยอยู่ที่ 13.5% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 812.7 และมีการตรวจจับผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 62.9% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1259 และมีการตรวจพบด้วยมุมกล้องที่ 45 องศา มีการตรวจพบจำนวน 3 ครั้ง มีความแม่นยำเฉลี่ยอยู่ที่ 16.4% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 702.3 และมุมกล้องที่ 90 องศา มีการตรวจพบจำนวน 2 ครั้ง มีความแม่นยำเฉลี่ยอยู่ที่ 10.2% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 462.6 อย่างไรก็ตาม ค่าความแม่นยำยังอยู่ในระดับต่ำ จึงยังไม่เหมาะต่อการใช้งานในสถานการณ์จริงที่ต้องการความถูกต้องสูง การที่โมเดลเริ่มตรวจจับได้แต่ยังมีค่าความผิดพลาดสูงอาจเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น ภาพฝึกมีมุมมองไม่หลากหลาย ระยะห่างของกล้องไม่เหมาะสม ความละเอียดของภาพไม่เพียงพอ แสงสว่างเปลี่ยนแปลง หรือการตีกรอบวัตถุในขั้นตอนการทำป้ายกำกับไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสัมพันธ์กับงานวิจัยด้านการตรวจจับวัตถุด้วยโยโล เช่น การตรวจจับป้ายทะเบียนรถ [7] และการตรวจจับใบหน้าบุคคลในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน [6] พบว่าแม้โมเดลตรวจจับวัตถุจะมีประสิทธิภาพสูง แต่คุณภาพของภาพ สภาพแวดล้อม และลักษณะของข้อมูลฝึกมีผลโดยตรงต่อความแม่นยำของระบบ

ตารางที่ 3 การฝึก 400 รูปภาพ สำหรับคนสวมใส่หมวกกันน็อก

ครั้งที่ทดสอบ	ผลการตรวจสอบคนสวมใส่หมวกกันน็อก			
	ตรวจพบคนสวมใส่หมวกกันน็อก (เปอร์เซ็นต์)	ตรวจจับผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	มุมกล้อง 45 องศา (เปอร์เซ็นต์)	มุมกล้อง 90 องศา (เปอร์เซ็นต์)
1	0	63	53	0
2	0	86	0	50
3	64	0	0	0
4	0	72	0	0
5	0	82	60	0
6	0	79	0	52
7	0	94	51	0
8	71	0	0	0
9	0	56	0	0
10	**0**	97	0	0

4. การฝึกรูปภาพจำนวน 500 รูป

สำหรับการฝึกโมเดลด้วยภาพจำนวน 500 รูป พบว่าระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น จากตารางที่ 4 ระบบตรวจพบหมวกกันน็อกได้ถูกต้องเฉลี่ยอยู่ที่ 57.9% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1694.1 และมีการตรวจจับผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 18% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 878.9 และมีการตรวจพบด้วยมุมกล้องที่ 45 องศา จำนวน 6 ครั้ง มีความแม่นยำเฉลี่ยอยู่ที่ 40.8% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1319.5 และมุมกล้องที่ 90 องศา จำนวน 4 ครั้งมีความแม่นยำเฉลี่ยอยู่ที่ 25.2% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1098.4



a) b)

ภาพที่ 4 ตรวจจับหมวกกันน็อกที่ การฝึกโมเดลด้วยภาพจำนวน 500 รูป
a) ตรวจจับหมวกกันน็อกบริเวณที่โล่งแจ้ง b) ตรวจจับหมวกกันน็อกในห้องที่มีแสงสว่างคงที่

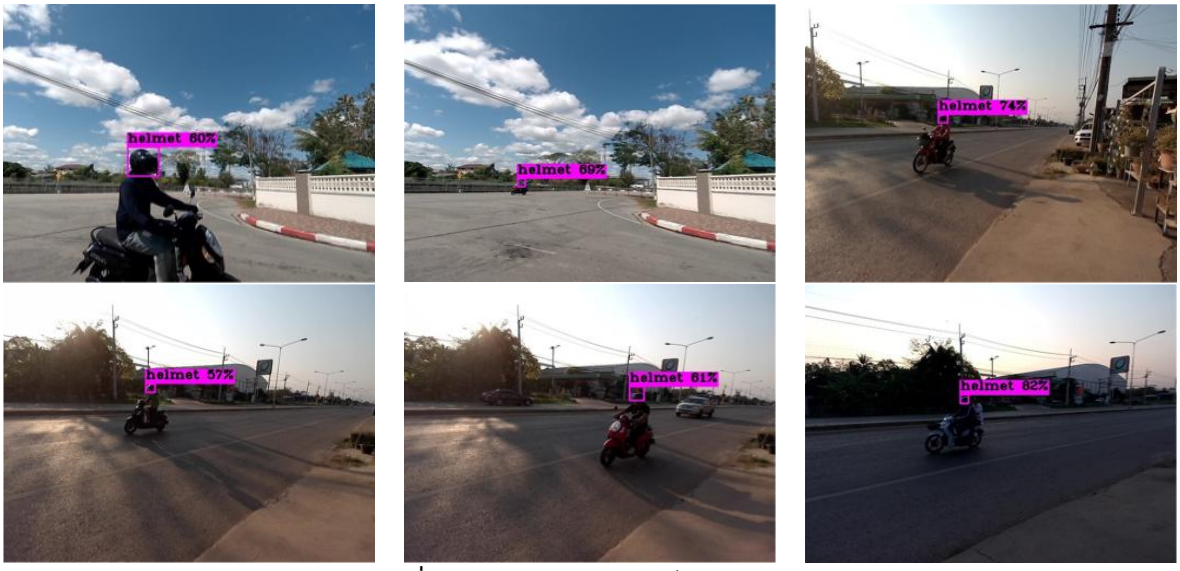
ผลการตรวจจับหมวกกันน็อกแสดงดังภาพที่ 4 การเพิ่มจำนวนภาพฝึกช่วยให้ระบบตรวจจับหมวกกันน็อกได้ดีขึ้น เมื่อเทียบกับการฝึกด้วยภาพ 200, 300 และ 400 รูป ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ศักดิ์ชัย ศรีมากรณ์และคณะ [5] ที่ประยุกต์ใช้โยโล และการเรียนรู้เชิงลึกในการคัดแยกระดับความรุนแรงของแผลกดทับ โดยพบว่าการจัดเตรียมชุดข้อมูลและการเลือกขนาดโมเดลมีผลต่อความแม่นยำในการจำแนกภาพ

ตารางที่ 4 การฝึก 500 รูปภาพ สำหรับคนสวมใส่หมวกกันน็อก

ครั้งที่ทดสอบ	ผลการตรวจสอบคนสวมใส่หมวกกันน็อก			
	ตรวจพบคนสวมใส่หมวกกันน็อก (เปอร์เซ็นต์)	ตรวจจับผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	มุมกล้อง 45 องศา (เปอร์เซ็นต์)	มุมกล้อง 90 องศา (เปอร์เซ็นต์)
1	85	0	0	0
2	96	0	0	65
3	59	0	66	0
4	79	0	0	59
5	88	0	74	51
6	80	0	52	0
7	92	0	80	0
8	0	55	0	77
9	0	75	55	0
10	0	50	81	0

5. ผลการตรวจจับหมวกกันน็อกกับโยโลวี 3

จากผลการทดลองข้างต้นด้านมุมกล้องพบว่า มุมกล้อง 45 องศาให้ผลการตรวจจับดีกว่ามุมกล้อง 90 องศา โดยมุมกล้อง 45 องศาตรวจพบรวม 9 ครั้ง และมีความแม่นยำเฉลี่ย 57.2% ขณะที่มุมกล้อง 90 องศาตรวจพบรวม 6 ครั้ง และมีความแม่นยำเฉลี่ย 35.4% ดังนั้นจึงติดตั้งกล้องที่ตำแหน่ง 45 องศาเพื่อใช้กับโมเดลโยโลวี 3 ผลการตรวจจับแสดงดังรูปที่ 5



ภาพที่ 5 การตรวจจับหมวกกันน็อกกับโยโลวี 3

ตารางที่ 5 ผลการตรวจจับหมวกกันน็อกสำหรับคนสวมใส่หมวกกันน็อกของโยโลวี 3

ครั้งที่ทดสอบ	ผลการตรวจสอบคนสวมใส่หมวกกันน็อก	
	ตรวจพบคนสวมใส่หมวกกันน็อก (เปอร์เซ็นต์)	ตรวจจับผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
1	60	0
2	69	0
3	74	0
4	80	0
5	57	0
6	61	0
7	82	0
8	0	100
9	0	100
10	0	100

จากตารางที่ 5 ระบบตรวจพบหมวกกันน็อกกับโมเดลโยโลวี 3 ถูกต้องเฉลี่ยอยู่ที่ 48.3% และมีการตรวจจับผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 30% เมื่อเปรียบเทียบผลการตรวจจับของโมเดลที่ฝึกด้วยซีร่าคอร์กับโยโลวี 3 พบว่าโยโลวี 3 มีค่าความแม่นยำต่ำกว่าการฝึกด้วยภาพ 500 รูปเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามโยโลวี 3 มีความสามารถในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กและสถานที่โล่งแจ้งแสงสว่างไม่เพียงพอ ได้ดีกว่าโมเดลที่ฝึกจากชุดข้อมูลเฉพาะขนาดเล็กในซีร่าคอร์

สรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และทดสอบประสิทธิภาพระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อก โดยใช้โปรแกรมซีร่าคอร์ ร่วมกับกล้องตรวจจับภาพ เพื่อประมวลผลและตรวจจับการสวมหมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยการเตรียมชุดข้อมูลภาพ การกำหนดตำแหน่งวัตถุด้วยการทำป้ายกำกับ การฝึกโมเดลด้วยการเรียนรู้เชิงลึกและการทดสอบการตรวจจับด้วยโมเดลที่ผ่านการฝึกจากจำนวนภาพที่แตกต่างกัน ได้แก่ 200, 300, 400 และ 500 รูปภาพ รวมถึงนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับโมเดลโยโลวี 3 ผลการทดสอบพบว่า จำนวนภาพที่ใช้ในการฝึกโมเดลมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบตรวจจับหมวกกันน็อกอย่างชัดเจน โดยโมเดลที่ฝึกด้วยภาพจำนวน 200 และ 300 รูป ยังไม่สามารถตรวจจับหมวกกันน็อกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนโมเดลที่ฝึกด้วยภาพจำนวน 400 รูป เริ่มสามารถตรวจจับหมวกกันน็อกได้ โดยมีความแม่นยำเฉลี่ย 13.5% และเมื่อเพิ่มจำนวนภาพฝึกเป็น 500 รูป ระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 57.9% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนภาพฝึกช่วยให้โมเดลเรียนรู้ลักษณะของหมวกกันน็อกได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโมเดลโยโลวี 3 พบว่าโยโลวี 3 มีความแม่นยำเฉลี่ย 48.3% น้อยกว่าโมเดลที่ฝึกด้วยภาพจำนวน 500 รูปเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามโยโลวี 3 มีความสามารถในการตรวจจับหมวกกันน็อกได้ดีกว่าในสภาพแวดล้อมจริง นอกจากนี้ ผลการทดสอบด้านมุมกล้องพบว่า มุมกล้อง 45 องศาให้ผลการตรวจจับดีกว่ามุมกล้อง 90 องศา โดยมุมกล้อง 45 องศาตรวจพบรวม 9 ครั้ง มีความแม่นยำเฉลี่ย 57.2% ส่วนมุมกล้อง 90 องศาตรวจพบรวม 6 ครั้ง มีความแม่นยำเฉลี่ย 35.4% ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า นอกจากจำนวนภาพที่ใช้ฝึกโมเดลแล้ว มุมกล้องยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแม่นยำของระบบตรวจจับหมวกกันน็อก

แนวทางในการพัฒนาระบบควรเพิ่มจำนวนภาพฝึกโมเดลมากกว่า 500 ภาพ โดยให้ครอบคลุมความหลากหลายของหมวกกันน็อก เช่น สี รูปทรง ขนาด มุมมองของผู้ขับขี่ ระยะห่างจากกล้อง สภาพแสง และฉากหลังที่แตกต่างกัน รวมถึงควรเพิ่มภาพกลุ่มไม่สวมหมวกกันน็อกและภาพที่มีลักษณะใกล้เคียงกับหมวกกันน็อก เพื่อช่วยลดการตรวจจับผิดพลาด ประโยชน์ของงานวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางสามารถเชื่อมต่อระบบแจ้งเตือนผ่านไลน์ จดหมายอิเล็ก หรือระบบบันทึกภาพป้ายทะเบียน เพื่อให้หน่วยงานรักษาความปลอดภัยของมหาวิทยาลัยนำไปเป็นข้อมูลเชิงสถิติ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ที่สนับสนุนการทำงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. World Health Organization. Road safety [Online]. 2021 [updated 2026; cited 2026 Jun 26]. Available: https://www.who.int/thailand/our-work/road-safety
2. บุญญากร ท่องมนต์วิทย์, จิรายุส ดีผาด, เกรียงศักดิ์ เตมีย์. การเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อตรวจจับการสวมใส่หมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ด้วยเทคนิคการเพิ่มข้อมูล. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 2565; 50(2): 93-101. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/KKUSciJ/article/view/250302
3. ตะวัน อันเตปุริก, ชัยพร เขมะภาตะพันธ์. การตรวจจับการสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลด้วยการเรียนรู้เชิงลึก. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2569; 28(1): 58-69. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/sci_ubu/article/view/267882
4. ธนานพ จันภักดี, ฐิติรัตน์ ศิริบวรรัตนกุล. การเรียนรู้เชิงลึกสำหรับตรวจจับความผิดปกติจากภาพในวิดีโอการ์ตูนสำหรับเด็ก. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์. 2565; 21(2): 1-16. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/JASCI/article/view/245319
5. ศักดิ์ชัย ศรีมากรณ์, ณิชา นภาพร จงกะสิกิจ, ปิยธรณ์ เร่งเร็ว. การพัฒนากระบวนการคัดแยกภาพถ่ายระดับความรุนแรงของแผลกดทับ ด้วย YOLO และการเรียนรู้เชิงลึก. วิทยสารบูรณาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรมประยุกต์. 2567; 17(2): 43-56. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/Itech/article/view/264581
6. พิศณุ คูมีชัย. การตรวจจับใบหน้าบุคคลจาก 3 สภาวะแวดล้อมด้วย YOLOv4. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2567; 32(2): 99-114. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj/article/view/260310
7. ภวัต อุดมฐานกุล, ทรงพล นคเรศเรืองศักดิ์. การเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับป้ายทะเบียนด้วย YOLO และการรู้จำตัวอักษรด้วยแสง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก. 2567; 4(2): 140-150. https://doi.org/10.14456/jsci-sbu.2024.19
8. กิตตากร วิริยะศาสตร์, วรากร เลื่องลือวุฒิ, ปิยะรส มาลีเจริญ, สิรภพ สันติรณนรงค์, วิชัย แผ้วเกษม, พันธุ์เทพ แก้วมงคล, สัญญา มิตรเอม, พันศักดิ์ เทียนวิบูลย์. การเปรียบเทียบโมเดลตรวจจับวัตถุด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันในงานภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ. วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ. 2567; 6(13): 90-107. https://sc01.tci-thaijo.org/index.php/dtaj/article/view/240858
9. นิธิศ สิทธิราช, นนทวัฒน์ วงศ์วาด, สุชานรี ทัศนา, มาโนชญ์ แสงศิริ. ระบบตรวจจับบุคคลอันตรายและแนะนำวิธีการหนี ภายในบริเวณโรงเรียนด้วยแพลตฟอร์ม CiRA CORE. วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์. 2568; 9(18): 1-9. https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/ajsas/article/view/3508
10. อนันตา สินไชย, ทรงวุฒิ พานิชย์, สุทธิดา ยอดอาษา. การศึกษาประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบของระบบการตรวจจับวัตถุ: กรณีศึกษาการตรวจจับรอยตำหนิบนตัวถังรถยนต์จำลองหลังการพ่นสี. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. 2568; 13(1): 65-79. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/fit-ssru/article/view/261262
11. พรพนม นันทะเสน, พนมขวัญ ริยะมงคล. ระบบตรวจจับและแจ้งเตือนอุบัติเหตุโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก. Life Sciences and Environment Journal. 2566; 24(2): 338-351. https://doi.org/10.14456/lsej.2023.26

12. วสุพล เผือกนำผล, วิชาญ ทุมทอง, ปฏิคม ทองจริง. การพัฒนาระบบเฝ้าระวังช้างป่าบุกรุกในพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อลดความขัดแย้งระหว่างคนและช้างด้วยเทคโนโลยีโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน. วารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2566; 15(1): 86-100. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/spurst/article/view/247027
13. วัชรพล หาญทองดี, ภูวิศ ศิริรัตนกุลชัย, คิรากร องคชื่น, สุพาพร บรรดาศักดิ์. การพัฒนาแบบจำลองการตรวจจับพริกชี้ฟ้าสำหรับเครื่องคัดแยก. วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์. 2567; 3(2): 25-39. https://doi.org/10.14456/ksti.2024.13
14. ปาณิสรา หาดขุนทด, ภัครพล อาจอาษา, ธนากร แสงกุดเลาะ. การพัฒนาระบบคัดแยกมะขามหวานด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ. วารสารวิทยสารสนเทศและเทคโนโลยี. 2566; 4(2): 47-61. https://so09.tci-thaijo.org/index.php/jait_ssru/article/view/3036
15. ธันวา ภมรบุตร, ชัลวาล มณีวงษ์, ศศิธร ชูแก้ว, พรชัย กิจเจริญ. การพัฒนาชุดสาธิตการตรวจสอบวัตถุโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน. Journal of Digital Education and Learning Engineering. 2568; 1(2): 12-23. https://so18.tci-thaijo.org/index.php/delethailand/article/view/1248
16. CiRA. CiRA CORE for Windows [Internet]. 2023 [updated 2025; cited 2026 Jun 9]. Available from: https://git.cira-lab.com/cira/cira-core-windows
17. Joseph Redmon, Ali Farhadi. YOLOv3: An Incremental Improvement [Internet]. arXiv; 2018 [updated 2028; cited 2026 Jun 9]. Available from: https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02767
18. WEI YANG, GUANG-LE ZHOU, ZHI-WEI GU, XIAO-DAN JIANG, ZHE-MING LU. SAFETY HELMET WEARING DETECTION BASED ON AN IMPROVED YOLOV3 SCHEME. International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 2022; 18(3): 973-988. http://www.ijicic.org/ijicic-180319.pdf
19. BlcaKHat. Helmet Detection using YOLOV3 [Internet]. GitHub; 2022 [updated 2022; cited 2026 Jun 9]. Available from: https://github.com/BlcaKHat/yolov3-Helmet-Detection

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม 2569)

บทความวิจัย (Research Article)

การขึ้นรูปและการวิเคราะห์ลักษณะของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง

Fabrication and Characterization of Electrospun Polyvinyl Alcohol Fiber Mats Containing *Phyllanthus emblica* Crude Extract

ณัฐนรี เจะอาลี[1] ธนพงษ์ เชื้อฉุน[1*] เพียงฤทัย บุญประสิทธิ์[1] และ ทิพย์วรรณ หงกะเชิญ[2]
Natnaree Chealee[1], Thanapong Chuechun[1*], Piangruetai Boonprasith[1] and Tippavan Hongkachern[2]
[1]*สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การแพทย์ คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา*
[2]*สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา*
[1]*Department of Medical Science, Faculty of Allied Health Sciences, Bansomdejchaopraya Rajabhat University*
[2]*Department of Physics, Faculty of Education, Bansomdejchaopraya Rajabhat University*
[*]Corresponding author; email: thanapong.ch@bsru.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
15 พฤษภาคม 2569	13 สิงหาคม 2569	13 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่งแบบแกนหมุน พร้อมทั้งตรวจสอบฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย องค์ประกอบทางเคมี และสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใยผสมสารสกัด การทดลองเริ่มจากการสกัดสารสำคัญจากผลมะขามป้อมด้วยเอทานอลความเข้มข้น 95% จากนั้นนำสารสกัดที่ได้มาผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และขึ้นรูปด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่ง ผลการศึกษาพบว่าสารสกัดหยาบมะขามป้อมที่ละลายในสารละลาย 5% DMSO สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Streptococcus mutans* และ *Streptococcus sobrinus* ได้เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารสกัดอย่างน้อย 30% (w/v) และขนาดโซนยับยั้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความเข้มข้นของสารสกัด แผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม 40% (w/w) สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียได้อย่างชัดเจน โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโซนยับยั้งเชื้อ *S. mutans* เท่ากับ 12.52 ± 0.62 มิลลิเมตร และ *S. sobrinus* เท่ากับ 11.87 ± 0.41 มิลลิเมตร สเปกตรัม FTIR แสดงพีคของหมู่ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับองค์ประกอบของสารแทนนินที่มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียและบ่งชี้ถึงการเกิดอันตรกิริยาผ่านพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบพอลีฟีนอลในสารสกัดกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ส่งผลให้สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมมีการเชื่อมต่อกันบริเวณจุดสัมผัสระหว่างเส้นใยและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.58 ± 0.50 µm ซึ่งสูงกว่าเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 0.53 ± 0.08 µm แผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่งแสดงสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรคในช่องปาก และมีศักยภาพในการนำไปต่อยอดเป็นนวัตกรรมวัสดุทางการแพทย์ฐานชีวภาพสำหรับอุตสาหกรรมสุขภาพและการดูแลช่องปากในอนาคต

คำสำคัญ: พอลิไวนิลแอลกอฮอล์, มะขามป้อม, อิเล็กโทรสปินนิ่ง, ฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย, เชื้อก่อโรคในช่องปาก

Abstract

This research investigated the fabrication of polyvinyl alcohol (PVA) electrospun fiber mats incorporated with *Phyllanthus emblica* crude extract using the rotary electrospinning technique. The antibacterial activity, chemical composition, and morphology of the extract-loaded fiber mats were evaluated. The experiment began with the extraction of bioactive compounds from *Phyllanthus emblica* fruits using 95% ethanol, followed by blending the obtained extract with a PVA solution and fabricating the mixture into fiber mats via electrospinning. The results demonstrated that the *Phyllanthus emblica* crude extract dissolved in 5% DMSO solution exhibited antibacterial activity against *Streptococcus mutans* and *Streptococcus sobrinus* at extract concentrations of at least 30% (w/v), with the inhibition zone diameters increasing slightly with increasing extract concentration. The PVA fiber mat containing 40% (w/w) *Phyllanthus emblica* crude extract exhibited clear antibacterial activity, with mean inhibition zone diameters of 12.52 ± 0.62 mm against *S. mutans* and 11.87 ± 0.41 mm against *S. sobrinus*. FTIR spectra showed peaks corresponding to functional groups associated with tannins exhibiting antibacterial activity and indicated hydrogen-bonding interactions between the polyphenolic compounds in the extract and PVA. These interactions were associated with morphological changes in the extract-loaded PVA fibers, including interconnections at fiber contact points and an increase in the average fiber diameter to 1.58 ± 0.50 µm, compared with 0.53 ± 0.08 µm for pure PVA fibers. The PVA fiber mats incorporated with Phyllanthus emblica crude extract exhibited antibacterial activity against oral pathogens and have potential for further development as innovative bio-based medical materials for future healthcare and oral care applications.

Keywords: Polyvinyl alcohol, *Phyllanthus emblica*, Electrospinning, Antibacterial activity, Oral pathogens

บทนำ

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตหรือเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง (Electrospinning) เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ระดับไมโครเมตรจนถึงนาโนเมตร [1, 2] โดยอาศัยสนามไฟฟ้าแรงสูงในการเอาชนะแรงตึงผิวของสารละลายหรือพอลิเมอร์หลอมเหลว ทำให้เกิดการยืดตัวเป็นเส้นใยต่อเนื่องและเคลื่อนที่ไปยังตัวรองรับ ขณะที่ตัวทำละลายระเหยออกระหว่างการเคลื่อนที่ผ่านอากาศ [3] เส้นใยที่ได้มีลักษณะเด่นคือมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงและมีความพรุนสูง [4] ซึ่งเอื้อต่อการประยุกต์ใช้ในหลากหลายด้าน เช่น วิศวกรรมเนื้อเยื่อ [5, 6] การชักนำการสร้างกระดูก [7] วัสดุปิดแผล [8, 9] ระบบนำส่งยา [6] การกรอง [10] และไบโอเซนเซอร์ [11] และในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมามีการพัฒนาระบบอิเล็กโทรสปินนิ่งแบบแกนหมุน (Rotary electrospinning) เพื่อเพิ่มปริมาณการผลิตเส้นใยนาโนให้มากกว่าระบบเข็มเดี่ยว (Single-needle electrospinning) อีกทั้งยังลดปัญหาการอุดตันของหัวปั่นและเพิ่มความต่อเนื่องของกระบวนการผลิต [12] จึงมีศักยภาพต่อการขยายระดับการผลิตสำหรับการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมและทางชีวการแพทย์ ประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่งในการผลิตเส้นใยที่มีสัณฐานวิทยาสม่ำเสมอขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งสมบัติของสารละลาย เช่น ความหนืด สภาพนำไฟฟ้า และแรงตึงผิว ตลอดจนพารามิเตอร์ของกระบวนการ ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ ระยะห่างระหว่างหัวปั่นกับตัวรองรับ อัตราการไหลของสารละลาย และความเร็วรอบของตัวรองรับหรือหัวปั่นในระบบอิเล็กโทรสปินนิ่งแบบหมุน ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสม่ำเสมอ และการเกิดเม็ดบีท (Bead formation) ของเส้นใย ดังนั้น การควบคุมพารามิเตอร์การปั่นอย่างเหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการผลิตแผ่นเส้นใยที่มีคุณภาพและมีสมบัติเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ทางชีวการแพทย์ [3, 13]

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol), PVA) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการผลิตเส้นใยนาโน เนื่องจากมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ไม่เป็นพิษ สามารถย่อยสลายได้ และละลายน้ำได้ดี อีกทั้งยังมีความสามารถในการขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ [14] นอกจากนี้ PVA ยังสามารถผสมร่วมกับพอลิเมอร์ธรรมชาติหรือสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้หลากหลายชนิด โดยยังคงคุณสมบัติในการสร้างเส้นใยที่สม่ำเสมอ ส่งผลให้สามารถปรับปรุงสมบัติด้านชีวภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะด้านได้ [15] พอลิไวนิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ยังมีข้อจำกัดด้านฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยเฉพาะการต้านเชื้อจุลินทรีย์และการส่งเสริมการยึดเกาะของเซลล์ ทำให้มีการพัฒนาโดยการผสมกับพอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น ไคโตซาน [16] และเจลาติน [17] หรือการเติมสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุ งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการเติมสารออกฤทธิ์หลากหลายชนิดลงในเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ทั้งในรูปของสารอนินทรีย์และสารสกัดจากพืช เช่น อนุภาคเงิน (Silver nanoparticles; AgNPs) [18] สารสกัดจากว่านหางจระเข้ (*Aloe vera*) [19] หญ้าปืนนกไส้ (*Bidens pilosa*) [20] ผลมะระขี้นก (*Bitter gourd*) [21] และใบตำลึง (*Coccinia grandis*) [22] ซึ่งล้วนมีรายงานว่าสามารถเพิ่มสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียของเส้นใยได้ แต่ระดับประสิทธิภาพมีความแตกต่างกันตามชนิดของสารออกฤทธิ์ ความสามารถในการกระจายตัวภายในเมทริกซ์พอลิเมอร์ และการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์จากโครงสร้างเส้นใย

ประสิทธิภาพของสารเติมแต่งเหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสาร ตลอดจนความเข้ากันได้กับเมทริกซ์พอลิเมอร์ อนุภาคเงินแม้มีประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์สูง แต่มีข้อจำกัดด้านความเป็นพิษต่อเซลล์เมื่อใช้ในความเข้มข้นสูง [23] ขณะที่สารสกัดจากพืชทั่วไปมีข้อจำกัดด้านความคงตัวของสารออกฤทธิ์และความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีจากแหล่งที่มาของพืช [24] ซึ่งอาจส่งผลต่อความสม่ำเสมอของประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรีย งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนสำหรับวัสดุปิดแผลและการสมานแผล ขณะที่การประยุกต์ใช้เพื่อยับยั้งเชื้อก่อโรคในช่องปาก โดยเฉพาะ *Streptococcus mutans* และ *Streptococcus sobrinus* ซึ่งเป็นเชื้อสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟันผุจากการสร้างไบโอฟิล์มบนผิวฟัน เป็นอีกแนวทางที่มีความน่าสนใจสำหรับการพัฒนาวัสดุเพื่อการดูแลสุขภาพช่องปาก แม้ว่ามีการใช้สารต้านจุลชีพสังเคราะห์ เช่น คลอร์เฮกซิดีน (Chlorhexidine) ที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมเชื้อก่อโรคในช่องปาก แต่มี

ฤทธิ์ต้านจุลชีพแบบไม่จำเพาะ ส่งผลกระทบต่อทั้งเชื้อก่อโรคและจุลชีพประจำถิ่นในช่องปาก อีกทั้งการใช้ต่อเนื่องอาจก่อให้เกิดผลข้างเคียง เช่น การเปลี่ยนสีของฟัน ความผิดปกติของการรับรส และอาการไม่พึงประสงค์อื่น ๆ [25] ข้อจำกัดดังกล่าวจึงเป็นแรงผลักดันให้มีการค้นหาสารออกฤทธิ์จากธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยสูง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบเส้นใยนาโนที่ผลิตด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง

มะขามป้อม (*Phyllanthus emblica*) เป็นพืชสมุนไพรที่ได้รับความนิยมและมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยา อาหาร และเครื่องสำอางอย่างแพร่หลาย โดยอุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิด โดยเฉพาะสารกลุ่มพอลีฟีนอล เช่น กรดแกลลิก รวมถึงวิตามินซี (กรดแอสคอร์บิก) และฟลาโวนอยด์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ ต้านการอักเสบ และยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ [26, 27] สารประกอบฟีนอลิกเหล่านี้สามารถออกฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียได้หลายกลไก ได้แก่ การรบกวนความสมบูรณ์ของเยื่อหุ้มเซลล์ การเพิ่มการรั่วไหลของสารภายในเซลล์ การยับยั้งเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึม และการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของแบคทีเรีย ซึ่งล้วนเป็นกลไกสำคัญต่อการลดความสามารถในการก่อโรคของจุลินทรีย์ [28] นอกจากนี้ยังพบสารประกอบอื่น ๆ เช่น แทนนิน อัลคาลอยด์ ไฟโตสเตอรอล เทอร์พีนอยด์ กรดอินทรีย์ และกรดอะมิโน ซึ่งล้วนมีบทบาทในการส่งเสริมสุขภาพและฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลาย [29] รายงานการศึกษาหลายฉบับยังแสดงให้เห็นว่าสารสกัดมะขามป้อมมีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ รวมทั้งสามารถทำลายผนังเซลล์แบคทีเรียและยับยั้งการก่อตัวของไบโอฟิล์ม [30] สมบัติเหล่านี้บ่งชี้ถึงศักยภาพของมะขามป้อมในการนำไปใช้เป็นสารออกฤทธิ์ในวัสดุทางชีวการแพทย์ โดยเฉพาะสำหรับการควบคุมจุลินทรีย์ เมื่อพิจารณาร่วมกับข้อจำกัดของสารต้านจุลชีพสังเคราะห์และสารเติมแต่งที่ใช้ในงานวิจัยก่อนหน้า มะขามป้อมจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นสารจากธรรมชาติ มีสารออกฤทธิ์หลายชนิดที่สามารถออกฤทธิ์ร่วมกัน และมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นสารเติมแต่งในระบบเส้นใยนาโนสำหรับการประยุกต์ใช้ทางทันตกรรมและการดูแลสุขภาพช่องปาก

จากเหตุผลดังกล่าว จึงมีความสนใจในการสกัดสารสำคัญจากผลมะขามป้อมเพื่อศึกษาการออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *S. mutans* และ *S. sobrinus* ซึ่งเป็นเชื้อแบคทีเรียสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟันผุและการสร้างไบโอฟิล์มบนผิวฟัน รวมทั้งนำมาผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่งแบบแกนหมุน และศึกษาผลของปริมาณสารสกัดต่อโครงสร้างทางเคมี สัณฐานวิทยาของเส้นใย และสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาวัสดุชีวภาพที่มีศักยภาพในการควบคุมเชื้อก่อโรคในช่องปาก และสามารถต่อยอดสู่การประยุกต์ใช้ในวัสดุทางทันตกรรมหรือระบบนำส่งสารออกฤทธิ์เฉพาะที่ในอนาคต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่งแบบแกนหมุน
2. ศึกษาผลของสารสกัดต่อโครงสร้างทางเคมี สัณฐานวิทยาของเส้นใย และฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย *S. mutans* และ *S. sobrinus* ของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบ

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (C072PVA) ของบริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด, เอทานอล 95% (Food grade) ของบริษัท ออลเคมิคอลแอนด์ซัพพลาย จำกัด, ผลมะขามป้อมสด, ไดเมธิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide, DMSO) ของบริษัทวินเน็คซ์ (ไทยแลนด์) จำกัด

2. การเตรียมสารสกัดหยาบมะขามป้อม

นำผลมะขามป้อมสดมาล้างทำความสะอาดและหั่นเป็นชิ้นขนาดเล็ก จากนั้นนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 7 วัน แล้วบดให้เป็นผงละเอียดด้วยเครื่องบดสมุนไพร ผงมะขามป้อมที่ได้ถูกนำมาแช่ในสารละลายเอทานอล 95% ในอัตราส่วน 1:5 (w/v) พร้อมกวนผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองด้วยผ้าขาวบางร่วมกับกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 โดยใช้ชุดกรองสุญญากาศ และนำสารละลายที่กรองได้ไประเหยเอทานอลออกด้วยเครื่องระเหยสารแบบหมุนภายใต้สุญญากาศ (Rotary evaporator) ที่อุณหภูมิ 42 °C

3. การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม

เตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 14% (w/v) ในน้ำกลั่น โดยให้ความร้อนที่ 80 °C และกวนจนผงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้วปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมสารสกัดหยาบมะขามป้อมในอัตราส่วนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์:สารสกัด เท่ากับ 100:0, 70:30 และ 60:40 (w/w) และผสมให้เข้ากันจนเป็นสารละลายเนื้อเดียว ก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง

4. การขึ้นรูปเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง

การขึ้นรูปเส้นใยดำเนินการโดยใช้ชุดอุปกรณ์อิเล็กโทรสปินนิ่งแบบหมุน โดยนำสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมที่เตรียมได้แล้วเทลงในอ่างพลาสติก จากนั้นใช้หัวปั่นที่ประกอบด้วยแท่งสแตนเลสจำนวน 12 แท่งติดตั้งรอบทรงกระบอกและเชื่อมต่อกับแกนกลาง ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้า โดยระหว่างการทดลองใช้ศักย์ไฟฟ้าสูง 25 kV และหมุนหัวปั่นด้วยความเร็ว 40 รอบต่อนาที โดยกำหนดระยะห่างระหว่างปลายแท่งสแตนเลสกับแผ่นรองรับอะลูมิเนียมฟอยล์เท่ากับ 15 ซม. เพื่อเหนี่ยวนำให้สารละลายพอลิเมอร์ยืดตัวเป็นเส้นใยและเก็บรวบรวมบนแผ่นรองรับเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5. การวิเคราะห์สมบัติของสารสกัดหยาบและแผ่นเส้นใย

ทดสอบการยับยั้งแบคทีเรียด้วยวิธี agar disc diffusion โดยใช้เชื้อ *S. mutans* และ *S. sobrinus* เพาะเลี้ยงบน Mueller Hinton Agar (MHA) ที่ 35 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และปรับความขุ่นด้วยสารละลาย 0.85% NaCl (Normal saline) ให้เทียบเท่า McFarland No. 0.5 (≈ 1.5×10^8 CFU/mL) จากนั้นเกลี่ยเชื้อให้ทั่วผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ สำหรับสารสกัดหยาบ เตรียมสารละลายสารสกัดหยาบมะขามป้อมความเข้มข้น 10–60% (w/v) โดยใช้สารละลาย 5% DMSO เป็นตัวทำละลาย และปิเปตปริมาตร 5 µL ลงบนแผ่นดิสก์ปลอดเชื้อ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม.) ที่วางบนผิวอาหารเลี้ยงเชื้อ พร้อมทั้งเตรียมแผ่นควบคุมลบ (DMSO) สำหรับแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัด ตัดชิ้นตัวอย่างเป็นแผ่นดิสก์ขนาด 6 มม. และวางลงบนผิวอาหารเลี้ยงเชื้อโดยตรง โดยจานเพาะเชื้อถูกบ่มที่ 35 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นวัดขนาดโซนยับยั้งการเจริญของเชื้อ (Zone of inhibition, ZOI)

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ในโหมด attenuated total reflectance (ATR) ช่วงเลขคลื่น 550–4000 cm^{-1}

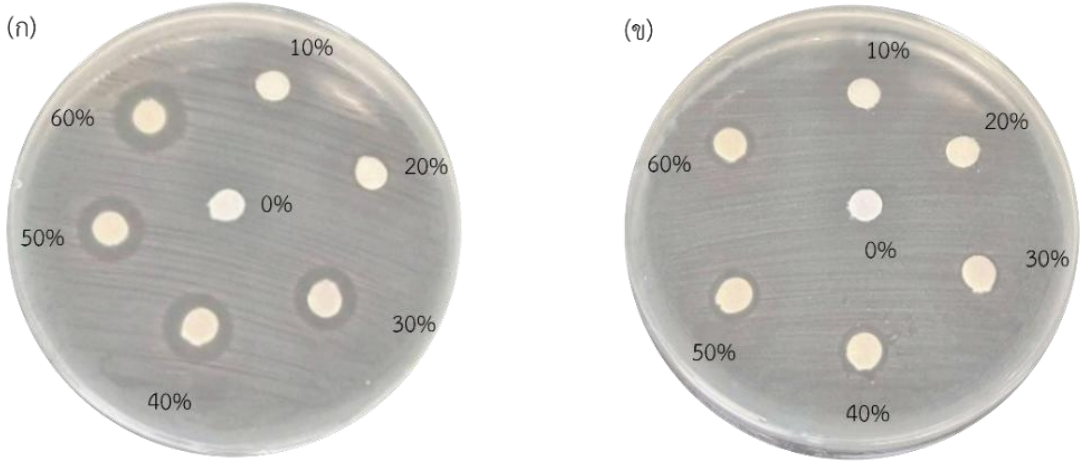
ศึกษาสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) โดยตัดชิ้นงานตัวอย่างขนาดประมาณ 10 × 10 มม. ติดตั้งบนแท่นวางตัวอย่าง และเคลือบทองก่อนการวิเคราะห์ ภาพถ่ายถูกบันทึกที่กำลังขยาย 5,000 เท่า และนำมาวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของสารสกัดหยาบมะขามป้อม

จากภาพที่ 1 พบว่าสารสกัดหยาบมะขามป้อมสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ *S. mutans* และ *S. sobrinus* ได้ตั้งแต่ความเข้มข้น 30% (w/v) ขึ้นไป โดยบริเวณโซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมีลักษณะใสรอบแผ่นดิสก์ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานที่ระบุว่ามะขามป้อมอุดมด้วยสารประกอบฟีนอลิกและแทนนิน ซึ่งสามารถยับยั้งเชื้อในกลุ่ม *Streptococcus* ได้ผ่านหลายกลไกร่วมกัน ทั้งการลดการยึดเกาะของแบคทีเรียบนพื้นผิว การยับยั้งเอนไซม์ glucosyltransferase (GTF) ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารพอลิแซ็กคาไรด์นอกเซลล์ (Extracellular polysaccharides; EPS) อันเป็นองค์ประกอบสำคัญของไบโอฟิล์ม ตลอดจนการรบกวนความสมบูรณ์ของเยื่อหุ้มเซลล์ ส่งผลให้ความสามารถในการเจริญและการสร้างไบโอฟิล์มของแบคทีเรียลดลง [28] เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดมากกว่า 30% (w/v) พบว่าขนาดโซนยับยั้งเชื้อทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและมีแนวโน้มเข้าสู่ระดับคงที่ ซึ่งบ่งชี้ว่าสารออกฤทธิ์ในสารสกัดมีปริมาณเพียงพอต่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อได้ตั้งแต่ระดับความเข้มข้นดังกล่าวแล้ว

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนยับยั้งเชื้อ พบว่าสารสกัดหยาบมะขามป้อมมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *S. mutans* ได้ดีกว่า *S. sobrinus* ดังแสดงในตารางที่ 1 ความแตกต่างนี้อาจเกี่ยวข้องกับความไวต่อสารประกอบฟีนอลิกที่ต่างกัน ความสามารถในการสร้างไบโอฟิล์ม และการแสดงออกของปัจจัยก่อโรคที่แตกต่างกันระหว่างแบคทีเรียทั้งสองชนิด แม้การศึกษานี้จะไม่ได้ประเมินกลไกดังกล่าวโดยตรง แต่ผลการทดลองก็แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของสารสกัดมะขามป้อมในการยับยั้งเชื้อก่อโรคในช่องปาก โดยเฉพาะ *S. mutans* ซึ่งเป็นเชื้อสำคัญที่มีบทบาทในการเริ่มต้นการเกิดโรคฟันผุ



ภาพที่ 1 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. mutans* (ก) และ *S. sobrinus* (ข)

ของสารสกัดหยาบมะขามป้อมที่มีความเข้มข้น 10–60% (w/v) ในสารละลาย 5% DMSO

ตารางที่ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. mutans* และ *S. sobrinus* ของสารสกัดหยาบมะขามป้อม

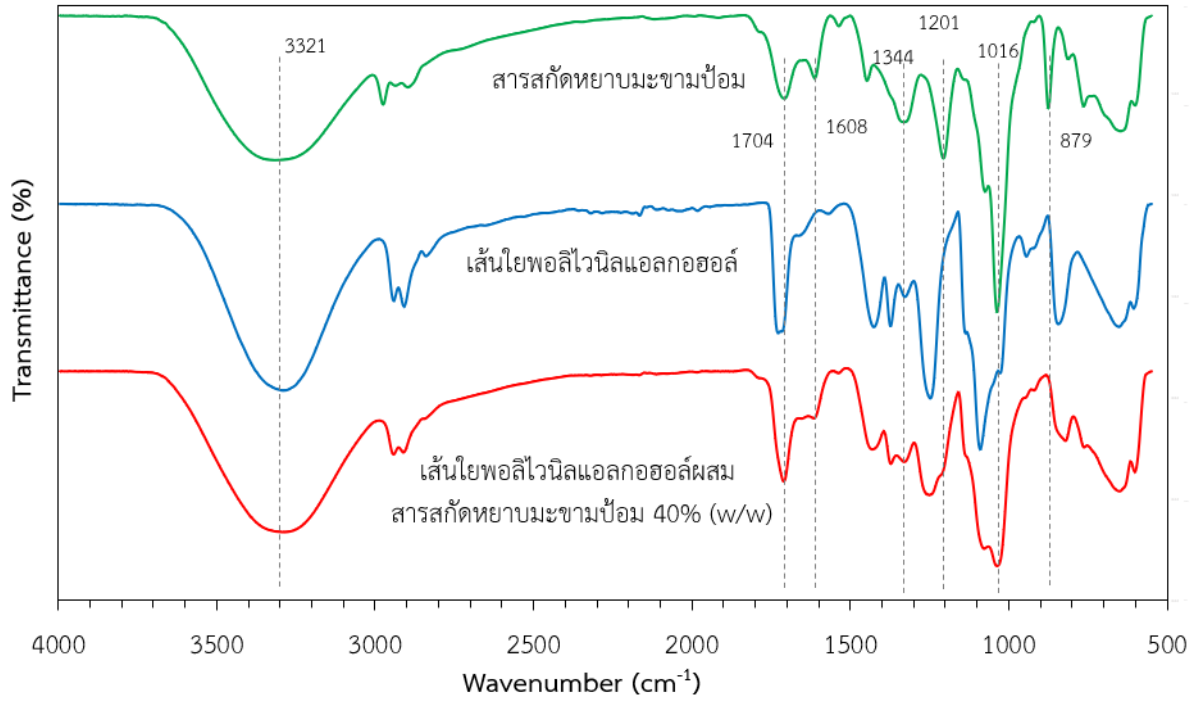
ปริมาณความเข้มข้นของสารสกัด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโซนยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย	
% (w/v)	*S. mutans*	*S. sobrinus*
0	-	-
10	-	-
20	-	-
30	10.71±0.11	7.18±0.12
40	11.13±0.13	8.69±0.18
50	11.26±0.27	8.84±0.17
60	12.29±0.27	8.71±0.16

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดหยาบมะขามป้อมและแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัด

การวิเคราะห์สเปกตรัม FTIR ของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม (ภาพที่ 2) พบพีคการสั่นของหมู่ฟังก์ชันหลักได้แก่ O–H, C–H และ C–O ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และสารประกอบออกฤทธิ์ในสารสกัดมะขามป้อม เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสารสกัดที่มีต่อเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่าสเปกตรัมของสารสกัดหยาบมะขามป้อมแสดงพีคสำคัญที่เลขคลื่น 3321, 1704, 1608 และ 1344 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ O–H stretching, C=O stretching, C=C aromatic bending และ C–O–C stretching ตามลำดับ พีคการสั่นของ C–O stretching พบที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1201 และ 1016 cm^{-1} และพีค C–C stretching พบที่ตำแหน่งเลขคลื่น 879 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับสารประกอบกลุ่มพอลีฟีนอล ฟลาโวนอยด์ แทนนิน และวิตามิน [31, 32] สำหรับเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พบพีคที่ 3305 cm^{-1} (O–H stretching), 2902 cm^{-1} (C–H stretching), 1710 cm^{-1} (C=O stretching), 1242 cm^{-1} และ 1083 cm^{-1} (C–O stretching) ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [16, 33]

ส่วนแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัด พบพีคที่สอดคล้องกับทั้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และสารสกัด โดยเฉพาะช่วงเลขคลื่น 1610–1702, 1205–1269 และ 1037–1089 cm^{-1} ซึ่งบ่งชี้ถึงการมีอยู่ของสารสกัดในโครงสร้างเส้นใย และยังพบว่าพีค O–H stretching ที่ช่วงเลขคลื่น 3050–3600 cm^{-1} มีความกว้างเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสเปกตรัมของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดอันตรกิริยาผ่านพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัดมะขามป้อม [34] อันตรกิริยาดังกล่าวอาจช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์และสารสกัด ซึ่งอาจส่งผลต่อการกระจายตัวของสารสกัดภายในโครงสร้างเส้นใย และผลดังกล่าวสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผสมสารสกัดหยาบ

การตรวจพบพีคของหมู่ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับสารประกอบฟีนอลิกและแทนนินในแผ่นเส้นใยผสมสารสกัด แสดงให้เห็นว่าสารออกฤทธิ์สำคัญจากสารสกัดมะขามป้อมยังคงสามารถตรวจพบได้ภายหลังผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่ง ผลสเปกตรัมที่ได้จึงช่วยสนับสนุนการคงอยู่ของสารสกัดภายในระบบเส้นใย ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้แผ่นเส้นใยมีสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย

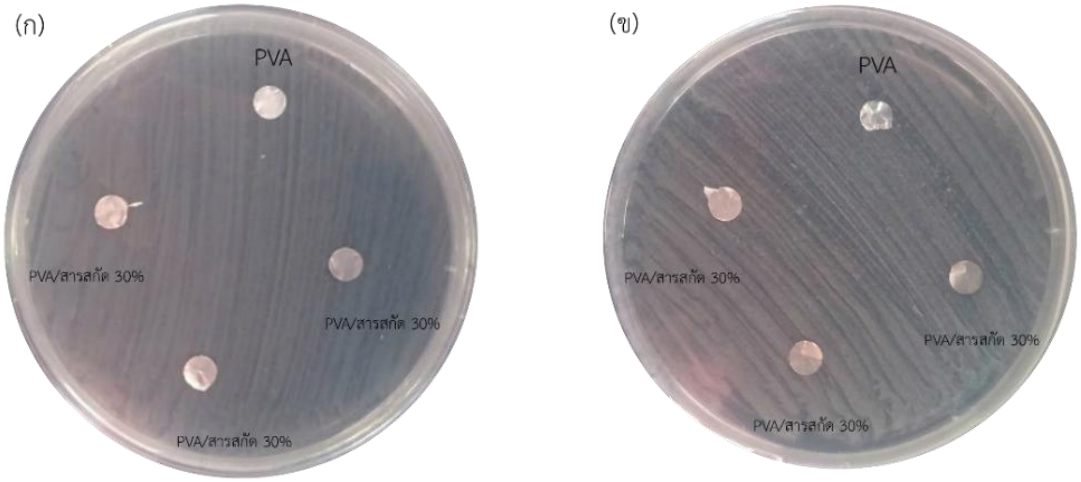


ภาพที่ 2 สเปกตรัม FTIR ของสารสกัดหยาบมะขามป้อมและแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัด

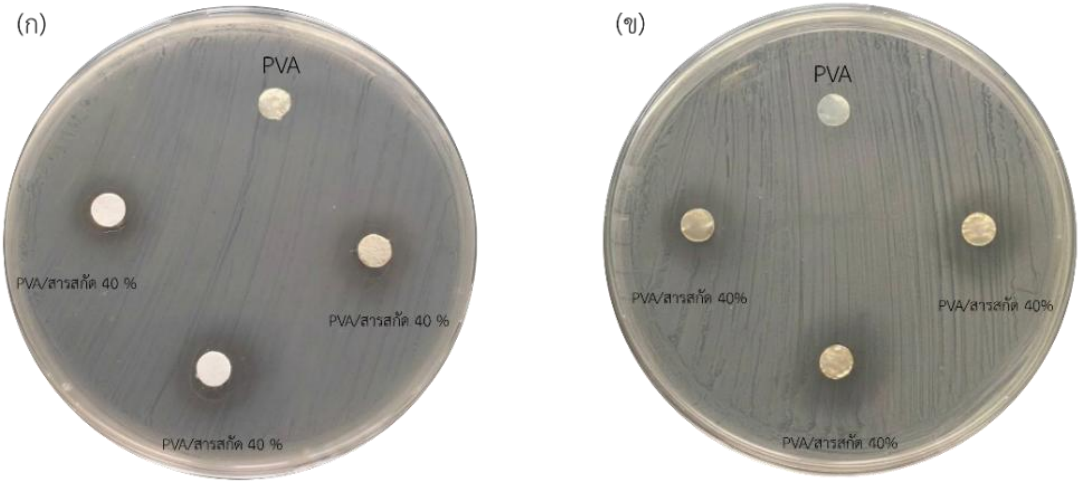
ผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม

จากการนำแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมที่ขึ้นรูปได้มาทดสอบสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียต่อ *S. mutans* และ *S. sobrinus* พบว่า แผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัด 30% (w/w) ไม่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้ (ภาพที่ 3) อาจเกิดจากปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ถูกปลดปล่อยออกจากโครงสร้างเส้นใยไม่เพียงพอต่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อ เมื่อเพิ่มปริมาณสารสกัดเป็น 40% (w/w) ทำให้สารออกฤทธิ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากแผ่นเส้นใยมีปริมาณเพียงพอต่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อทั้งสองชนิด (ภาพที่ 4) ส่งผลให้เกิดโซนยับยั้งเชื้ออย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารสกัดที่เติมลงในเส้นใยเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใย บริเวณโซนการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมีลักษณะเป็นสีเทารอบแผ่นเส้นใย โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโซนยับยั้งเชื้อ *S. mutans* เท่ากับ 12.52 ± 0.62 มิลลิเมตร และ *S. sobrinus* เท่ากับ 11.87 ± 0.41 มิลลิเมตร เมื่อสังเกตโซนยับยั้งเชื้อ *S. mutans* มีลักษณะทั้งส่วนที่เป็นโซนใสรอบแผ่นเส้นใยและส่วนที่เป็นสีเทารอบนอกโซนใส ลักษณะดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยและการแพร่ของสารออกฤทธิ์จากโครงสร้างเส้นใยออกสู่บริเวณโดยรอบ จึงทำให้ความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ในบริเวณรอบแผ่นเส้นใยลดหลั่นตามระยะทางจากพื้นผิวเส้นใย โดยส่วนที่เป็นสีเทาอาจเป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ต่ำกว่าบริเวณรอบแผ่นเส้นใย แต่ยังเพียงพอต่อการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย ขณะที่บริเวณใกล้แผ่นเส้นใยอาจมีความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์สูงกว่าจึงปรากฏเป็นโซนใส ส่วนการยับยั้งเชื้อ *S. sobrinus* พบบริเวณโซนการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นสีเทา และพบโซนใสรอบแผ่นเส้นใยเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *S. mutans* ได้ดีกว่าเชื้อ *S. sobrinus* ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบสารสกัดหยาบมะขามป้อมโดยตรง ซึ่งพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนยับยั้งเชื้อ *S. mutans* มากกว่า *S. sobrinus* และบ่งชี้ว่าการนำสารสกัดมาผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นเส้นใยไม่ได้เปลี่ยนแปลงแนวโน้มการตอบสนองของแบคทีเรียทั้งสองชนิดต่อสารออกฤทธิ์ แม้ว่าประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อของแผ่นเส้นใยจะต่ำกว่าการใช้สารสกัดโดยตรง แต่การกักเก็บสารสกัดไว้ในโครงสร้างเส้นใยและการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ออกสู่บริเวณ

โดยรอบอาจเป็นข้อได้เปรียบสำหรับการประยุกต์ใช้ทางชีวการแพทย์ และแสดงถึงศักยภาพของแผ่นเส้นใยผสมสารสกัดสำหรับการพัฒนาเป็นวัสดุเพื่อการดูแลสุขภาพช่องปากในอนาคต



ภาพที่ 3 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม 30% (w/w) (ก) *S. mutans*, (ข) *S. sobrinus*



ภาพที่ 4 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม 40% (w/w) (ก) *S. mutans*, (ข) *S. sobrinus*

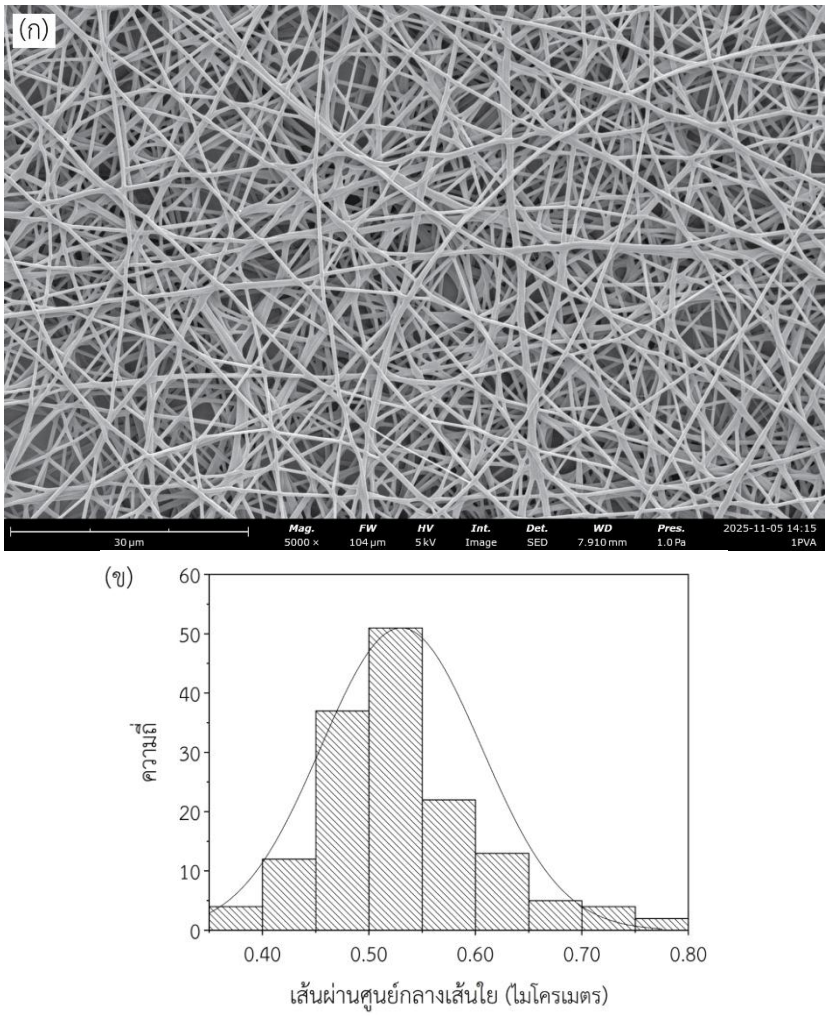
ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใย

ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเส้นใยมีการเรียงตัวแบบสุ่มและซ้อนทับกันเป็นโครงข่ายสามมิติที่มีความพรุนสูง ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเส้นใยที่ผลิตด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่ง [35] พื้นผิวของเส้นใยมีความเรียบสม่ำเสมอและไม่พบการเกิดเม็ดบีท ดังภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่าสภาวะการเตรียมสารละลายและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอิเล็กโทรสปินนิ่งสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยที่มีพื้นผิวเรียบและไม่พบการเกิดเม็ดบีทได้ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานก่อนหน้าที่พบว่าการควบคุมสมบัติของสารละลายและพารามิเตอร์ของกระบวนการ

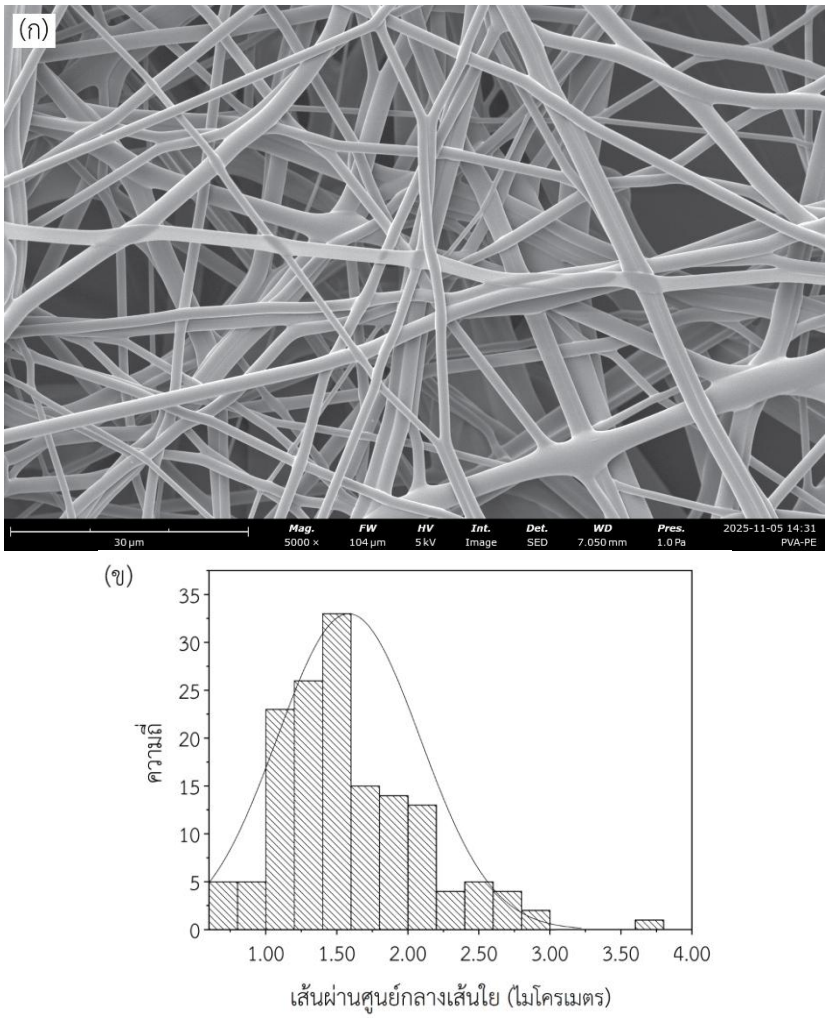
มีผลโดยตรงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางและความสม่ำเสมอของเส้นใย [3, 13] ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เท่ากับ 0.53 ± 0.08 μm และมีช่วงการกระจายตัวอยู่ระหว่าง 0.30–0.80 μm ซึ่งสะท้อนถึงความสม่ำเสมอของเส้นใยในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของขนาดเส้นใยอาจเกิดจากความไม่เสถียรของเจ็ตระหว่างกระบวนการปั่น เช่น การแกว่งตัวของเจ็ตและอัตราการระเหยของตัวทำละลาย [13]

ในขณะที่แผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม 40% มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 1.58 ± 0.50 μm (ภาพที่ 6) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ประมาณ 3 เท่า พร้อมทั้งมีช่วงการกระจายตัวของขนาดเส้นใยกว้างขึ้นอยู่ระหว่าง 0.60–4.00 μm บ่งชี้ถึงความไม่สม่ำเสมอในการขึ้นรูปแผ่นเส้นใย การเพิ่มขึ้นของขนาดและช่วงการกระจายตัวของเส้นใยดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของสารละลายหลังการเติมสารสกัด โดยเฉพาะความหนืดและแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการยืดตัวของเจ็ตระหว่างการปั่นเส้นใย [14, 20] นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ FTIR ยังสอดคล้องกับการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัดมะขามป้อมผ่านพันธะไฮโดรเจน อันตรกิริยาดังกล่าวอาจส่งผลให้โครงสร้างของสารละลายพอลิเมอร์มีความซับซ้อนมากขึ้น จึงลดความสามารถในการยืดขยายตัวของเจ็ตระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใย และนำไปสู่การเกิดเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ขึ้นรวมถึงเกิดการเชื่อมต่อกันที่จุดสัมผัสระหว่างเส้นใยมากขึ้น [34]

แม้ว่าการเติมสารสกัดหยาบมะขามป้อมจะส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้นและมีความสม่ำเสมอลดลงเมื่อเทียบกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ แต่โครงสร้างโดยรวมยังคงมีลักษณะเป็นโครงข่ายสามมิติที่มีความพรุน และสามารถกักเก็บสารสกัดไว้ภายในโครงสร้างเส้นใย โดยสารออกฤทธิ์สามารถแพร่ออกสู่บริเวณโดยรอบได้ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัสดุนำส่งสารออกฤทธิ์สำหรับงานทางชีวการแพทย์



ภาพที่ 5 สัณฐานวิทยา (ก) และการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (ข)



ภาพที่ 6 สัณฐานวิทยา (ก) และการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบ 40% (w/w) (ข)

สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ทำการสกัดสารสกัดหยาบมะขามป้อมและนำมาผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่งแบบแกนหมุน ผลการศึกษาพบว่าสารสกัดหยาบมะขามป้อมที่ละลาย ในสารละลาย 5% DMSO สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรคในช่องปาก ได้แก่ *S. mutans* และ *S. sobrinus* ได้เมื่อมีความเข้มข้นตั้งแต่ 30% (w/v) ขึ้นไป ซึ่งสัมพันธ์กับการมีอยู่ของสารประกอบกลุ่มพอลีฟีนอลและแทนนินที่มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย แผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อม 40% (w/w) สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโซนยับยั้งเชื้อ *S. mutans* เท่ากับ 12.52 ± 0.62 มิลลิเมตร และ *S. sobrinus* เท่ากับ 11.87 ± 0.41 มิลลิเมตร

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพบว่าเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์มีพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.53 ± 0.08 µm ขณะที่การเติมสารสกัดหยาบมะขามป้อมทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้นเป็น 1.58 ± 0.50 µm พร้อมทั้งพบการเชื่อมต่อกันระหว่างเส้นใยมากขึ้น สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ FTIR แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาระหว่าง

หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบพอลีฟีนอลในสารสกัดกับหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผ่านพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีส่วนต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเส้นใยภายหลังการขึ้นรูป

ผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าแผ่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมสารสกัดหยาบมะขามป้อมมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัสดุนำส่งสารออกฤทธิ์ที่มีสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านการดูแลสุขภาพช่องปาก โดยเฉพาะการควบคุมเชื้อก่อโรคฟันผุ เช่น *S. mutans* และ *S. sobrinus*

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การแพทย์ คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ สถานที่ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ให้กับทีมงานวิจัย จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. Iahnke A, Monte M L, Cadaval T R S A, Pinto L A A. Electrospinning of gelatin fine fibers loaded with hop waste extract: Development, characterization, and application as antioxidant chitosan bilayer films, Journal of Molecular Liquids. 2025; 426: 127364. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.127364
2. Aydogdu A, Sumnu G, Sahin S. Fabrication of gallic acid loaded hydroxypropyl methylcellulose nanofibers by electrospinning technique as active packaging material, Carbohydrate Polymers. 2019; 208: 241-250. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.12.065
3. Zhang C, Yuan X, Wu L, Han Y, Sheng J. Study on morphology of electrospun poly(vinyl alcohol) mats, European Polymer Journal. 2005; 41(3): 423-432. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2004.10.027
4. Kayaci F, Sen H S, Durgun E, Uyar T. Functional electrospun polymeric nanofibers incorporating geraniol–cyclodextrin inclusion complexes: High thermal stability and enhanced durability of geraniol, Food Research International. 2014; 62: 424-431. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.03.033
5. Mehrasa M, Asadollahi M A, Nasri-Nasrabadi B, Ghaedi K, Salehi H, Dolatshahi-Pirouz A, Arpanaei A. Incorporation of mesoporous silica nanoparticles into random electrospun PLGA and PLGA/gelatin nanofibrous scaffolds enhances mechanical and cell proliferation properties, Materials Science and Engineering: C. 2016; 66: 25-32. https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.04.031.
6. Sill T J, von Recum H A. Electrospinning: Applications in drug delivery and tissue engineering, Biomaterials. 2008; 29(13): 1989-2006. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.01.011
7. Ren K, Wang Y, Sun T, Yue W, Zhang H. Electrospun PCL/gelatin composite nanofiber structures for effective guided bone regeneration membranes, Materials Science and Engineering: C. 2017; 78: 324-332. https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.04.084
8. Liu S-J, Kau Y-C, Chou C-Y, Chen J-K, Wu R-C, Yeh W-L. Electrospun PLGA/collagen nanofibrous membrane as early-stage wound dressing, Journal of Membrane Science. 2010; 355(1): 53-59. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.03.012

9. Mutlu G, Calamak S, Ulubayram K, Guven E. Curcumin-loaded electrospun PHBV nanofibers as potential wound-dressing material, Journal of Drug Delivery Science and Technology. 2018; 43: 185-193. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2017.09.017
10. Zhang Q, Young T M, Harper D P, Liles T, Wang S. Optimization of electrospun poly(vinyl alcohol)/cellulose nanocrystals composite nanofibrous filter fabrication using response surface methodology, Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. 2021; 2: 100120. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100120
11. Coşkuner Filiz B, Basaran Elalmis Y, Bektaş İ S, Kantürk Figen A. Fabrication of stable electrospun blended chitosan-poly(vinyl alcohol) nanofibers for designing naked-eye colorimetric glucose biosensor based on GOx/HRP, International Journal of Biological Macromolecules. 2021; 192: 999-1012. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.048
12. Subrahmanya T M, Arshad A B, Lin P T, Widakdo J, H. K M, Austria H F M, Hu C-C, Lai J-Y, Hung W-S. A review of recent progress in polymeric electrospun nanofiber membranes in addressing safe water global issues, RSC Advances. 2021; 11(16): 9638-9663. https://doi.org/10.1039/d1ra00060h.
13. Bhardwaj N, Kundu S C. Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique, Biotechnology Advances. 2010; 28(3): 325-347. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.01.004
14. Soni N, Roy D, Patel D M, Dhandhukia P, Thakker J N. Study on electrospinning of polyvinyl alcohol nanofibers loaded with carotenoids for enhanced stability and its multifarious applications, Discover Chemistry. 2025; 2(1): 57. https://doi.org/10.1007/s44371-025-00132-z
15. Temel-Soylu T M, Keçeciler-Emir C, Rababah T, Özel C, Yücel S, Basaran-Elalmis Y, Altan D, Kirgiz Ö, Seçinti İ E, Kaya U, Altuğ M E. Green electrospun poly(vinyl alcohol)/gelatin-based nanofibrous membrane by incorporating 45S5 bioglass nanoparticles and urea for wound dressing applications: Characterization and in vitro and in vivo evaluations, (in eng), ACS Omega. 2024; 9(19): 21187-21203. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01102
16. Adeli H, Khorasani M T, Parvazinia M. Wound dressing based on electrospun PVA/chitosan/starch nanofibrous mats: Fabrication, antibacterial and cytocompatibility evaluation and in vitro healing assay, International Journal of Biological Macromolecules. 2019; 122: 238-254. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.115
17. He S, Jiang L, Liu J, Zhang J, Shao W. Electrospun PVA/gelatin based nanofiber membranes with synergistic antibacterial performance, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2022; 637: 128196. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.128196
18. Abdelgawad A M, Hudson S M, Rojas O J. Antimicrobial wound dressing nanofiber mats from multicomponent (chitosan/silver-NPs/polyvinyl alcohol) systems, Carbohydrate Polymers. 2014; 100: 166-178. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.12.043

19. Khanzada H, Salam A, Qadir M B, Phan D N, Hassan T, Munir M U, Pasha K, Hassan N, Khan M Q, Kim I S. Fabrication of promising antimicrobial *Aloe vera*/PVA electrospun nanofibers for protective clothing, (in eng), Materials (Basel). 2020; 13(17): 3884. https://doi.org/10.3390/ma13173884
20. Kegere J, Ouf A, Siam R, Mamdouh W. Fabrication of poly(vinyl alcohol)/chitosan/*Bidens pilosa* composite electrospun nanofibers with enhanced antibacterial activities, ACS Omega. 2019; 4(5): 8778-8785. https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00204
21. Sarwar M N, Ali H G, Ullah S, Yamashita K, Shahbaz A, Nisar U, Hashmi M, Kim I S. Electrospun PVA/CuONPs/Bitter gourd nanofibers with improved cytocompatibility and antibacterial properties: Application as antibacterial wound dressing, (in eng), Polymers (Basel). 2022; 14(7): https://doi.org/10.3390/polym14071361
22. Karim F-E, Islam M R, Alam M R, Jahan T, Raoha S, Haque S. Developing and screening of a bacteria-fighting and moisture-controlling *Coccinia grandis* and poly(vinyl alcohol) electrospun nanofibrous mat, ACS Omega. 2024; 9(28): 30926-30934. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03884
23. Noga M, Milan J, Frydrych A, Jurowski K. Toxicological aspects, safety assessment, and green toxicology of silver nanoparticles (AgNPs)—critical review: State of the art, International Journal of Molecular Sciences. 2023; 24(6): 5133. https://doi.org/10.3390/ijms24065133
24. Thakur L, Ghodasra U, Patel N, Dabhi M. Novel approaches for stability improvement in natural medicines, (in eng), Pharmacogn Rev. 2011; 5(9): 48-54. https://doi.org/10.4103/0973-7847.79099
25. Atazhanova G A, Levaya Y K, Badekova K Z, Ishmuratova M Y, Smagulov M K, Ospanova Z O, Smagulova E M. Inhibition of the biofilm formation of plant *Streptococcus mutans*, Pharmaceuticals. 2024; 17(12): 1613. https://doi.org/10.3390/ph17121613
26. Gul M, Liu Z-W, Iahtisham Ul H, Rabail R, Faheem F, Walayat N, Nawaz A, Shabbir M A, Munekata P E S, Lorenzo J M, and Aadil R M. Functional and nutraceutical significance of amla (*Phyllanthus emblica l.*): A review, Antioxidants. 2022; 11(5): 816. https://doi.org/10.3390/antiox11050816
27. Fatema P F, Sayful I M. *Phyllanthus emblica linn*. (amla) - a natural gift to humans: An overview, Journal of Diseases and Medicinal Plants. 2019; 5(1): 1-9. https://doi.org/10.11648/j.jdmp.20190501.11
28. Trentin D S, Silva D B, Amaral M W, Zimmer K R, Silva M V, Lopes N P, Giordani R B, Macedo A J. Tannins possessing bacteriostatic effect impair *Pseudomonas aeruginosa* adhesion and biofilm formation, PLOS ONE. 2013; 8(6): e66257. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066257
29. Prananda A T, Dalimunthe A, Harahap U, Simanjuntak Y, Peronika E, Karosekali N E, Hasibuan P A Z, Syahputra R A, Situmorang P C, Nurkolis F. *Phyllanthus emblica*: A comprehensive review of its phytochemical composition and pharmacological properties, (in English), Frontiers in Pharmacology Review. 2023; 14: 1288618. https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1288618

30. Tiwana G, Cock I E, Cheesman M J. *Phyllanthus emblica*: Phytochemistry, antimicrobial potential with antibiotic enhancement, and toxicity insights, Microorganisms. 2025; 13(3): 611. https://doi.org/10.3390/microorganisms13030611
31. Masfria S, Syahputra H, Witarman M. Formulation and evaluation of antibacterial and anti-inflammatory capsules containing *Phyllanthus emblica* l. Fruit nanoparticles, Science and Technology Indonesia. 2023; 8(4): 607-615. https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.4.607-615
32. Suvandee W, Teeranachaideekul V, Jeenduang N, Nooeaid P, Makarasen A, Chuenchom L, Techasakul S, Dechtrirat D. One-pot and green preparation of *Phyllanthus emblica* extract/silver nanoparticles/polyvinylpyrrolidone spray-on dressing, Polymers. 2022; 14(11): 2205. https://doi.org/10.3390/polym14112205
33. Jia Y-T, Gong J, Gu X-H, Kim H-Y, Dong J, Shen X-Y. Fabrication and characterization of poly (vinyl alcohol)/chitosan blend nanofibers produced by electrospinning method, Carbohydrate Polymers. 2007; 67(3): 403-409. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.06.010
34. Fitaihi R, Altalal A, Alfaraj R, Alkathiri F, Alzhrani R F, Aldawsari S, Alorayyidh S, Alnefaie M, Al Fayez N, Altuwaijri N. Electrospun PVA nanofibers co-loaded with atorvastatin and zinc oxide for antibacterial and in vitro wound healing applications, Biomedicines. 2026; 14(3): 724. https://doi.org/10.3390/biomedicines14030724
35. Li D, Xia Y. Electrospinning of nanofibers: Reinventing the wheel?, Advanced Materials. 2004; 16(14): 1151-1170. https://doi.org/10.1002/adma.200400719

บทความวิจัย (Research Article)

การศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนและประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องคั่วพริกแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

Thermal Performance and Drying Efficiency of a Temperature- and Humidity-Controlled Chili Roasting Machine Equipped with a Thermosyphon Heat Exchanger

อมร ดอนเมือง[1] สัณหวัจน์ ทองแดง[1] จรัญ มงคลวัย[1] อรปรียา เวียงอินทร์[1] และ บัญชา ล้ำเลิศ[1*]
Amorn Donmuang[1], Sanhawat Thongdaeng[1], Jaran Mongkolvai[1], Onpreeya Veang-in[1] and Bancha Lamlerd[1*]
[1]สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
[1]Mechanical engineering department, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Sakon Nakhon Campus
[*]Corresponding author; email: bancha.la@rmuti.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
22 กรกฎาคม 25669	25 สิงหาคม 2569	28 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องคั่วพริกแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เพื่อศึกษาผลของชนิดสารทำงาน และอัตราการเติมสารทำงานต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน และคุณภาพของผลิตภัณฑ์พริก โดยใช้สารทำงาน 3 ชนิด ได้แก่ น้ำ เอทานอล และ R134a ที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 40, 50 และ 60 ของปริมาตรส่วนทำระเหย ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิ ชนิดสารทำงาน และอัตราการเติมสารมีผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน โดยสารทำงานชนิดสารทำความเย็น R134a, เอทานอล และน้ำ ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 160.33, 154.02 และ 135.02 วัตต์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ ส่งผลให้ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่ากรณีที่ไม่ติดตั้งในทุกสภาวะ โดยที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และอัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 ให้ค่าความชื้นสุดท้ายต่ำสุดประมาณร้อยละ 13 (wb) ขณะที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และอัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 สามารถรักษาคุณภาพทางกายภาพของพริกได้ดีที่สุด

ผลการวิจัยสรุปได้ว่า การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนร่วมกับเครื่องคั่วพริกแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน นำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ ลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ และช่วยรักษาคุณภาพทางกายภาพของพริกแห้งได้ ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ในระดับอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: เครื่องคั่วพริก, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน, สมรรถนะเชิงความร้อน, การอบแห้งพริก

Abstract

This research aimed study investigated the thermal performance of a temperature- and humidity-controlled chili roasting machine equipped with a thermosyphon heat exchanger and to examine the effects of working fluid type and filling ratio on the heat transfer rate and product quality. Three working fluids, namely water, ethanol, and R134a refrigerant, were tested at filling ratios of 40%, 50%, and 60% of the evaporator volume under drying temperatures of 60, 80, and 100 °C. The results showed that the temperature, working fluid type, and filling ratio affected the heat transfer performance of the thermosyphon heat exchanger. The maximum heat transfer rates obtained using R134a refrigerant, ethanol, and water were 160.33, 154.02, and 135.02 W, respectively. The thermosyphon heat exchanger enabled waste heat to be recovered and reused in the process, resulting in a lower final moisture content of the product than that obtained without the heat exchanger under all experimental conditions. The lowest final moisture content, approximately 13% wet basis (wb), was obtained at a drying temperature of 100 °C and a filling ratio of 50%. In contrast, a drying temperature of 80 °C and a filling ratio of 50% provided the best preservation of the physical quality of the chili.

The results demonstrate that integrating a thermosyphon heat exchanger with a temperature- and humidity-controlled chili roasting machine can improve heat transfer performance, recover and reuse waste heat, reduce the final moisture content of the product, and maintain the physical quality of dried chili. This approach provides a potential basis for the application of thermosyphon heat exchanger technology in industrial-scale food processing.

Keywords: Chili roasting, Thermosyphon heat exchanger, Thermal performance, Chili drying

บทนำ

พริกเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารของประเทศไทยและได้รับความนิยมในการบริโภคอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวัตถุดิบหลักในการประกอบอาหารและไม่สามารถหาวัตถุดิบชนิดอื่นมาทดแทนได้อย่างสมบูรณ์ ปัจจุบันพริกถูกนำมาใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย ทั้งการผลิตพริกแห้ง น้ำพริก ซอสพริก และผลิตภัณฑ์แปรรูปอื่น ๆ รวมถึงการสกัดสารแคปไซซิน (Capsaicin) เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ทางเภสัชกรรม เวชสำอาง อาหารเสริม (Nutraceutical Products) เครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์ป้องกันสัตว์และแมลง ตลอดจนสารเติมแต่งในอาหารสัตว์ (Feed Additives) ส่งผลให้พริกเป็นพืชที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจและเป็นแหล่งรายได้สำคัญของเกษตรกรและผู้ประกอบการด้านการแปรรูป [1] สำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พริกขี้หนูผลใหญ่พันธุ์ "หัวเรือ" เป็นสายพันธุ์ที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีผลขนาดใหญ่ ความยาวประมาณ 7–8 เซนติเมตร เมื่อสุกมีสีแดงสด มีกลิ่นหอม และมีความเผ็ดในระดับปานกลาง จึงเหมาะทั้งสำหรับการบริโภคสดและการแปรรูปเป็นพริกแห้ง อย่างไรก็ตาม พริกสดมีความชื้นเริ่มต้นสูงประมาณร้อยละ 80 (wb) จึงจำเป็นต้องลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ลดการเสื่อมคุณภาพ และอำนวยความสะดวกในการขนส่ง โดยวิธีที่เกษตรกรนิยมใช้คือการตากแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 12–15 วัน จึงสามารถลดความชื้นลงเหลือร้อยละ 4–13 (wb) [2]

แม้ว่าการตากแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะมีต้นทุนต่ำ แต่กระบวนการดังกล่าวยังมีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ การพึ่งพาสภาพอากาศ ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน และไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้คุณภาพของพริกแห้ง เช่น สี กลิ่น และลักษณะทางกายภาพ มีความไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ ผู้ประกอบการส่วนใหญ่ยังใช้การคั่วพริกด้วยกระทะหรือเครื่องคั่วแบบปิดอย่างง่าย โดยใช้ฟืนหรือถ่านเป็นแหล่งพลังงานหลัก แม้ว่าจะมีต้นทุนด้านเชื้อเพลิงต่ำ แต่ยังประสบปัญหาการสูญเสียความร้อนผ่านปล่องไอเสีย การสะสมของไอน้ำภายในห้องคั่วซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง การควบคุมอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งทำให้ต้องคั่วพริกอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งการเกิดควันและกลิ่นจากการเผาไหม้ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน อีกทั้งความร้อนที่ระบายออกทางปล่องไอเสียยังไม่ได้รับการนำกลับมาใช้ประโยชน์ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำและมีต้นทุนการผลิตสูงกว่า

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [12-13] และเทคโนโลยีการอบแห้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น พิศาล และคณะ (2560) [1] ได้ศึกษาและพัฒนาการอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากเตาชีวมวลทรงกระบอกเพื่อลดต้นทุนและเพิ่มผลผลิตให้กับเกษตรกรและวิสาหกิจชุมชน ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งพริกเหลือ 3-5 วัน ทำให้ความชื้นของพริกลดลงจนเหลือความชื้นสุดท้ายร้อยละ 8.13-10.17 (wb) ขณะที่ ยงยุทธ และคณะ (2564) [3] ได้ศึกษาการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 50–70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 1.0–2.0 เมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิและความเร็วลมที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon Heat Exchanger) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากอาศัยการเปลี่ยนสถานะของสารทำงานร่วมกับการไหลเวียนตามธรรมชาติภายในระบบ ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนเพิ่มเติม อีกทั้งยังสามารถนำความร้อนเหลือทิ้งจากปล่องไอเสียกลับมาใช้ในการอุ่นอากาศก่อนเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง [4] ส่งผลให้ลดการใช้พลังงาน เพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ และลดต้นทุนด้านพลังงานในการผลิตได้

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่างานวิจัยด้านการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการอบแห้งและแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรมีการประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและควบคุมสภาวะการอบแห้งอย่างต่อเนื่อง [6], [12] โดย Jengsooksawat et al. (2018) [11] ได้ศึกษาการติดตั้ง Loop Thermosyphon ร่วมกับ Vapor

Chamber ในเตาคั่วพริก เพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิ สมรรถนะทางความร้อน และการประหยัดพลังงาน โดยใช้น้ำเป็นสารทำงานที่อัตราการเติมร้อยละ 40 ขณะที่ พชร ว่องไพศาลกิจ และคณะ (2563) [15] ได้พัฒนาเครื่องอุ่นอากาศแบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับเครื่องอบแห้งพริก เพื่อเพิ่มอุณหภูมิและลดความชื้นของอากาศก่อนเข้าสู่ระบบอบแห้ง ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการนำความร้อนกลับมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการแปรรูปพริก อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวมีรูปแบบการประยุกต์ใช้และเงื่อนไขการทำงานแตกต่างจากงานวิจัยนี้ โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำความร้อนเหลือทิ้งจากก๊าซร้อนบริเวณปล่องไอเสียของเครื่องคั่วกลับมาใช้ประโยชน์ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน และบูรณาการร่วมกับระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของกระบวนการอบและคั่วพริก นอกจากนี้ยังศึกษาผลของ ชนิดสารทำงาน และอัตราการเติมสารทำงาน ที่มีผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนและการลดความชื้นของพริก ซึ่งช่วยให้สามารถกำหนดสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับระบบดังกล่าวได้ ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสภาวะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนและการออกแบบระบบคั่วและอบแห้งพริกที่มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถต่อยอดสู่การขยายขนาดเครื่องเพื่อรองรับกำลังการผลิตในระดับวิสาหกิจชุมชนและอุตสาหกรรมขนาดย่อม รวมถึงประยุกต์ใช้หลักการ นำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ (Waste Heat Recovery) กับกระบวนการอบแห้งและแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรชนิดอื่นที่มีลักษณะการให้ความร้อนและมีแหล่งความร้อนเหลือทิ้งในลักษณะใกล้เคียงกัน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนและประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องคั่วพริกแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน
2. เพื่อศึกษาผลของสารทำงาน และอัตราการเติมสารที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการคั่วพริกแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนภายในตู้อบแห้งแบบถังหมุน ประกอบด้วยห้องอบแห้งรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20.7 เซนติเมตร ความยาวของถังเท่ากับ 36.8 เซนติเมตร ด้านนอกของถังมีการหุ้มฉนวนความร้อนป้องการความร้อนสูญเสียจากระบบ เครื่องคั่วพริกแบบถังทรงกระบอกนี้ถูกติดตั้งบนฐานหมุน ที่ความเร็วรอบในการอบ 15 รอบต่อนาที โดยอาศัยมอเตอร์ขนาด 150 วัตต์ เป็นต้นกำลังในการขับให้ห้องอบแห้งเกิดการหมุน ดังแสดงในภาพที่ 2 ส่วนของถังเครื่องคั่วพริกให้ความร้อนโดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นแหล่งความร้อน 5,000 w และความเร็วของพัดลมที่ใช้ในกระบวนการ ซึ่งอ่านค่าผ่านเครื่องมือวัดความเร็วลมยี่ห้อ Testo รุ่น 416 ที่ค่าความแม่นยำ ±0.05 เปอร์เซ็นต์

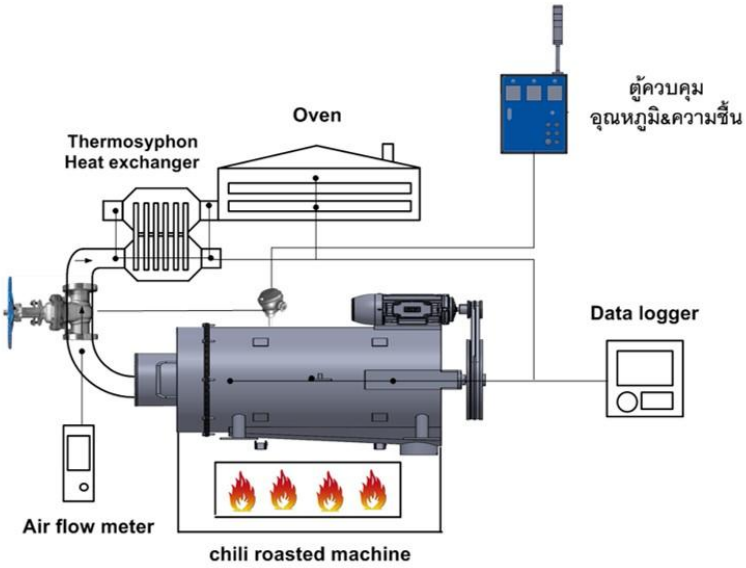


Figure 1 Schematic diagram of experimental set up

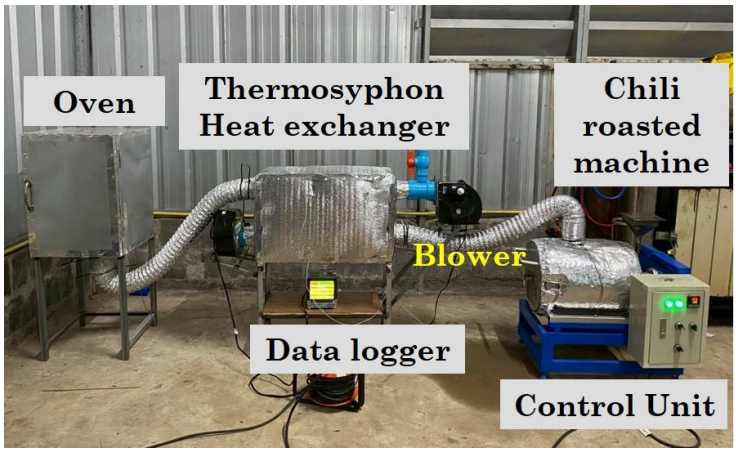


Figure 2 Experimental test rig of the temperature- and humidity-controlled chili roasting machine equipped with a thermosyphon heat exchanger, comprising an oven, blower, thermosyphon heat exchanger, chili roasting machine, data logger, and control unit.

Figure 1-2 แสดงไดอะแกรมการทดลอง ประกอบด้วย ตู้อบพริก เครื่องคั่วพริก และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เริ่มต้นให้ความร้อนที่เครื่องคั่วพริก ไอเสียและความร้อนที่เกิดขึ้นจะผ่านส่วนทำระเหยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและความร้อนจะทำให้สารทำงานที่ใช้ในการทดลองคือ สารทำความเย็น R134a, น้ำ และเอทานอล ที่อัตราส่วนการเติมสารทำงานร้อยละ 40, 50 และ 60 ของปริมาตรส่วนทำระเหย โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้รับความร้อนจากก๊าซร้อนจากปล่องไอเสียของเครื่องคั่วพริก เมื่อสารทำงานที่อยู่ภายในเดือดกลายเป็นไอเคลื่อนที่จากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นและถ่ายโอนความร้อนไปยังตู้อบพริกเพื่อลดความชื้น โดยการทดลองเตรียมพริกพันธุ์จินดา เลือกพริกที่มีสีแดงสดทั้งผลไม่มีรอยแผล ไม่มีร่อยรอยสัตว์กัด หรือแทะ และพริกไม่เน่าเสีย จากนั้นล้างด้วยน้ำประปาที่อุณหภูมิห้องให้สะอาดสองครั้ง แล้วผึ่งให้สะเด็ดน้ำ 15 นาที แล้วนำไปลวกในน้ำในที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนพริกพันธุ์จินดาแดงสด 500 กรัม ต่อน้ำ 2 ลิตร เป็นเวลา 3 นาที สำหรับการเพิ่มทุก ๆ 1 กิโลกรัม เพิ่มเวลาอีก 1-2 นาที นำขึ้นมาจาก

น้ำร้อนทิ้งให้สะเด็ดน้ำ 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำเข้าเครื่องอบแห้งให้ชั่งน้ำหนักก่อนและชั่งหลังหลังการอบแห้ง ทำเช่นนี้ตลอดการทดลองเพื่อหาอัตราการอบแห้ง

การทดสอบการอบแห้งพริกจากเครื่องอบแห้งพริกจินดาที่ใช้ทดสอบ 1,000 กรัม ทดสอบที่ความเร็วรอบ 15 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้ง ที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 77.63 (wb) ซึ่งอุณหภูมิจุดต่าง ๆ ถูกวัดโดยใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) เป็นเครื่องมือที่ใช้อ่านอุณหภูมิจากสายเทอร์โมคัปเปิ้ล ยี่ห้อ CHINO รุ่น KR200 มีช่วงการวัดอุณหภูมิ -200 ถึง 1370 องศาเซลเซียส ค่าความคลาดเคลื่อน ±1 องศาเซลเซียส และสายเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิด type K จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปใช้สำหรับหาค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนและผลของการอบแห้ง

- วิเคราะห์ผลค่าการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน การถ่ายเทความร้อน (Q_{exp}) หาได้จาก

$$Q_{exp} = \dot{m} C_p (T_{hot} - T_{cool}) \quad (1)$$

เมื่อ Q_{exp} คือ ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน (W)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารรับความร้อน (kg/s)

Cp คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารรับความร้อน (J/kg-°C)

T_{hot} คือ คือ อุณหภูมิขาออกของส่วนควบแน่น (°C)

T_{cool} คือ อุณหภูมิขาเข้าของส่วนควบแน่น (°C)

- วิเคราะห์ค่าความชื้นของพริกที่อัตราส่วนความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) คืออัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในผลิตภัณฑ์ต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์ชื้น ซึ่งเมื่อคูณด้วย 100 จะมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังนี้

$$W_b = \left(\frac{w_1 - w_2}{w_1} \right) x100 \quad (2)$$

เมื่อ W_b = เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก

w_1 = น้ำหนักเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ชื้น

w_2 = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์แห้ง

- การวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน [10] เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือและความสามารถในการทำซ้ำของผลการทดลอง ได้ดำเนินการทดลองซ้ำในแต่ละสภาวะการทดลองจำนวน N_e ครั้ง แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของผลการวัด ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$a_m = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{Ne} a_i \quad (3)$$

โดยที่ a_m คือ ค่าเฉลี่ยของผลการวัด, a_i คือ ค่าที่วัดได้จากการทดลองครั้งที่ i และ N_e คือ จำนวนครั้งของการทดลองซ้ำ

จากนั้นคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของผลการวัดแต่ละครั้ง โดยพิจารณาความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$\Delta a_i = \left| a_m - a_i \right| \quad (4)$$

โดยที่ Δa_i คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของผลการทดลองครั้งที่ i และคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากสมการ (5)

$$\overline{\Delta a} = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{Ne} \Delta a_i \quad (5)$$

ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ข้อผิดพลาดถูกกำหนดจากสมการ (6)

$$\%\text{Error} = \frac{\overline{\Delta a}}{a_m} x100 \qquad t \qquad (6)$$

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสำหรับประหยัดพลังงานของเครื่องคั่วพริก โดยสารทำงานภายในท่อเทอร์โมไซฟอน คือ น้ำ เอทานอล และ R134a โดยมีความมุ่งหมายเพื่อศึกษาเพื่อศึกษาผลของสารทำงานและอัตราการเติมสารที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และผลของการอบแห้ง ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

1. ผลของอุณหภูมิก๊าซร้อนต่อสภาวะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จาก Figure 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ป้อนเข้าสู่ส่วนทำระเหยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน กำหนดอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และอัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 ของปริมาตรส่วนทำระเหย โดยพิจารณาสารทำงาน 3 ชนิด ได้แก่ น้ำ (Water), เอทานอล (Ethanol) และ สารทำความเย็น R134a ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น และหลังจากนั้นมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยเมื่ออุณหภูมิก๊าซร้อนเพิ่มจาก 60 เป็น 80 และ 100 °C อุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญต่อระดับอุณหภูมิและการทำงานของเทอร์โมไซฟอน โดยที่อุณหภูมิก๊าซร้อน 60 °C อุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำงานทั้งสามชนิดมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 45–60 °C ขณะที่อุณหภูมิก๊าซร้อน 80 °C อุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วงประมาณ 80–90 °C และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิก๊าซร้อนเป็น 100 °C อุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 90–110 °C ทั้งนี้อุณหภูมิของสารทำงานทั้งสามชนิดมีแนวโน้มใกล้เคียงกันในแต่ละระดับอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมอุณหภูมิสามารถกำหนดและรักษาอุณหภูมิของแหล่งความร้อนก่อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างเหมาะสม

เมื่อพิจารณาร่วมกับสารทำงาน ได้แก่ น้ำ เอทานอล และ สารทำความเย็น R134a พบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก๊าซร้อนมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากการทดลองทุกเงื่อนไขใช้แหล่งความร้อนและสภาวะการควบคุมเดียวกัน ดังนั้น ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่พบในแต่ละสารทำงานจึงสามารถนำไปใช้วิเคราะห์อิทธิพลของคุณสมบัติของสารทำงานได้โดยลดผลกระทบจากความแตกต่างของอุณหภูมิแหล่งความร้อน [11]

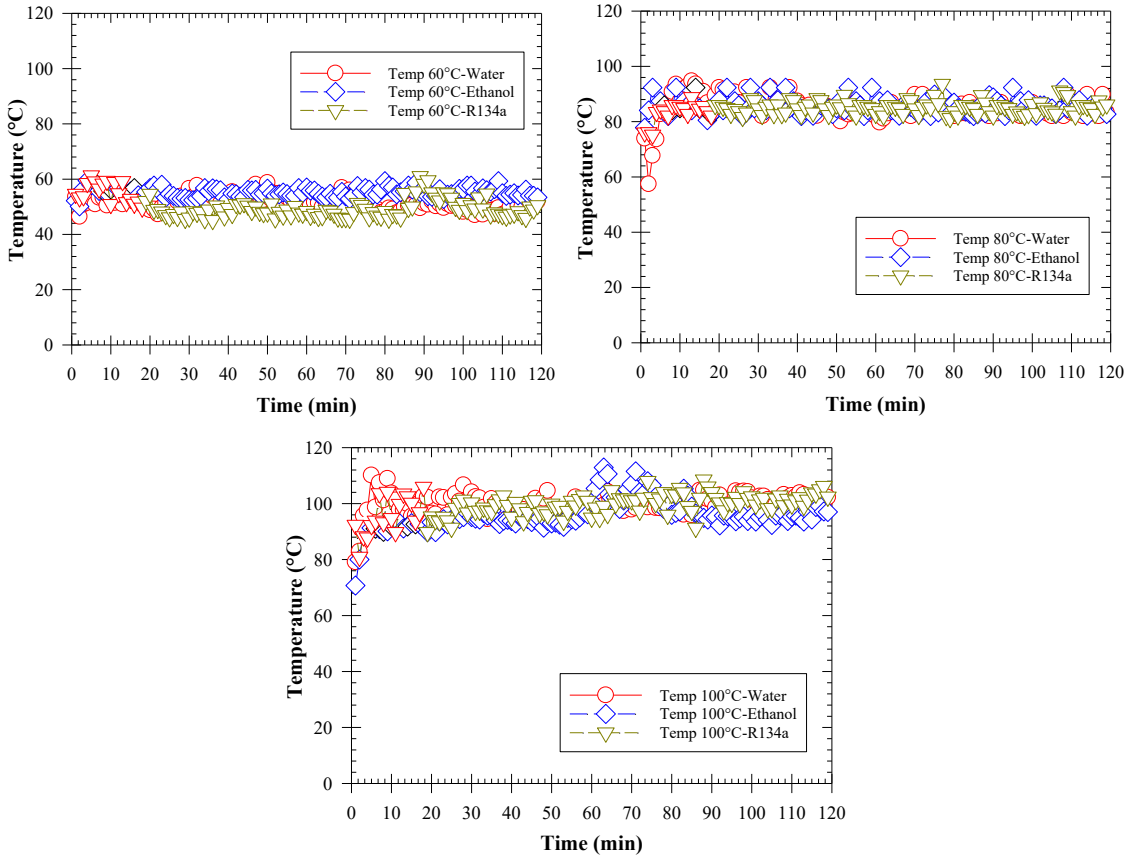


Figure 3 The relationship between the heating temperature used in the chili roaster and the temperature settings of the temperature control system at 60, 80, and 100 °C

2. อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จาก Figure 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดสารทำงานและอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 40, 50 และ 60 ของปริมาตรส่วนทำระเหย พบว่า เมื่ออุณหภูมิก๊าซร้อนเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกชนิดสารทำงานและทุกอัตราการเติมสาร ทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบริเวณส่วนทำระเหยทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น และส่งเสริมการระเหยของสารทำงานและการหมุนเวียนภายในเทอร์โมไซฟอน ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น [16] เมื่อพิจารณาผลของชนิดสารทำงาน ที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 40, 50 และ 60 ของปริมาตรส่วนทำระเหย พบว่า น้ำมีอัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 123.73, 135.02 และ 125.64 วัตต์ ขณะที่เอทานอลมีค่าเท่ากับ 129.37, 154.02 และ 142.00 วัตต์ และ สารทำความเย็น R134a มีค่าเท่ากับ 141.71, 160.33 และ 155.35 วัตต์ ตามลำดับ โดยสารทำความเย็น R134a ที่อัตราการเติมร้อยละ 50 ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 160.33 วัตต์ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำและเอทานอลที่อัตราการเติมเดียวกัน พบว่าสูงกว่า 18.75% และ 4.10% ตามลำดับ เนื่องจาก R134a จะมีจุดเดือดและอุณหภูมิการระเหยต่ำกว่าน้ำและเอทานอล ทำให้สามารถเกิดการเปลี่ยนสถานะภายใต้สภาวะการทำงานของระบบได้ง่าย และการหมุนเวียนของไอและของเหลวภายในเทอร์โมไซฟอน ส่งผลให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้ในอัตราที่สูงขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ Siriporn Setwong et al. (2014) [8] , [16] ที่พบว่า สารทำงาน R134a สามารถให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าน้ำและเอทานอลภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่กำหนด

นอกจากนี้ผลกระทบจากอัตราการเติมสารทำงาน พบว่าอัตราการเติมร้อยละ 50 ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด รองลงมาคือร้อยละ 60 และ 40 ตามลำดับ โดยอัตราการเติมสารร้อยละ 40 ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำที่สุดในทุกสภาวะการทดลอง เนื่องจากปริมาณสารทำงานที่น้อยเกินไปอาจไม่เพียงพอสำหรับการสร้างการไหลเวียนของสารทำงานระหว่างกระบวนการระเหยและการควบแน่นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความสามารถในการรับและส่งผ่านความร้อนลดลง ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มปริมาณสารทำงานจนถึงร้อยละ 50 ทำให้มีปริมาณสารเพียงพอสำหรับการเกิดวัฏจักรการระเหย–ควบแน่นและการไหลเวียนภายในเทอร์โมไซฟอนอย่างเหมาะสม จึงให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอัตราการเติมเป็นร้อยละ 60 อัตราการถ่ายเทความร้อนกลับลดลง ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณของเหลวที่มากเกินไปทำให้พื้นที่ว่างภายในท่อสำหรับการเคลื่อนที่ของไอและการไหลกลับของของเหลวลดลง และอาจเพิ่มโอกาสการเกิดภาวะ flooding ส่งผลให้การหมุนเวียนของสารทำงานและการถ่ายเทความร้อนถูกจำกัด

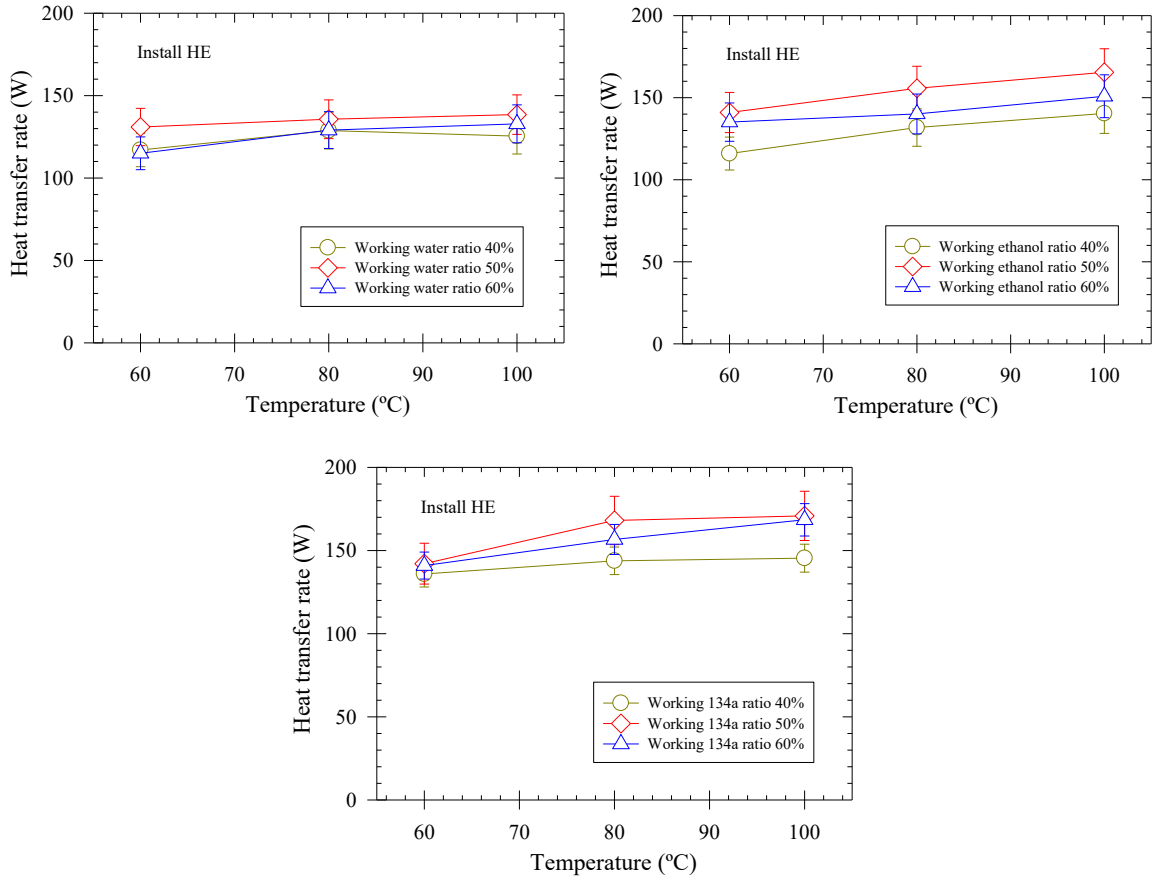


Figure 4 The relationship between the working fluid and the heat transfer rate of a heat exchanger at fluid ratio of 40%, 50%, and 60%

3. ผลกระทบของอุณหภูมิและสารทำงานที่มีผลต่อความชื้นสุดท้าย

Figure 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่าความชื้นโดยเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิและสารทำงานที่มีผลต่อความชื้น โดยกรณีไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อควบคุมความชื้นและอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลต่อค่าความชื้นของการอบแห้งและคั่วพริกตามไปด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณาที่อัตราการเติมสารที่ส่งผลต่อค่าความชื้นสุดท้าย ที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 40, 50 และ 60 ของปริมาตรส่วนทำระเหย ตามลำดับ พบว่ากรณีที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สารทำงาน คือ น้ำ มีค่าของความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 23.46-58.54, 15.17-54.92 และ 16.13-57.92 (wb) ตามลำดับ กรณีที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีค่าของความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 23.46-57.41, 13.46-54.29 และ 18.87-54.50 (wb) ตามลำดับ กรณีที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สารทำงาน คือ เอทานอล มีค่าของความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 29.93-59.63, 14.03-57.43 และ 15.98-56.26 (wb) ตามลำดับ กรณีที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีค่าของความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 25.65-54.23, 10.57-49.00 และ 16.76-50.05 (wb) ตามลำดับ กรณีที่ไม่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สารทำงาน คือ น้ำ มีค่าของความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 13.22-54.79, 10.48-50.60 และ 15.98-53.81 (wb) ตามลำดับ กรณีที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีค่าของความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 14.93-54.23, 11.32-52.49 และ 14.93-55.92 (wb) ตามลำดับ

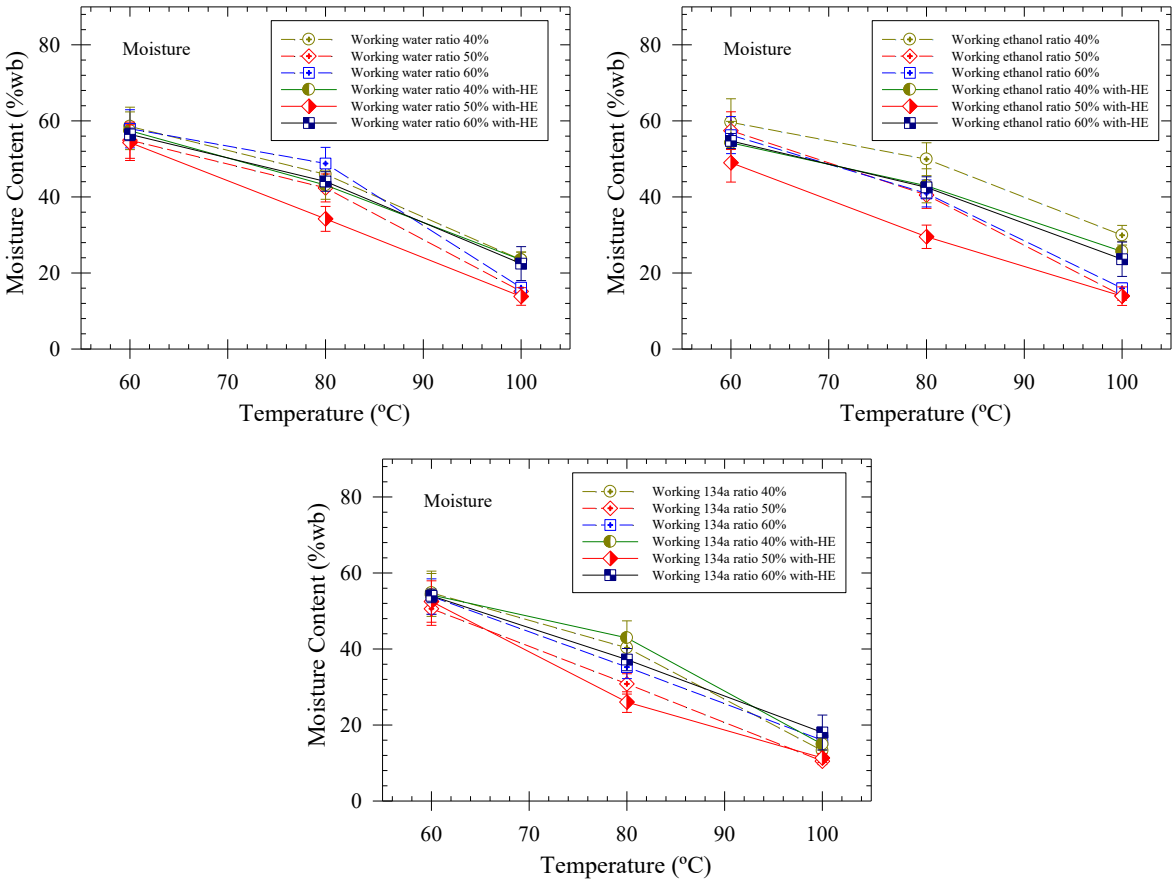


Figure 5 shows the trend in average moisture content during drying and roasting of chili peppers at different temperatures

เมื่อพิจารณาผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิอบแห้ง การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และอัตราการเติมสารทำงาน มีผลโดยตรงต่อการลดความชื้นสุดท้ายของพริก โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 60 องศาเซลเซียส เป็น 100 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสุดท้าย (%wb) จะลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกสภาวะเนื่องจากอัตราการระเหยของน้ำที่สูงขึ้น ซึ่งการทดลองในกรณีที่มีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Install-HE) สามารถลดความชื้นสุดท้ายได้ดีกว่ากรณีที่ไม่ติดตั้ง (Non-HE) ในทุกกรณี และเมื่อพิจารณาอัตราการเติมสารทำงานพบว่า อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 เป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Filling Ratio) ที่ช่วยให้ระบบเกิดวัฏจักรการระเหยและการควบแน่นภายในท่อได้อย่างสมดุล ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด [7] และสามารถลดความชื้นสุดท้ายลงได้ต่ำที่สุด เหลือประมาณร้อยละ 13 (wb) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในขณะที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 40 ปริมาณสารทำงานน้อยเกินไปจะทำให้เกิดสภาวะแห้งขอด (Dry-out) และปริมาณสารทำงานมากเกินไปที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 60 จะเพิ่มความต้านทานความร้อนภายในท่อ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดความชื้นลดลงตามลำดับ [9]

Table 1 The effect of moisture content and color quality of chili peppers when a heat exchanger is Install using additives at a 50% ratio

Type of working	Temperature (°C)	Moisture rate (%wb)		Chili color quality	
		Moisture Begin	Moisture Final	After leaving chili oven	After leaving chili roaster
Water	60	77.63	54.29		
	80	77.63	35.56		
	100	77.63	13.46		

Table 1 The effect of moisture content and color quality of chili peppers when a heat exchanger is Install using additives at a 50% ratio (ต่อ)

ype of working	Temperature (°C)	Moisture rate (%wb)		Chili color quality	
		Moisture Begin	Moisture Final	After leaving chili oven	After leaving chili roaster
Ethanol	60	77.63	49.00		
	80	77.63	29.53		
	100	77.63	10.57		
R134a	60	77.63	52.49		
	80	77.63	26.03		
	100	77.63	11.32		

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการอบแห้งและคั่วพริกที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส ร่วมกับอัตราการเติมสารทำงาน พบว่าอุณหภูมิและชนิดของสารทำงานมีผลต่อการลดความชื้นและคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ โดยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และอัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 เป็นสภาวะที่เหมาะสม (Optimum

condition) เนื่องจากสามารถลดความชื้นได้ในระดับเหมาะสม ขณะเดียวกันประเมินคุณภาพพริกจากการสังเกตลักษณะปรากฏ ยังคงรักษาสีแดงตามธรรมชาติและลักษณะโครงสร้างของพริกได้ดี โดยไม่เกิดการแปรเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มจากการไหม้ (Browning and Scorching) และรักษาโครงสร้างเนื้อเยื่อส่งผลให้อัตราการแตกหักของเมล็ดพริกต่ำที่สุด [2] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย สุห์ดี นิเซ็ง และคณะ (2562) [5] จาก Table 1 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 60 เป็น 80 และ 100 องศาเซลเซียส ความชื้นสุดท้ายของพริกลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 สารทำงาน น้ำ จะให้ค่าความชื้นสุดท้ายร้อยละ 54.29, 35.56 และ 13.46 (wb) ขณะที่เอทานอล จะให้ค่าความชื้นสุดท้ายร้อยละ 49.00, 29.53 และ 10.57 (wb) และ R134a จะให้ค่าความชื้นสุดท้ายร้อยละ 52.49, 26.03 และ 11.32 (wb) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและการระเหยของน้ำออกจากพริก ส่งผลให้ความชื้นสุดท้ายลดลง ขณะที่ชนิดของสารทำงานส่งผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน จึงทำให้ระดับการลดความชื้นแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การใช้อุณหภูมิสูงแม้ช่วยเร่งการลดความชื้น แต่มีแนวโน้มส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพของพริก โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงสีและการแตกหักของโครงสร้าง ดังนั้น การกำหนดสภาวะการอบแห้งและคั่วจึงควรพิจารณาควบคู่กันทั้งประสิทธิภาพการลดความชื้นและการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลการทดลองนี้ชี้ว่าอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 ให้ความสมดุลที่เหมาะสมระหว่างการลดความชื้นและการคงไว้ซึ่งคุณภาพทางกายภาพของพริก

สรุปผล

จากการศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องคั่วพริกแบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน โดยทำการทดสอบแปรเปลี่ยนชนิดสารทำงาน คือ น้ำ, เอทานอล และ สารทำความเย็น R134a ที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 40, 50 และ 60 ของปริมาตรส่วนทำระเหย และอุณหภูมิอบแห้งที่ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1) สมรรถนะเชิงความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิของก๊าซร้อนจากเครื่องคั่วพริกส่งผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะเพิ่มผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย (Temperature Difference) ซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนหลักในการถ่ายเทความร้อน ทั้งนี้อัตราการเติมสารทำงานที่ร้อยละ 50 เป็นอัตราการเติมที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Filling Ratio) ที่ช่วยให้ระบบเกิดวัฏจักรการระเหยและการควบแน่นภายในท่อได้อย่างสมดุลที่สุด ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงในทุกช่วงอุณหภูมิ โดยสารทำงานชนิดสารทำความเย็น R134a ให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 160.33 วัตต์ รองลงมาคือ เอทานอล 154.02 วัตต์ และน้ำ 135.02 วัตต์ ตามลำดับ ในขณะที่การเติมสารทำงานน้อยเกินไปที่ 40 เปอร์เซ็นต์ จะเกิดสภาวะแห้งขอด (Dry-out) และการเติมมากเกินไปที่อัตราการเติมสารร้อยละ 60 จะเพิ่มความต้านทานความร้อนภายในท่อและลดระยะเวลาพำนัก (Residence time) ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง

2) การอบแห้งและการลดความชื้น การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Install-HE) สามารถลดความชื้นสุดท้ายได้ดีกว่ากรณีไม่ติดตั้ง (Non-HE) ในทุกเงื่อนไขการทดลอง เนื่องจากมีการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ โดยสภาวะที่ให้อัตราการอบแห้งและลดความชื้นสุดท้ายได้ต่ำที่สุด ประมาณร้อยละ 13 (wb) คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50

3) การรักษาคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์จากการประเมินคุณภาพพริกจากการสังเกตลักษณะปรากฏ เมื่อพิจารณาคุณภาพของพริกหลังผ่านกระบวนการคั่วและอบแห้ง พบว่าสภาวะที่เหมาะสม (Optimum condition) ในการรักษาคุณภาพทางกายภาพ คือ การอบแห้งและคั่วพริกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 ซึ่งช่วยรักษาเสถียรภาพของค่าสีผิวสัมผัสให้คงโทนสีแดงสว่างตามธรรมชาติ โดยไม่แปรเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มจากการไหม้ (Browning and Scorching) และรักษาโครงสร้างเนื้อเยื่อส่งผลให้อัตราการแตกหักของเมล็ดพริกต่ำที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากการวิจัย จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน งบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund; FF) จัดสรรงบประมาณจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ 2568 และหน่วยวิจัยระบบของไหลและวิศวกรรมทางความร้อน (TEF) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร สำหรับสถานที่และอุกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

1. พิศาล สมบัติวงค์, จักรพันธ์ โสมะเกษตริน, อรทัย จำปาใด, ประภัสวรรณ สวัสดิ์วงษ์, กนกกาญจน์ จิรศิริเลิศ. การศึกษาและพัฒนาการอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อมจากเตาชีวมวลทรงกระบอกเพื่อลดต้นทุนและเพิ่มผลผลิตให้กับเกษตรกรและวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดศรีสะเกษ. สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว); .2560. https://elibrary.tsri.or.th/fullP/RDG60T0104/RDG60T0104_full.pdf
2. ศิรินุช จินดารักษ์, กลยุทธ ทะกอง. เครื่องอบแห้งและคั่วพริกแบบถังหมุน. ในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 ประจำปี 2557, 12-14 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล, ประจวบคีรีขันต์; หน้า 361-367. http://repository.rmutr.ac.th/123456789/150
3. ยงยุทธ ใต้เงาสน. การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร (ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้; 2564. http://mdc.library.mju.ac.th/thesis/2565/yongyoot_taingaoson/fulltext.pdf
4. สัณหวัจน์ ทองแดง, สมพร หงษ์กง, สุริยา โชคเพิ่มพูน, สุรเชรษฐ์ สีชำนาญ. เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้รางพาราโบลิคร่วมกับท่อแก้วสุญกาศ. ในการประชุมวิชาการระดับชาตินนทรีอีสาน ครั้งที่ 10 ประจำปี 2565, 26 พฤศจิกายน 2565 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ, จังหวัดสกลนคร; หน้า 465-473. https://kukr.lib.ku.ac.th/PNEC/Detail/20018146
5. สุห์ดี นิเซ็ง, ภาณุมาศ สุยบางดำ, กฤษณพงศ์ สังขวาสี, สุพัตรา เพ็งเกลี้ยง. การศึกษาผลของขนาดช่องระบายความชื้นสำหรับการอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานผสมผสาน. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย. 2562, 11(1). 158-168. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsvrj/article/view/182221
6. Zhen Tong, Zekun Han, Chunxue Fang, Xinran Wen. Two-phase thermosyphon loop with different working fluids used in data centers. Int. J. Heat Mass Transf. 2023; 214. 124393. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124393
7. Siyu Qin, Yijia Liu, Guoqiang Huang, Huile Duan, Junwei Su, Zhaolin Gu, Chun Yang, Liwen Jin. Experimental study of boiling heat transfer enhancement in compact thermosyphon with surface modification. Appl. Therm. Eng. 2026; 302. 131909. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.131909

8. Shaowei Yang, Xiangji Guo a, Zhangchi Liu, Hengxuan Xu, Bo Zhang, Shibo Tian. Experimental research on the heat transfer and flow characteristics of the flat plate loop thermosyphon under high heat flux density and wide filling ratio. Int. J. Heat Mass Transf. 2026; 269. 129161. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.129161
9. Yichuan He, Taipu Hao, Mamookho Elizabeth Makhatha, Yanhui Feng, Lin Qiu. Heat transfer and instability characteristics of a two-phase thermosiphon loop with wide range of filling ratios. Int. Commun. 2026; 174. 110938. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.110938
10. S. Chokphoemphun, S. Eiamsa-ard, P. Promvonge, S. Thongdaeng, S. Hongkong. Heat transfer of a coil-tube heat exchanger in the freeboard zone of a rice husk fluidized-bed combustor, Int. Comm. Heat Mass Tran. 2021, 127. 105462. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105462
11. S. Jengsooksawat, S. Rittidech, K. Booddachan. Loop Thermosyphon with Vapor Chamber Installation for Energy Thrift in a Chilli Oven. J. Eng. Thermophys. 2018, 27(1). 119-135. https://link.springer.com/article/10.1134/S1810232818010125
12. V.M. Aguiar, G.A. Bartmeyer, L. Krambeck, P.H.D. Santos, T. Antonini Alves. Thermal Analysis of a Finned Thermosyphon for Heat Exchanger Applications. IRJAES. 2018, 5(1). 18-21. https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.5.1.4
13. Chen, J., Cen, J., Huang, W., Jiang, F. Multiphase flow and heat transfer characteristics of an extra-long gravity-assisted heat pipe: an experimental study. Int. J. Heat Mass Transf. 2021, 164. 120564. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120564
14. Omer Bilgic, Hakan Çelebi, V. Erbil Karakus, Mustafa Ozdemir. Experimental investigation of a header-integrated thermosyphon heat exchanger for sealed enclosure cooling. Appl. Therm. Eng. 2026, 295. 130608. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.130608
15. พชร ว่องไพศาลกิจ, กระวี ตรีอำนรรค, เทวรัตน์ ตรีอำนรรค. การอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำร่วมกับเครื่องอุ่นอากาศแบบเทอร์โมอิเล็กทริก. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร. 2563, 14(1). 82-96. https://doi.org/10.14456/jrmutp.2020.8
16. Siriporn Setwong, Teerapat Chompookham, Pattanapol Meena. Experimental study of working fluids in thermosyphon heat exchanger with annular fins for thermal performance enhancement. Journal of Science and Technology Mahasarakham University. 2014, 33(2), 185-190. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/scimsujournal/article/view/19588?utm_source=chatgpt.com

บทความวิจัย (Research article)

ปริมาณผลได้และสมบัติของถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็ก โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้า

Product Yield and Characterization of Biochar from Senna Siamea via Slow Pyrolysis Process

ณภัทร อาวะแสง[1] พีรพัฒน์ คำชูราษฎร์[1] จุฑามาศ พะโนราช[1] สายัญ พันธ์สมบูรณ์[1],
ปิยะฉัตร วิริยะอำไพวงศ์[1] อัดชา เหมันต์[2] ภัคคิป ไกรโสดา[2] หอมหวน ตาสาโรจน์[2] และ โกศล เรืองแสน[2*]
Napat Arwasang[1], Peeraphat Khamchoorat[1], Jutamas Panorah[1], Sayun Phansomboon[1],
Piyachat Wiriyaampaiwong[1], Adcha Heman[2], Pakkip Kraisoda[2], Homhuan Tasarod[2] and Koson Rueangsan[2*]

[1]คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
[2]คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
[1]Faculty of Agricultural Technology, Kalasin University
[2]Faculty of Engineering and Industrial, Kalasin University
*Corresponding author; email: ruangsan_19@hotmail.com

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
24 มีนาคม 2569	21 สิงหาคม 2569	24 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณผลได้และสมบัติของถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 200 ลิตร ภายใต้สภาวะจำกัดออกซิเจน และควบคุมอุณหภูมิการไพโรไลซีสอยู่ที่ 500 องศาเซลเซียส จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณผลได้ของถ่านชีวภาพ แก๊ส และน้ำส้มควันไม้ มีค่าเท่ากับร้อยละ 46.15, 52.54 และ 1.31 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพ พบว่า ค่าความชื้นร้อยละ 2.47 ปริมาณสารระเหยร้อยละ 14.11 ปริมาณเถ้าร้อยละ 4.63 คาร์บอนคงที่ร้อยละ 78.79 โดยน้ำหนัก และค่าความร้อนสูง 26.48 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช. 657/2547) นอกจากนั้นยังพบว่าอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณผลได้ โดยอัตราการให้ความร้อนในระดับต่ำถึงปานกลางช่วยเพิ่มปริมาณถ่านชีวภาพและลดการสูญเสียคาร์บอน และถ่านชีวภาพที่ได้มีคุณภาพเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินและเชื้อเพลิง

คำสำคัญ: ชีวมวล, ถ่านชีวภาพ, ไม้ขี้เหล็ก, ไพโรไลซีแบบช้า, ค่าความร้อนสูง

Abstract

This study focused on examining the yield and characteristics of biochar derived from Siamese cassia wood via a slow pyrolysis method in a 200 L reactor under oxygen-restricted conditions at a pyrolysis temperature of 500 °C. The findings showed that the yields of biochar, gas, and wood vinegar were 46.15, 52.54, and 1.31% by weight, respectively. The analysis of the generated biochar indicated that the moisture level, volatile matter, ash percentage, fixed carbon, and higher heating value were recorded at 2.47, 14.11, 4.63, 78.79% by weight, and 26.48 MJ/kg, respectively. These characteristics met the Thai Community Product Standard for cooking charcoal (TCPS 657/2547), demonstrating the superior quality of the produced biochar. Moreover, the pyrolysis temperature and heating rate were recognized as crucial elements affecting product yield. Heating rates that are low to moderate increased biochar production while reducing carbon loss throughout the pyrolysis process. The results indicate that biochar obtained from Siamese cassia wood shows significant promise for use as a soil amendment and a substitute solid fuel for community-level purposes.

Keyword: Biomass, Biochar, Senna siamea, Slow pyrolysis, Higher heating value

บทนำ

พลังงานชีวมวลเป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา เช่น ประเทศไทย ซึ่งมีทรัพยากรชีวมวลจากภาคเกษตรและป่าไม้เป็นจำนวนมาก การนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงานไม่เพียงช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล แต่ยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและป่าไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1, 2] ไม้ขี้เหล็ก (Senna siamea) เป็นไม้เนื้อแข็งที่พบกระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย โดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคเหนือ และภาคกลาง มีการใช้ประโยชน์ทั้งในด้านไม้แปรรูป เชื้อเพลิง และไม้ให้ร่มเงา ส่งผลให้เกิดเศษไม้จากการตัดแต่งและการแปรรูปเป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชีวภาพได้อย่างต่อเนื่อง [3] ไม้ขี้เหล็กมีองค์ประกอบทางเคมีเฉลี่ยประกอบด้วยเซลลูโลสประมาณร้อยละ 43–47 เฮมิเซลลูโลสประมาณร้อยละ 22–26 และลิกนินประมาณร้อยละ 28–32 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งลิกนินในสัดส่วนค่อนข้างสูงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มผลได้ของถ่านชีวภาพและปริมาณคาร์บอนคงที่หลังผ่านกระบวนการไพโรไลซีส [4, 5] กระบวนการไพโรไลซีสแบบช้า (slow pyrolysis) เป็นกระบวนการแปรสภาพชีวมวลด้วยความร้อนภายใต้สภาวะจำกัดออกซิเจน โดยใช้อัตราการให้ความร้อนต่ำและเวลาพำนักนาน ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นถ่านชีวภาพในปริมาณสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็ว [6] ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซีสประกอบด้วยถ่านชีวภาพ น้ำมันชีวภาพหรือน้ำส้มควันไม้ และแก๊สเชื้อเพลิง โดยสัดส่วนของผลผลิตขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และเวลาพำนัก [7]

จากการศึกษางานวิจัยในช่วง 3 ปีที่ผ่านมา (2022–2025) พบว่า มีการศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลประเภทไม้หลายชนิดด้วยกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้า โดยมีรายงานการศึกษาชีวมวลจากไม้เนื้อแข็งและการพัฒนาการผลิตถ่านชีวภาพ [8] รวมถึงการผลิตถ่านชีวภาพจากไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus spp.) [9] ขณะที่การศึกษาผลของอุณหภูมิไพโรไลซีสต่อผลได้และสมบัติทางกายภาพเคมีของถ่านชีวภาพจากชีวมวลประเภทไม้รายงานว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์และคุณภาพของถ่านชีวภาพ [10] นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาความก้าวหน้าของกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าสำหรับชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเพื่อการผลิตถ่านชีวภาพอย่างยั่งยืน [11] ผลการศึกษาที่ผ่านมาสะท้อนให้เห็นว่า ชนิดและองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ตลอดจนอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และระยะเวลาพำนัก

เป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมผลได้และสมบัติของถ่านชีวภาพ นอกจากนี้ การเพิ่มอุณหภูมิการไพโรไลซีสทำให้ผลได้ของถ่านชีวภาพลดลง ขณะที่ผลได้ของแก๊สและของเหลวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแตกตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินมีความสมบูรณ์มากขึ้น [7, 10] ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมามีการผลิตถ่านชีวภาพจากไม้หลายชนิด แต่ข้อมูลเกี่ยวกับการผลิตถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กในเครื่องปฏิกรณ์ระดับกึ่งอุตสาหกรรมขนาด 200 ลิตร ยังมีจำกัด โดยเฉพาะข้อมูลเกี่ยวกับการกระจายผลผลิตและสมบัติทางเชื้อเพลิงของถ่านชีวภาพ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตในระดับชุมชนและอุตสาหกรรม ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญ (Research significance) เนื่องจากเป็นการศึกษาปริมาณผลได้ของถ่านชีวภาพ แก๊ส และน้ำส้มควันไม้จากไม้ขี้เหล็กภายใต้กระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร พร้อมทั้งวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของถ่านชีวภาพ เพื่อสร้างฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตถ่านชีวภาพ การใช้ประโยชน์เศษไม้ในระดับชุมชน และการสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพและเศรษฐกิจหมุนเวียน (BCG Economy) ของประเทศไทย

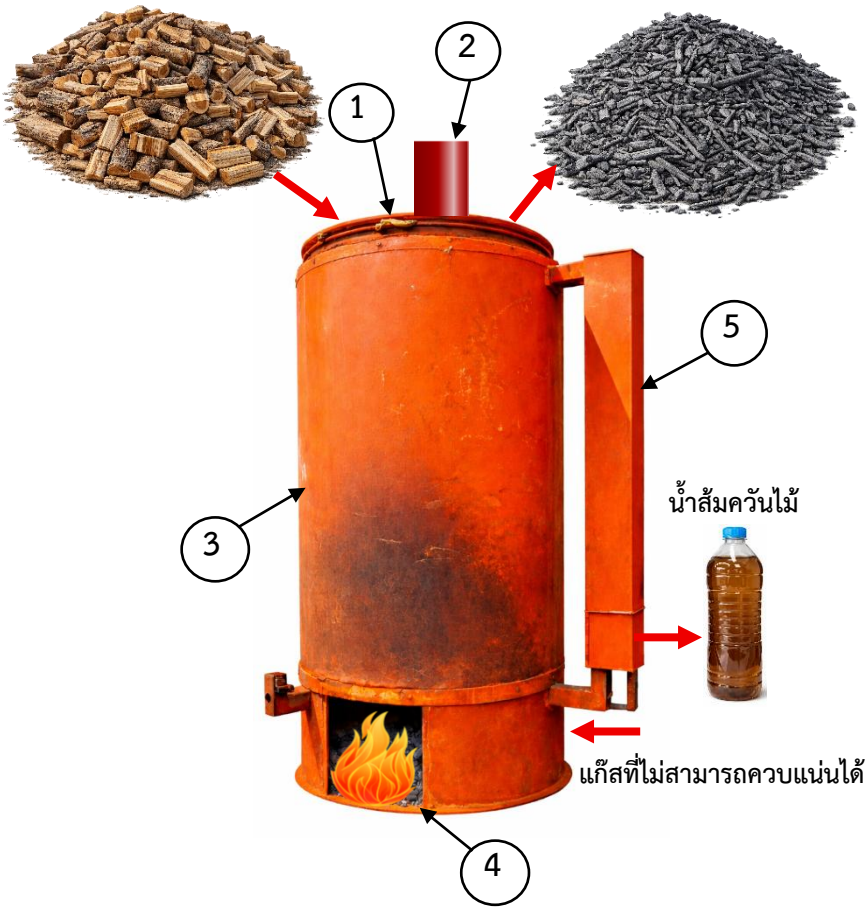
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าของไม้ขี้เหล็ก
2. เพื่อศึกษาสมบัติของถ่านชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าของไม้ขี้เหล็ก

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การวิเคราะห์สมบัติของไม้ขี้เหล็ก ในงานวิจัยนี้ใช้ไม้ขี้เหล็กในพื้นที่มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ (16°26'48.4"N 103°32'06.7"E) โดยคัดเลือกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8-12 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ซึ่งไม้ขี้เหล็กที่ใช้ในการทดลองไพโรไลซีสจำนวน 260 กิโลกรัม จากนั้นนำตัวอย่างของไม้ขี้เหล็กทำการบดละเอียดให้มีขนาด 0.2-0.5 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติพื้นฐาน ได้แก่ ปริมาณความชื้น สารระเหย เถ้า คาร์บอนคงที่ และค่าความร้อนสูง (HHV) ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 1

2. ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซีสแบบช้า ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซีสแบบช้าที่สร้างขึ้นที่มีขนาดความจุ 200 ลิตร ประกอบด้วย หมายเลข 1 ชุดฝาปิดเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซีสแบบช้า มีหน้าที่ปิด-เปิดเพื่อนำถ่านไม้ฟืนเข้าและนำถ่านชีวภาพออก และป้องกันไม่ให้อากาศรั่วเข้าไปได้ในขณะเวลาเกิดการไพโรไลซีส หมายเลข 2 ท่อนำความร้อน เพื่อให้ความร้อนเกิดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอภายในห้องไพโรไลซีส หมายเลข 3 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซีสเป็นห้องสำหรับให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยเคมีความร้อนของไม้ขี้เหล็กให้กลายเป็นถ่านชีวภาพ หมายเลข 4 ช่องใส่เชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซีส หมายเลข 5 ชุดควบแน่นน้ำส้มควันไม้ เป็นชุดควบแน่นด้วยน้ำลักษณะท่อสองชั้น เพื่อควบแน่นแก๊สให้เป็นน้ำส้มควันไม้ ส่วนแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้จะถูกวนกลับไปเผาไหม้อีกครั้งในห้องเผาไหม้ รายละเอียดดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซีสแบบช้า

3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง การวิเคราะห์ผลการทดลองเป็นการวิเคราะห์ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์และสมบัติของถ่านชีวภาพ ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ปริมาณถ่านชีวภาพ น้ำส้มควันไม้ และแก๊ส สามารถคำนวณได้ดังสมการ 1-3 [12] ดังนี้

$$Y_{biochar} = \left[\frac{\sum W_{biochar}}{W_{biomass}}\right] \times 100\% \quad (1)$$

$$Y_{Wood\ Vinegar} = \left[\frac{\sum W_{Wood\ Vinegar}}{W_{biomass}}\right] \times 100\% \quad (2)$$

$$Y_{gas} = 100 - Y_{biochar} - Y_{Wood\ Vinegar} \quad (3)$$

กำหนดให้

$Y_{biochar}$ = ปริมาณผลได้ของถ่านชีวภาพ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

$Y_{Wood\ Vinegar}$ = ปริมาณผลได้ของน้ำส้มควันไม้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Y_{gas} = ปริมาณผลได้ของแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
$W_{biochar}$ = น้ำหนักถ่านชีวภาพที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลกรัม)
$W_{Wood\ Vinegar}$ = น้ำหนักของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการควบแน่น (กิโลกรัม)
$W_{biomass}$ = น้ำหนักของชีวมวลที่ใช้ไป (กิโลกรัม)

3.2 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวลและถ่านชีวภาพ

1. ปริมาณความชื้น (Moisture content) การวเคราะห์ความชื้นดำเนินการ ตามมาตรฐาน ASTM D 3173 [13] ด้วยการใช้ตัวอย่างจำนวน 1 กรัม อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักก่อนและหลังอบ จากนั้นคำนวณหาร้อยละของความชื้น

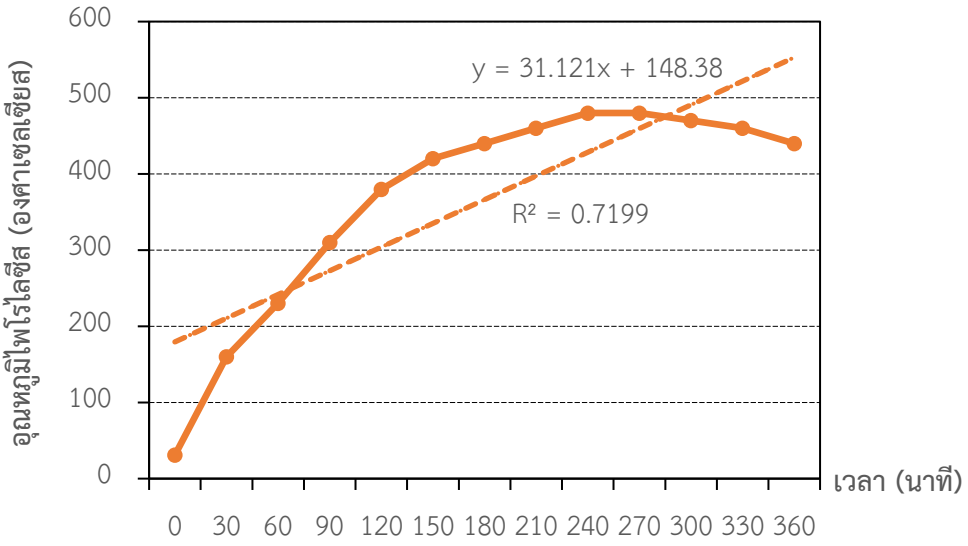
2. ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย ตามมาตรฐาน ASTM D 3175 [14] ด้วยการเผาตัวอย่างจำนวน 1 กรัม เผาในเตาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที จากนั้นคำนวณหาร้อยละของสารระเหย

3. ปริมาณเถ้า (Ash) การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ตามมาตรฐาน ASTM D 3174 [15] ด้วยการใช้ตัวอย่างจำนวน 1 กรัม เผาในเตาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นคำนวณหาร้อยละของเถ้า

4. ค่าความร้อนสูง (High calorific value) การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง ตามมาตรฐาน ASTM D 5865 [16] ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์รุ่น Art.2060/2070 bomb calorimeter บริษัท Essom Co., Ltd. ประเทศไทย

ผลการวิเคราะห์การทดลอง

1. ผลการวิเคราะห์อัตราการให้ความร้อนพบว่า ในการทดลองครั้งนี้ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ โดยกำหนดอุณหภูมิสูงสุดของกระบวนการไพโรไลซีสไว้ที่ 500 องศาเซลเซียส จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา พบว่า ในช่วง 0–120 นาที อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการกำจัดความชื้นและเริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบที่ระเหยได้ของชีวมวล [6] ในช่วง 120–240 นาที อัตราการเพิ่มอุณหภูมิลดลงอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง พร้อมกับการปลดปล่อยสารระเหยและแก๊สที่สามารถติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง โดยสภาวะการให้ความร้อนอย่างช้าและสม่ำเสมอเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอไนเซชันและการคงเหลือของคาร์บอนในรูปถ่านชีวภาพ [18] เมื่ออุณหภูมิไพโรไลซีสเพิ่มขึ้น ผลได้ของถ่านมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์และปฏิกิริยาการแตกตัวทุติยภูมิ ส่งผลให้คาร์บอนบางส่วนเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สและสารระเหยมากขึ้น [17] Demirbas รายงานว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อผลได้ของถ่านจากการไพโรไลซีสของชีวมวล โดยการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ผลได้ของถ่านลดลง [17] ขณะที่ Tripathi และคณะ รายงานว่าอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และเวลาพำนักเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่กำหนดทั้งผลได้และสมบัติของถ่านชีวภาพ [18] นอกจากนี้ การเพิ่มความรุนแรงของสภาวะไพโรไลซีสยังส่งผลให้ถ่านมีสัดส่วนคาร์บอนคงที่และความเป็นอะโรมาติกสูงขึ้น เนื่องจากการกำจัดสารระเหยและองค์ประกอบที่มีออกซิเจนออกจากโครงสร้างของชีวมวล [6] นอกจากนั้นยังพบว่า อัตราการให้ความร้อนมีความแปรปรวนของข้อมูลอยู่ที่ร้อยละ 71.99 แสดงได้ว่าอัตราการให้ความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซีสอย่างมีนัยสำคัญ สรุปโดยรวมแล้วกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร ควรใช้อัตราการให้ความร้อนในระดับต่ำถึงปานกลาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดการสูญเสียพลังงาน และได้ถ่านชีวภาพที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งานเป็นพลังงานและการปรับปรุงดิน รายละเอียดดังภาพที่ 2

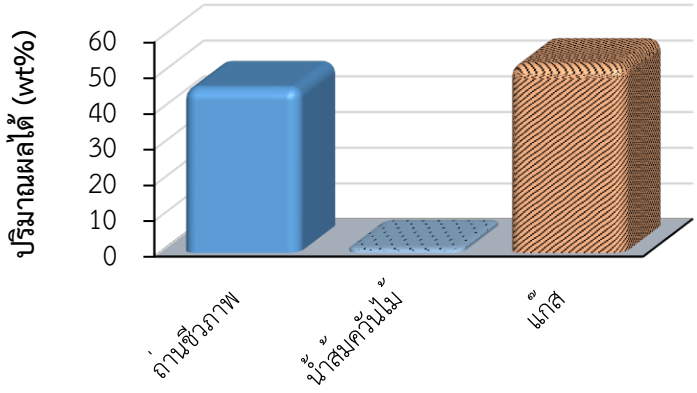


ภาพที่ 2 อัตราการให้ความร้อนในกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้า

2. ผลการวิเคราะห์ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

การไพโรไลซีสแบบช้าของไม้ขี้เหล็ก ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์หลัก 3 ส่วน ได้แก่ ถ่านชีวภาพ น้ำส้มควันไม้ และแก๊ส ดังภาพที่ 3 จากการทดลอง พบว่า ถ่านชีวภาพมีสัดส่วนคิดเป็นร้อยละ 46.15 โดยน้ำหนัก ส่วนของน้ำส้มควันไม้คิดเป็นร้อยละ 1.31 โดยน้ำหนัก และส่วนที่เหลือเป็นแก๊สคิดเป็นร้อยละ 52.54 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าที่ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จะเป็นของแข็งประมาณร้อยละ 40–60 โดยน้ำหนัก [6, 7] อาจเป็นผลมาจากไม้ขี้เหล็กมีปริมาณลิกนินค่อนข้างสูงและโครงสร้างของเซลลูโลสมีความคงที่ ซึ่งลิกนินมีความทนทานต่อการสลายตัวทางความร้อนมากกว่าเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสหลังเกิดการไพโรไลซีส [5] นอกจากนั้นยังพบว่า การไพโรไลซีสแบบช้าของไม้เนื้อแข็งที่มีอัตราการให้ความร้อนต่ำสม่ำเสมอและทำให้เนื้อไม้มีเวลาพักตัวที่นาน ส่งผลให้ในกระบวนการไพโรไลซีสลดการแตกตัวกลายเป็นแก๊สและทำให้ปริมาณคาร์บอนในรูปของถ่านชีวภาพมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณถ่านชีวภาพของการไพโรไลซีสแบบช้าสูงกว่าการไพโรไลซีสแบบเร็ว ซึ่งถ่านชีวภาพที่ได้เหมาะสำหรับการดูดซับมลพิษ การกักเก็บคาร์บอน การกักเก็บพลังงาน และการปรับปรุงดิน โดยช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน เพิ่มการอุ้มน้ำ และการเกิดจุลินทรีย์ [7, 21]

ส่วนน้ำส้มควันไม้ที่ได้มีปริมาณค่อนข้างต่ำคิดเป็นร้อยละ 1.31 อาจเป็นผลมาจากอัตราการควบแน่นต่ำ อุณหภูมิที่ใช้สูงเกินไปในบางช่วง และการสูญเสียสารระเหยไปกับแก๊ส จึงทำให้ประสิทธิภาพของการควบแน่นลดลง ซึ่งในช่วงอุณหภูมิ 400–500 องศาเซลเซียส จะควบแน่นได้ปริมาณของเหลวสูงสุด [6] ส่วนแก๊สที่มีปริมาณค่อนข้างสูงคิดเป็นร้อยละ 52.54 โดยน้ำหนัก อาจเป็นผลมาจากการแตกตัวของสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิสูง จึงทำให้เกิดการแตกสลายเป็นแก๊สมากเกินไป ซึ่งแก๊สส่วนนี้ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และ ไฮโดรเจน [6, 19] โดยรวมแล้วกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าผลผลิตส่วนใหญ่จะเป็นถ่านชีวภาพมากกว่าผลิตภัณฑ์อื่น ซึ่งถ่านชีวภาพที่ได้มีคุณภาพดีเหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงและวัสดุปรับปรุงดิน



ภาพที่ 3 ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพ การวิเคราะห์ผลการทดลองของถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็ก ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า ปริมาณคาร์บอนคงที่ ค่าความหนาแน่น และค่าความร้อนสูง รายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของไม้ขี้เหล็กและถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์สมบัติ	**ไม้ขี้เหล็ก**	**ถ่านชีวภาพไม้ขี้เหล็ก**	**มาตรฐาน (มผช.657/2547)** [20]
ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	15.48±0.2	2.47±0.1	ไม่เกินร้อยละ 10
ปริมาณสาระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	52.51±0.1	14.11±0.4	ไม่เกินร้อยละ 25
ปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	10.68±0.4	4.63±0.1	ไม่เกินร้อยละ 8
ปริมาณคาร์บอนคงที่* (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	21.33	78.79	-
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	342±0.4	428±0.1	-
ค่าความร้อน (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)	11.97	26.48	ไม่น้อยกว่า 25.12

*คำนวณจากค่าความแตกต่าง

ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กพบว่า มีปริมาณความชื้นร้อยละ 2.47 โดยน้ำหนัก ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนประเภทถ่านไม้หุงต้ม (มผช. 657/2547) ที่กำหนดให้มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก [20] และอยู่ในช่วงร้อยละ 1–15 ที่รายงานโดย Verheijen และคณะ [21] ปริมาณความชื้นที่ต่ำสะท้อนถึงประสิทธิภาพของกระบวนการไพโรไลซีสในการกำจัดน้ำออกจากโครงสร้างของชีวมวล และเป็นคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากช่วยลดพลังงานที่สูญเสียไปกับการระเหยของน้ำในระหว่างการเผาไหม้

ปริมาณสารระเหยของถ่านชีวภาพมีค่าเท่ากับร้อยละ 14.11 โดยน้ำหนัก ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ มผช. 657/2547 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 25 [20] และอยู่ภายในช่วงร้อยละ 0–40 ที่รายงานโดย Verheijen และคณะ [21] การลดลงของสารระเหยเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบไม้ขี้เหล็กแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ถูกกำจัดออกในระหว่างกระบวนการไพโรไลซีส ส่งผลให้สัดส่วนของคาร์บอนคงที่ในผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของถ่านชีวภาพที่มีความเสถียรทางความร้อนและเหมาะสมต่อการใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง

ปริมาณเถ้าของถ่านชีวภาพมีค่าเท่ากับร้อยละ 4.63 โดยน้ำหนัก ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มผช. 657/2547 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 8 [20] และใกล้เคียงกับช่วงร้อยละ 0.5–5 ที่รายงานโดย Verheijen และคณะ [21] ปริมาณเถ้าที่ค่อนข้างต่ำเป็นคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน เนื่องจากช่วยลดปริมาณสารอนินทรีย์ตกค้างภายหลังการเผาไหม้ และลดปัญหาที่อาจเกิดจากการสะสมของเถ้าในระบบการใช้เชื้อเพลิง

ปริมาณคาร์บอนคงที่ พบว่า มีค่าสูงถึงร้อยละ 78.79 โดยน้ำหนัก และอยู่ในช่วงร้อยละ 50–90 ที่รายงานโดย Verheijen และคณะ [21] คาร์บอนคงที่ในระดับสูงแสดงถึงการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนภายหลังการกำจัดความชื้นและสารระเหยออกจากชีวมวลในระหว่างการไพโรไลซีส ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความเสถียรของถ่านชีวภาพและสมบัติด้านพลังงาน นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กมีความหนาแน่นเท่ากับ 428 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value; HHV) เท่ากับ 26.48 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนประเภทถ่านไม้หุงต้มที่กำหนดค่าความร้อนไว้ไม่น้อยกว่า 25.12 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [20] ค่าความร้อนสูงดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณคาร์บอนคงที่ที่สูงและปริมาณความชื้นที่ต่ำของถ่านชีวภาพ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าภายใต้สภาวะที่ศึกษาสามารถยกระดับสมบัติด้านเชื้อเพลิงของไม้ขี้เหล็กได้อย่างชัดเจน

โดยภาพรวม ถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กที่ผลิตด้วยกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้ามีค่าความชื้น สารระเหย เถ้า และค่าความร้อนเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน มผช. 657/2547 [20] ขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงที่สูงถึงร้อยละ 78.79 แสดงถึงระดับการคาร์บอไนเซชันที่ดี ผลการศึกษาจึงสนับสนุนศักยภาพของไม้ขี้เหล็กในการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตถ่านชีวภาพที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง

สรุปผล

การศึกษาปริมาณผลได้และสมบัติของถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กด้วยกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร ภายใต้สภาวะจำกัดออกซิเจนและอุณหภูมิการไพโรไลซีส 500 องศาเซลเซียส พบว่า กระบวนการดังกล่าวให้ผลิตภัณฑ์ 3 ส่วน ได้แก่ ถ่านชีวภาพ แก๊ส และน้ำส้มควันไม้ โดยมีผลได้ร้อยละ 46.15, 52.54 และ 1.31 โดยน้ำหนักตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสภาวะการไพโรไลซีสที่ใช้สามารถเปลี่ยนไม้ขี้เหล็กให้เป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอนแข็งได้ในสัดส่วนค่อนข้างสูง ขณะที่สัดส่วนของน้ำส้มควันไม้ที่ต่ำสะท้อนถึงข้อจำกัดด้านการควบแน่นของสารระเหยภายใต้ระบบที่ทำการศึกษา ส่วนอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แสดงให้เห็นว่าอัตราการให้ความร้อนมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล โดยช่วงต้นของกระบวนการเกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ซึ่งสัมพันธ์กับการกำจัดความชื้นและการปลดปล่อยสารระเหย ขณะที่ช่วงถัดมามีอัตราการให้ความร้อนต่ำถึงปานกลางและเกิดการคายแก๊สอย่างต่อเนื่อง สภาวะดังกล่าวเอื้อต่อการคงเหลือของคาร์บอนในรูปถ่านชีวภาพ ทั้งนี้ ผลการศึกษาสนับสนุนว่าอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ควรควบคุมในการดำเนินกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้า เพื่อให้ได้ผลผลิตถ่านชีวภาพในระดับที่เหมาะสม

ด้านสมบัติของผลิตภัณฑ์ ถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กมีความชื้นร้อยละ 2.47 สารระเหยร้อยละ 14.11 เถ้าร้อยละ 4.63 และคาร์บอนคงที่ร้อยละ 78.79 โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่น 428 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าความร้อนสูง 26.48 เมกะจูลต่อกิโลกรัม โดยค่าความชื้น สารระเหย เถ้า และค่าความร้อนเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนประเภทถ่านไม้หุงต้ม (มผช. 657/2547) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าสามารถเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนคงที่ ลดความชื้นและสารระเหย และยกระดับสมบัติด้านพลังงานของไม้ขี้เหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยสรุป ไม้ขี้เหล็กมีศักยภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร โดยผลิตภัณฑ์ถ่านที่ได้มีสมบัติด้านเชื้อเพลิงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและมีศักยภาพสำหรับการ

ใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง การศึกษานี้จึงสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพระบบไพโรไลซีสในระดับชุมชนและการขยายขนาดการผลิตในอนาคตได้

กิตติกรรมประกาศ

ทีมวิจัยขอแสดงความขอบคุณต่อกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (MHESI), กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (NSRF), สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (TSRI), สำนักงานเร่งรัดการวิจัยและนวัตกรรมเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันและการพัฒนาพื้นที่ (องค์การมหาชน) (RCAD) และหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนาพื้นที่ (PMU A) สำหรับการสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ยังขอขอบคุณมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ที่ได้จัดเตรียมสถานที่และสนับสนุนกิจกรรมการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2025. Paris: IEA; 2025. https://iea.blob.core.windows.net/assets/d2923e0f-89de-468b-9e05-8f682839240b/WorldEnergyOutlook2025.pdf
2. REN21. Renewables 2024 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat; 2024. https://www.ren21.net/gsr-2024/
3. กรมป่าไม้. รายงานสถานการณ์ทรัพยากรป่าไม้ประเทศไทย พ.ศ. 2567. กรุงเทพฯ: กรมป่าไม้; 2567. https://forestinfo.forest.go.th/Content/file/stat2567/Royal%20Forest%20Department%20statistics%202024.pdf
4. Rowell RM, editor. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. 1st Edition. Boca Raton: CRC Press; 2005. DOI: https://doi.org/10.1201/9780203492437
5. Yang H, Yan R, Chen H, Lee DH, Zheng C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel. 2007; 86 :1781-1788. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013
6. Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. 4th ed. Academic Press; 2018. https://shop.elsevier.com/books/biomass-gasification-pyrolysis-and-torrefaction/basu/978-0-443-13784-6
7. Lehmann J, Joseph S. Biochar for Environmental Management. 3rd ed. Routledge; 2024. DOI: https://doi.org/10.4324/9781003297673
8. Wang K, Remón J, Jiang Z, Ding W. Recent advances in the preparation and application of biochar derived from lignocellulosic biomass: A mini review. Polymers. 2024; 16(6): 851. DOI: https://doi.org/10.3390/polym16060851
9. Savrinda C, Said M, Bahrin D, Maheshwari S, Siswanto S. Production, characterization, and application of biochar derived from Eucalyptus pellita bark waste for soil quality improvement. Ecological Engineering & Environmental Technology. 2026; 27(1): 425-441. DOI:https://doi.org/10.12912/27197050/215919

10. Sun J, He F, Pan Y, Zhang Z. Effects of pyrolysis temperature and residence time on physicochemical properties of different biochar types. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science. 2017; 67(1): 12-22. DOI:https://doi.org/10.1080/09064710.2016.1214745
11. Tan H, Lee CT, Ong PY, Wong KY, Bong CP, Li C, Gao Y. A review on the comparison between slow pyrolysis and fast pyrolysis on the quality of lignocellulosic and lignin-based biochar. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2021 Feb 1 (Vol. 1051, No. 1, p. 012075). IOP Publishing. DOI:https://doi.org/10.1088/1757-899X/1051/1/012075
12. Rueangsan K, Kraisoda P, Heman A, Tasarod H, Wangkulangkool M, Trisupakitti S, Morris J. Bio-oil and char obtained from cassava rhizomes with soil conditioners by fast pyrolysis. Heliyon. 2021; 7(11). e08291. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08291
13. ASTM D 3173. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. ASTM International. 100 Barr Harbor Drive. PO Box C700. West Conshohocken. United States. 2026; PA 19428-2959. https://store.astm.org/d3173-11.html
14. ASTM D 3175. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. ASTM International. 100 Barr Harbor Drive. PO Box C700. West Conshohocken. United States. 2026; PA 19428-2959. https://store.astm.org/d3175-20.html
15. ASTM D 3174. Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. ASTM International. 100 Barr Harbor Drive. PO Box C700. West Conshohocken. United States. 2026; PA 19428-2959. https://store.astm.org/d3174-12r18e01.html
16. ASTM D 5865. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. ASTM International. 100 Barr Harbor Drive. PO Box C700. West Conshohocken. United States. 2019; PA 19428-2959. https://store.astm.org/d5865_d5865m-19.html
17. Demirbas A. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. Journal of analytical and applied pyrolysis. 2004; 72(2): 243-248. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.07.003
18. Tripathi M, Sahu JN, Ganesan P. Effect of process parameters on biochar production from biomass: A review. Renew Sustain Energy Rev. 2016; 55: 467-481. DOI:https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122
19. Bridgwater AV. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass Bioenergy. 2012; 38: 68-94. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411000638
20. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านไม้หุงต้ม (มผช. 657/2547). กรุงเทพมหานคร; 2547. https://www.tisi.go.th/website/about/mpc
21. Verheijen FGA, Jeffery S, Bastos AC, van der Velde M, Diafas I. Biochar Application to Soils: A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. Luxembourg: European Commission; 2010. DOI: https://dx.doi.org/10.2788/472

บทความวิจัย (Research Article)

อิทธิพลของความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้ต่อสมบัติทางไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด

Influence of sliding velocity and applied load on the tribological properties of ultra-high molecular weight polyethylene.

วิโรจน์ ฉัตรเกษ[1] ไพศาล แก่นนาดี[2] และ มงคล กาสีวงค์[3*]

Wirot Chudget[1], Phaisan Kaennadee[2] and Mongkol Kaseewong[3*]

[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมและนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

[3]สาขาวิชาเครื่องกล (ช่างอากาศยาน) วิทยาลัยการบิน การศึกษา และวิจัยนานาชาติ มหาวิทยาลัยนครพนม

[1]Faculty of Industrial Technology, Nakhon Phanom University

[2]Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

[3]International Aviation Education and Research Academy, Nakhon Phanom University

[*]Corresponding author; email: mongkol_kaseewong@npu.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
7 มิถุนายน 2569	15 กันยายน 2569	18 กันยายน 2569

บทคัดย่อ

กระบวนการกัดปาดผิวสำเร็จด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องจักรสำหรับอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนต่ำ และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้ต่อสมบัติไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด เกรด U511 โดยเตรียมตัวอย่าง UHMWPE ด้วยการอัดขึ้นรูป และดำเนินการกัดปาดผิวสำเร็จด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี จากนั้นทำการทดสอบการสึกหรอแบบบล็อกออนริ่งภายใต้สภาวะแบบแห้ง โดยควบคุมความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้ในการทดสอบ ทั้งนี้ ได้ทำการวัดอุณหภูมิของตัวอย่าง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และอัตราการสึกหรอ ผลการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามภาระโหลดที่สูงขึ้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอยู่ในช่วง 0.010 ถึง 0.058 ขณะที่อัตราการสึกหรอแปรผันระหว่าง 3.615×10^{-10} ถึง 9.156×10^{-10} mm^3/Nm การเพิ่มความเร็วในการเลื่อนและภาระโหลดแรงกดทำให้เกิดความร้อนสะสมบริเวณผิวสัมผัสจากการเสียดทาน ส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวของชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้นจาก 25 องศาเซลเซียส และมีค่าสูงสุด 55 องศาเซลเซียส หลังจากเลื่อนไป 2000 เมตร อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวลง เนื่องจากความร้อนและส่งเสริมการสึกหรอแบบยึดติด นอกจากนี้ สภาพพื้นผิวที่มีความหยาบมากขึ้นยังส่งผลให้เกิดการสึกหรอในระยะเริ่มต้นสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการก่อตัวของชั้นถ่ายโอนผิวสัมผัสมีแนวโน้มช่วยให้พฤติกรรมการสึกหรอมีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: สมบัติไตรโบโลยี, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน, อัตราการสึกหรอ, อุณหภูมิตัวอย่าง, พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด

Abstract

The CNC milling process for surface finishing has been widely used in manufacturing of machine components for the food processing industry due to its high efficiency, low cost, and ability to accurately produce complex geometries with high dimensional accuracy. This research investigates the effects of sliding velocity and applied load on the tribological properties of ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE), grade U511. The UHMWPE specimens were fabricated by compression molding, followed by surface finishing using CNC milling. Wear tests were conducted using a block-on-ring configuration under dry conditions, with controlled sliding velocities and normal loads. The specimens' temperature of the coefficient of friction (COF), and wear rate were measured. The results showed that both the COF and wear rate increased with increasing applied load. The COF ranged from 0.010 to 0.058, while the wear rate ranged from 3.615×10^{-10} to 9.156×10^{-10} mm³/Nm. Increasing sliding speed and load promoted frictional heating, raising the surface temperature from 25°C to a maximum of 55°C after 2000 m of sliding. The elevated temperature induced thermal softening of the material and promoted adhesive wear. In addition, rougher surface conditions contributed to higher initial wear; however, the formation of a transfer layer tended to stabilize the wear behavior over time.

Keywords: Tribological Properties, COF, Wear rate, Specimen temperature, UHMWPE

บทนำ

พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (Ultra-high molecular weight polyethylene; UHMWPE) เป็นเทอร์โมพลาสติกทางวิศวกรรมที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้ในงานด้านการผลิตชิ้นส่วนประกอบเครื่องจักรและระบบกลไกเคลื่อนที่ [1-2] โดยมีการประยุกต์ใช้งานทั่วไปในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น แบริ่ง ลูกล้อ เฟือง [3-4] รวมถึงอุปกรณ์ในระบบของไหล เช่น ใบพัดเรือ ปั๊ม และกังหันไฮดรอลิก [5] เนื่องจากวัสดุนี้มีคุณสมบัติที่โดดเด่น เช่น ความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดีเยี่ยม ความสามารถในการหล่อลื่นด้วยตัวเอง (self-lubrication) ทนต่อแรงกระแทกสูง และทนต่อสารเคมี [5-6] จึงถูกนำมาใช้ทดแทนโลหะดั้งเดิม เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม และทองเหลือง [7] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่ต้องการลดแรงเสียดทาน ลดการสึกหรอ และเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนในระบบวิศวกรรม

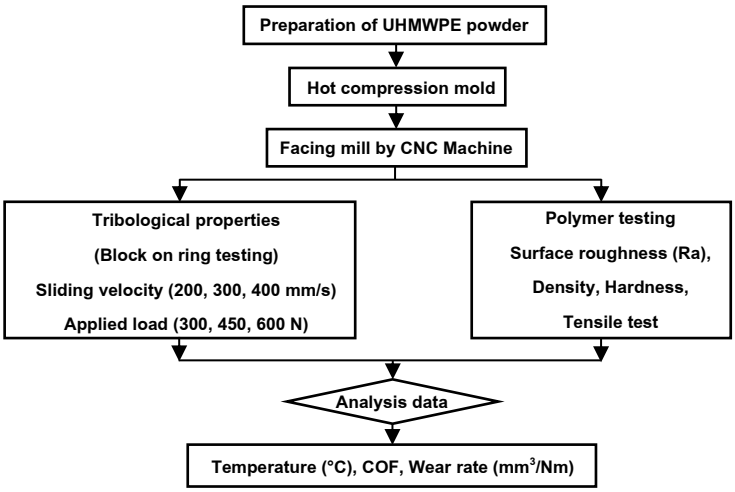
อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริงของชิ้นส่วนเครื่องกล มักต้องเผชิญกับการเคลื่อนที่แบบไป-กลับ หรือการหมุนด้วยความเร็วในการเลื่อนต่ำและภาระโหลดที่แตกต่างกัน [8] ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะก่อให้เกิดการเสียดสีระหว่างพื้นผิวคู่สัมผัสและแรงเสียดทาน [9] ปรากฏการณ์ดังกล่าวมีบทบาทสำคัญต่อการสะสมความเสียหาย การสึกหรอ และการเสื่อมสภาพของวัสดุ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออายุการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบเสียดทานแห้งของคู่สัมผัสต่างชนิดวัสดุ [10] ในบริบทนี้ พฤติกรรมไตรโบโลยีของ UHMWPE ขึ้นอยู่กับสภาพพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะความหยาบผิวที่เกิดจากกระบวนการผลิตหรือการเตรียมผิวก่อนการทดสอบ พื้นผิวใหม่ที่ได้จากการตัดเฉือน (newly generated surface) มักมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากพื้นผิวขัดเงา ซึ่งอาจส่งผลต่อกลไกการสัมผัสและการถ่ายโอนฟิล์มสึกหรอในระบบพอลิเมอร์–โลหะ (เช่น UHMWPE กับ เหล็กกล้าจากปลอกแบริ่ง) ทั้งนี้พฤติกรรมดังกล่าวสามารถศึกษาได้จากการทดสอบสมบัติไตรโบโลยีด้วยวิธีบล็อกออนริ่ง (Block on ring) [11-12]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่านักวิจัยส่วนใหญ่จะเลือกวิธีการเตรียมพื้นผิวตัวอย่างก่อนการทดสอบการสึกหรอโดยใช้วิธีการขัดเงาด้วยกระดาษทรายละเอียด (เบอร์ 1000 และ 1500) ผลการตรวจสอบพบว่าวัสดุคอมโพสิตมีค่าความหยาบผิว

(Ra) 0.8 ไมโครเมตร (μm) [11] อย่างไรก็ตาม การควบคุมค่าความหยาบผิวของตัวอย่างวงแหวน (Ring) ที่ผลิตจากเหล็ก 45 (S45C) ผ่านการขัดผิวด้วยกระดาษทรายโลหะวิทยา (SiC) มีค่าความหยาบผิว 1.3 μm และก้อนสี่เหลี่ยม (Block) พอลิเมอร์จากพอลิเอไมด์ เกรด PA6 และ UHMWPE มีค่าความหยาบผิว 0.6 μm เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของความเข้มสนามแม่เหล็กต่อสมบัติทางด้านแรงเสียดทานในสภาพแวดล้อมน้ำบริสุทธิ์และน้ำทะเล [12] นอกจากนี้ ยังพบการขัดเงาด้วยน้ำยาผสมผงเพชรขนาดอนุภาค 1 μm และ 0.5 μm เพื่อให้พื้นผิวสุดท้ายมีความขรุขระน้อยที่สุด พบว่า UHMWPE บริสุทธิ์มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of Friction; COF) สูง เมื่อเทียบกับวัสดุคอมโพสิต แต่มีเส้นโค้งที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นเรียบกว่าเส้นโค้งอื่นๆ มาก [13] นอกจากการขัดผิวแล้ว ยังมีการเตรียมพื้นผิวด้วยกรับวนการตัดเฉือน โดยที่ Basuki และ Ismail [14] รายงานว่าการกัดปาดผิว UHMWPE บริสุทธิ์ด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีภายใต้สภาวะการตัดที่เหมาะสมสามารถให้ค่าความหยาบผิวต่ำกว่า 2 μm ได้ ในขณะที่ Song และคณะ [15] ได้ทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิกส์ (Pin on disc) ในสภาวะแบบแห้ง พบว่าสภาวะการตัดเฉือนมีผลต่อโครงสร้างผิวและชั้นใต้ผิวของ UHMWPE ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดทานและความต้านทานการสึกหรอภายใต้การเลื่อนแบบไปกลับในสภาวะแห้ง (Dry test)

อย่างไรก็ตาม วิธีการเตรียมพื้นผิวดังกล่าวอาจไม่สะท้อนสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้นของชิ้นส่วนที่ผ่านกระบวนการตัดเฉือนเนื้อวัสดุ UHMWPE ที่มีความเหนียวเป็นพิเศษด้วยเครื่องมือตัด ซึ่งอาจเกิดเป็นรอยคลื่นบนผิวสำเร็จตามการเดินผ่านขอบคมตัดและเป็นสาเหตุสำคัญที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบริเวณใกล้ ๆ พื้นผิวของคู่สัมผัส จากเหตุผลดังกล่าว พบว่างานวิจัยทางด้านไตรโบโลยี ส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการวัดเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (COF) อัตราการสึกหรอ(Wear rate) [12-13] ลักษณะพื้นผิว (Surface morphology) [16] และความหยาบผิว (Surface roughness) [17] อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบริเวณใกล้พื้นผิวสัมผัสที่เกิดจากแรงเสียดทานยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างเพียงพอ โดยเฉพาะในกรณีของ UHMWPE ที่ผลิตด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression molding) และผ่านการตัดเฉือนจริง ซึ่งส่งผลให้เกิดลักษณะพื้นผิวและค่าความหยาบผิวที่แตกต่างกัน พื้นผิวดังกล่าวมีความสำคัญต่อการศึกษาพฤติกรรมการเสียดทานและการสึกหรอ เนื่องจากสะท้อนสภาวะการใช้งานทางวิศวกรรมได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าพื้นผิวที่ถูกเตรียมขึ้นสำหรับการทดสอบโดยเฉพาะ ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้ต่อสมบัติไตรโบโลยีของ UHMWPE บริสุทธิ์ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยการกัดปาดผิวละเอียด (Finishing) รวมถึงศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของคู่สัมผัสต่างชนิด โดยใช้วิธีการทดสอบแบบบล็อกออนริงภายใต้สภาวะแบบแห้ง นอกจากนี้ ยังมีการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตัวอย่างกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และอัตราการสึกหรอ เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการสึกหรอและพฤติกรรมการเสียดทานของ UHMWPE ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง

วิธีดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง

วัสดุ

ผง UHMWPE U511 ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 150 μm และน้ำหนักมวลโมเลกุล 5.5x10^6 กรัมต่อโมลเลกุล (g/mol) ดังแสดงในภาพที่ 1 (a) ได้จาก IRPC Public Company limited [18]

การเตรียมตัวอย่าง

ผง UHMWPE ถูกเทลงในแม่พิมพ์เพื่ออัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมพื้นผ้า มีขนาดมิติ 80x160x15 มิลลิเมตร (mm) ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (ยี่ห้อ Yong Fong Machine) ดังแสดงในภาพที่ 1 (b) โดยแม่พิมพ์ได้ผ่านกระบวนการให้ความร้อนจนถึง 190 องศาเซลเซียส (°C) แรงดันในการอัด 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (Kg/cm^2) และคงเวลาไว้ 60 นาที (min) จากนั้นปิดระบบความร้อนและแม่พิมพ์ถูกปล่อยให้เย็นตัวลงเองจนถึงอุณหภูมิห้อง [17]

ตัวอย่างถูกกัดปาดผิวละเอียดด้วยดอกเอ็นมิล (End mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร จำนวน 2 คมตัด ด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีแนวตั้ง 3 แกน ยี่ห้อ Cyclone รุ่น VMC-610 ในขณะกัดปาดผิว ใช้ลมเป่าเพื่อระบายความร้อนและช่วยคายเศษที่เกิดจากการตัดเฉือน ดังแสดงในภาพที่ 1 (c) และวัดค่าความหยาบผิวด้วยเครื่องความหยาบผิว ยี่ห้อ LANDTEK รุ่น SRT-6100 ซึ่งมีค่าความหยาบผิวของตัวอย่าง 1.1536 ± 0.0854 μm เพื่อให้สอดคล้องกับกระบวนการผลิตชิ้นส่วนประกอบเครื่องจักรด้วยเครื่องมือกลพื้นฐานทั่วไป จากนั้น ตัดเป็นก้อนสี่เหลี่ยมขนาดมิติ (กว้างxยาวxสูง) 10x10x10 ลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm^3) และเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 1 (d) เพื่อวัดอุณหภูมิของตัวอย่างในขณะทดสอบการสึกหรอเพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานทั่วไป

นอกจากนี้ วงแหวนที่ใช้เป็นวัสดุเหล็กกล้าจากปลอกแบริ่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62 มิลลิเมตร ความกว้าง 21.25 มิลลิเมตร และพื้นผิวมีความหยาบผิว 0.2 μm อย่างไรก็ตาม ก่อนตัวอย่าง UHMWPE ได้ทำการตรวจสอบสมบัติพอลิเมอร์พื้นฐาน ได้แก่ การวัดความหนาแน่นตาม ASTM D792 โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ NADE รุ่น FA2104 วัดความแข็งดูโรมิเตอร์แบบสเกลชอร์ดี ตาม ASTM 2240 โดยใช้เครื่องวัดความแข็งดูโรมิเตอร์ Teclock รุ่น GS702N Type D และทดสอบแรงดึงตาม ASTM D638 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Lloyd รุ่น LR10K Plus เพื่อประเมินค่าความต้านทานแรงดึง ยังโมดูลัส และอัตราการยืดตัว ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติพอลิเมอร์

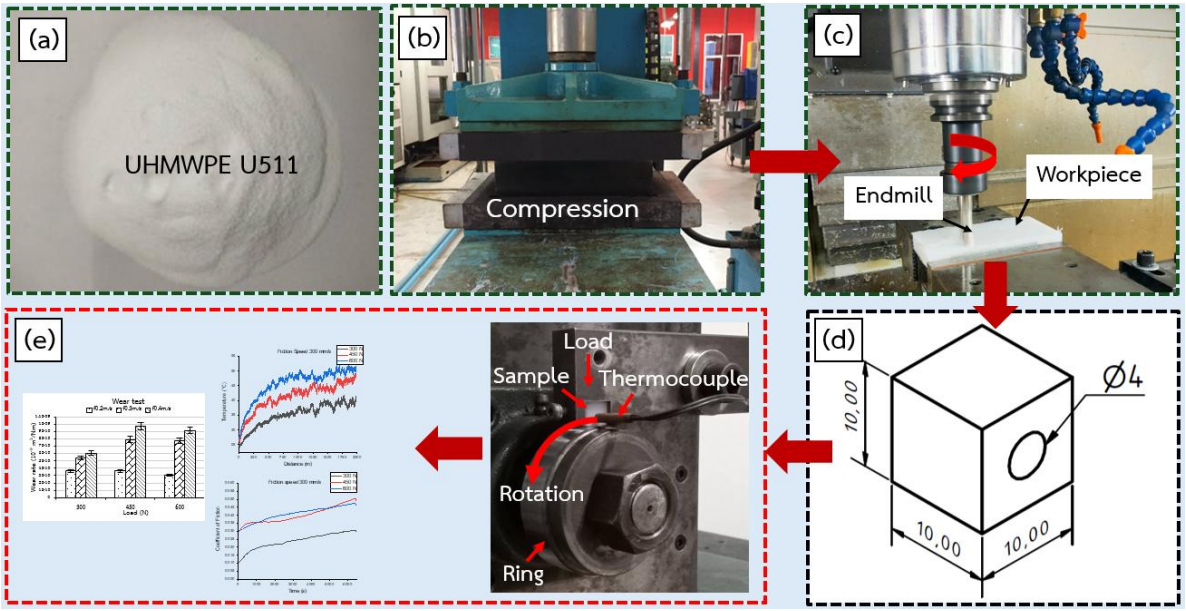
	UHMWPE (U511)
Density (g/cm^3)	0.92
Tensile strength (MPa)	36.72
Young's Modulus (MPa)	631.74
Elongation at break (%)	336.71
Hardness (Shore D)	59
Molecular weight (10^6g/mol)	5.5
Average Particle size (μm)	150

การทดสอบสมบัติไตรโบโลยี

การวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of Friction ; COF) โดยใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบบล็อกออนริ่ง (Block on ring wear test) ตาม ASTM G77 [18] ดังแสดงในภาพที่ 1 (e) โดยกำหนดปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย แรงกดบนพื้นผิวตัวอย่าง (Applied load) 300 450 และ 600 นิวตัน (N) ความเร็วในการเลื่อน (Sliding velocity) 200 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) และระยะทาง (Distance) 2000 เมตร (m) ภายในสภาพแวดล้อมปกติ ภายใต้สภาวะแบบแห้ง [21] และวัดค่าอุณหภูมิของตัวอย่างโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Type K) ในขณะทดสอบ หลังจากนั้น ตัวอย่างถูกชั่งน้ำหนักที่สูญเสียด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลแบบละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง เพื่อนำค่าน้ำหนักที่สูญเสียไปหาอัตราการสึกหรอ (Wear rate; mm^3/Nm) ตามที่แสดงในสมการที่ (1) [9, 20] นอกจากนี้ ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง UHMWPE หลังทดสอบการสึกหรอถูกนำมาตรวจสอบและวิเคราะห์พื้นผิวคู่สัมผัส โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ของ Dino lite รุ่น AM4115ZT

$$Wear\ rate = \frac{\Delta m}{\rho F_N D} \quad (1)$$

โดยที่ Δm คือ น้ำหนักที่สูญเสียของตัวอย่าง กรัม (*g*) ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (*g/cm^3*) F_N คือ แรงกดที่ใช้หรือภาระโหลดปกติ นิวตัน และ *D* คือ ระยะทางการเลื่อน เมตร [20]



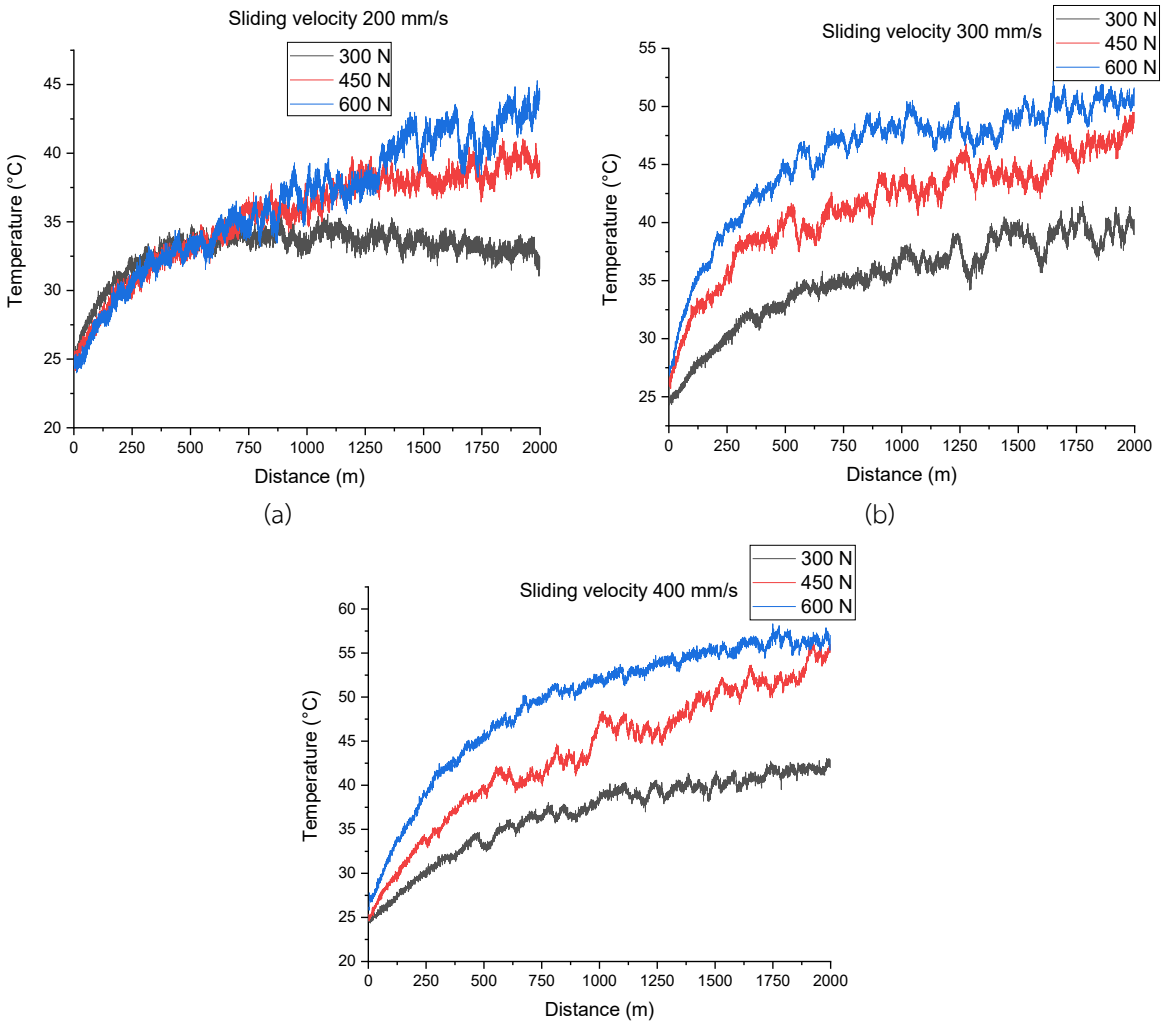
ภาพที่ 1 แสดงการเตรียมชิ้นตัวอย่างและการทดสอบสมบัติไตรโบโลยี (a) ผง UHMWPE U511 (b) การอัดขึ้นรูปแผ่น UHMWPE ด้วยความร้อน (c) การกัดปาดผิวด้วยดอกกัดเอ็นมิลล์ (d) ภาพร่างชิ้นทดสอบการสึกหรอ และ (e) การติดตั้งตัวอย่างสำหรับทดสอบบล็อกออนริ่งและการวิเคราะห์ผลต่าง ๆ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

อุณหภูมิของตัวอย่าง

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตัวอย่าง UHMWPE U511 ที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบการสึกหรอแบบบล็อกออนริ่งภายใต้สภาวะแบบแห้ง โดยใช้ความเร็วเสียดทานและแรงกดบนพื้นผิวที่แตกต่างกัน เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่บันทึกไว้สำหรับระยะทางการเลื่อน 2000 เมตร จากนั้นนำข้อมูลไปสร้างกราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตัวอย่าง UHMWPE U511 ดังแสดงในภาพที่ 2 (a) – (c) ตามลำดับ ผลการวัดค่าอุณหภูมิความร้อนของตัวอย่าง UHMWPE U511 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วในการเลื่อน 200 มิลลิเมตรต่อวินาที พบการเสียดสีกันระหว่างล้อวงแหวนกับพื้นผิวตัวอย่างในช่วงแรกทำให้ความขรุขระลดลงบริเวณผิวสัมผัส ก่อนจะเกิดรอยสึกหรอบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนสะสมบนพื้นผิวคู่สัมผัส และส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณดังกล่าว

นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มแรงกดลงบนพื้นผิวตัวอย่างจาก 300 นิวตัน เป็น 450 และ 600 นิวตัน ตามลำดับ ส่งผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะทางการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิเฉลี่ยเริ่มต้นอยู่ในช่วง 25 องศาเซลเซียส จากนั้น ค่าอุณหภูมิความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หลังจากเลื่อนผ่าน 2000 เมตร เพิ่มขึ้นอุณหภูมิของตัวอย่างสูงสุดประมาณ 45 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 2 (a) อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็วในการเลื่อนเพิ่มขึ้นเป็น 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิความร้อนของตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเห็นได้ชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 2 (b) และ (c) โดยอุณหภูมิของตัวอย่างสูงสุดประมาณ 50 และ 55 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิ ความร้อนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะเป็นตัวเร่งให้เกิดรอยสึกหรอได้ง่ายและรวดเร็ว เมื่อความเร็วในการเลื่อนและแรงกดเพิ่มขึ้น [22]

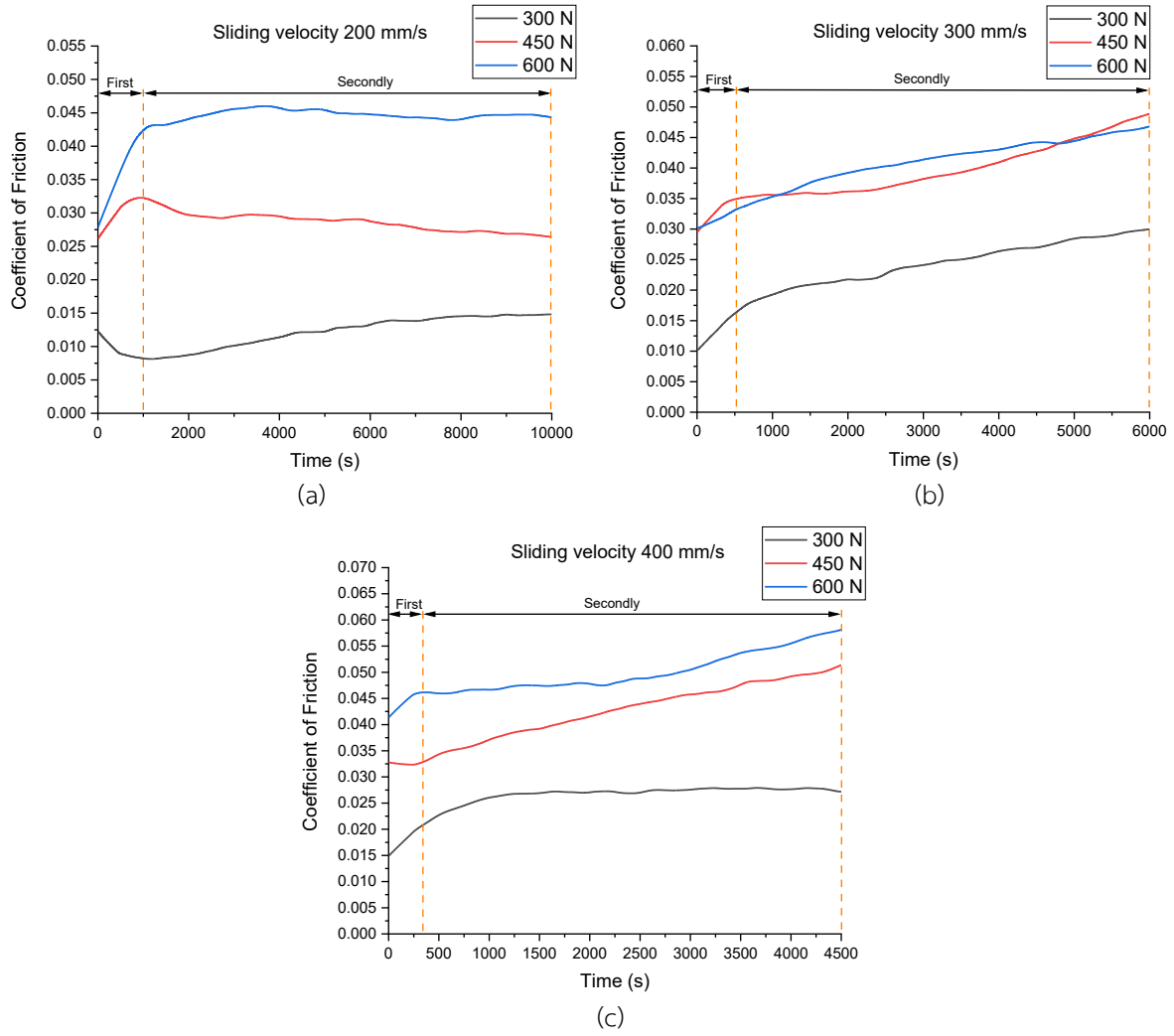


ภาพที่ 2 ผลกระทบของความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่าง UHMWPE U511 (a) ความเร็วในการเลื่อน 200 mm/s (b) 300 mm/s และ (c) 400 mm/s [20]

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

จากภาพที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของตัวอย่าง UHMWPE U511 ภายใต้ความเร็วเสียดทาน 200, 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ และแรงกดที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลทำให้อิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งตามเวลา โดยลักษณะเส้นกราฟของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ตามที่ Ming-xue Shen และคณะ [23] ได้กล่าวไว้ ในระยะเริ่มต้น เมื่อล้อวงแหวนเหล็กกล้าหมุนเคลื่อนที่จะเกิดการเสียดสีระหว่างพื้นผิวของคู่สัมผัสภายใต้แรงกดทำให้ยอดคลื่น (Wave peak) หรือความขรุขระของพื้นผิวตัวอย่าง UHMWPE U511 ที่ผ่านการกัดปาดผิวละเอียดลดลงอย่างรวดเร็วและมีความเรียบมากขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสภาพพื้นผิวคู่สัมผัสเกิดการเปลี่ยนรูปร่างภายใต้สภาวะทดสอบทำให้พื้นผิวคู่สัมผัสแนบชิดกันมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3 (a) เมื่อแรงกดที่ใช้ 300, 450 และ 600 นิวตัน ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเริ่มต้นอยู่ในช่วง 0.012, 0.026 และ 0.027 ตามลำดับ และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1000 วินาที แต่ในระยะที่สองค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นและมีความผกผันเล็กน้อย ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสภาพของพื้นผิวใหม่ (New Surface) เนื่องจากการเสียดสีของคู่สัมผัสทำให้พื้นผิวตัวอย่างเกิดการยืดตัวออกไปตามทิศ

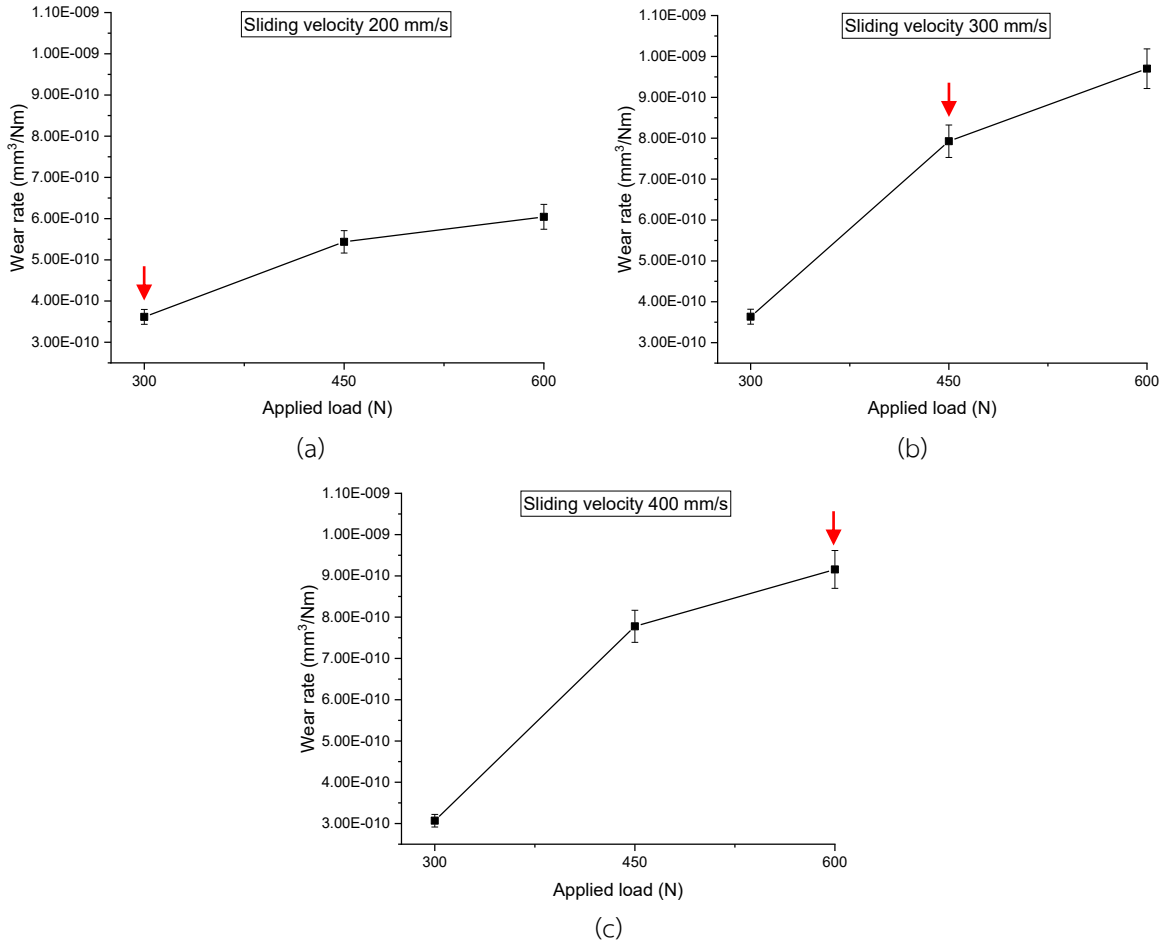
ทางการหมุนของวงแหวน และก่อให้เกิดเศษอนุภาค UHMWPE ขนาดเล็กเกาะติดบนพื้นผิวตัวอย่าง นอกจากนี้ เมื่อแรงกดบนพื้นผิวตัวอย่างเพิ่มขึ้นเป็น 450 นิวตัน และ 600 นิวตัน ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีแนวโน้มจะลดลงเล็กน้อย หลังจากเวลาเลื่อนผ่าน 4000 วินาที และเมื่อเวลาในการเลื่อนครบ 10000 วินาที พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอยู่ในช่วง 0.014, 0.026 และ 0.044 ตามลำดับ



ภาพที่ 3 ผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสำหรับตัวอย่างวัสดุ UHMWPE U511 ภายใต้ความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้แตกต่างกัน (a) ความเร็วในการเลื่อน 200 mm/s (b) 300 mm/s และ (c) 400 mm/s

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความเร็วในการเลื่อน 300 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากเวลาเลื่อนผ่าน 500 วินาที และจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามเวลา โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเริ่มต้นอยู่ในช่วง 0.010, 0.029 และ 0.030 ตามลำดับ และเมื่อเวลาเลื่อนผ่านครบ 6000 วินาที พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.029, 0.048 และ 0.046 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3 (b) นอกจากนี้ การเพิ่มแรงกดบนพื้นผิวสัมผัสและความเร็วในการเลื่อน 400 มิลลิเมตรต่อวินาที จะเป็นตัวช่วยเร่งให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.014, 0.032 และ 0.041 ตามลำดับ หลังจากเวลาเลื่อนผ่าน 300 วินาที เมื่อแรงกดบนพื้นผิวตัวอย่างเพิ่มขึ้นเป็น 450 และ 600 นิวตัน ตามลำดับ หลังจากนั้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการสะสมอุณหภูมิความร้อนบริเวณผิวสัมผัส ซึ่งส่งผลให้พื้นผิวตัวอย่าง UHMWPE U511 มีแนวโน้มอ่อนตัว

และเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่าย (Plastic deformation) ภายใต้แรงกดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเป็น 0.027, 0.051 และ 0.058 ตามลำดับ เมื่อเวลาเลื่อนผ่าน 4500 วินาที ดังแสดงในภาพที่ 2 (c) นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพพื้นผิวของคู่สัมผัสมีแนวโน้มลดลง เมื่อสภาวะการทดสอบมีความรุนแรงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Kamil Leksycki และคณะ [23] ตามการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเสียดทานและแรงกด แต่เมื่อแรงกดบนพื้นผิวตัวอย่างลดลงเป็น 300 นิวตัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะแปรผันเล็กน้อย หลังเวลาทดสอบมากกว่า 1000 วินาที จะมีแนวโน้มคงที่และเพิ่มขึ้นตามสภาพพื้นผิวของตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในภาพที่ 3 (c)



ภาพที่ 4 อัตราการสึกหรอของตัวอย่างวัสดุ UHMWPE U511 ภายใต้ความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้แตกต่างกัน (a) ความเร็วในการเลื่อน 200 mm/s (b) 300 mm/s และ (c) 400 mm/s

อัตราการสึกหรอ

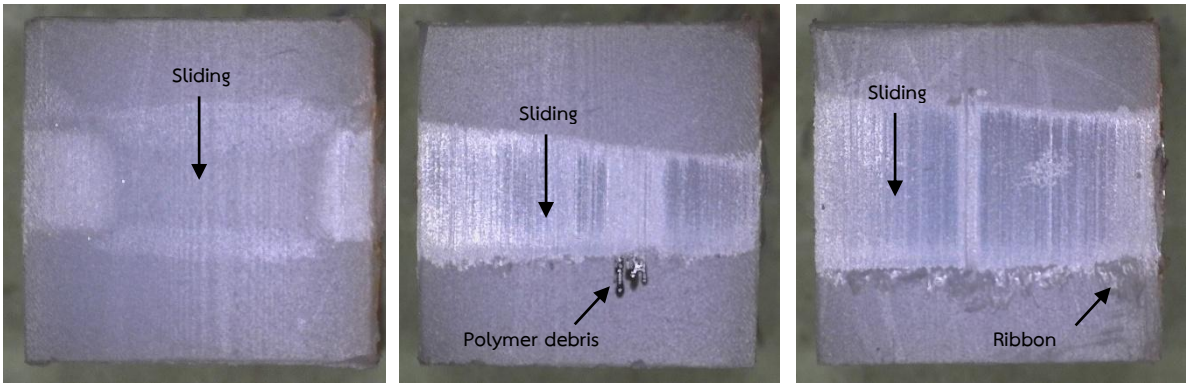
ผลการทดสอบอัตราการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE U511 ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกระบวนการกัดปาดผิวละเอียด ภายใต้การทดสอบด้วยล้อวงแหวนในสภาวะแบบแห้ง พบว่าอัตราการสึกหรอขึ้นอยู่กับทั้งความเร็วเสียดทานและแรงกดอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ความเร็วในการเลื่อน 200 มิลลิเมตรต่อวินาที และแรงกด 300 นิวตัน ให้ค่าอัตราการสึกหรอต่ำสุดที่ 3.615 x 10^{-10} mm^3/Nm เมื่อเพิ่มแรงกดเป็น 450 และ 600 นิวตัน อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นประมาณ 50% และ 67% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4 (a) แนวโน้มดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานและอุณหภูมิที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของชั้นผิวที่เกิดขึ้นระหว่างการเสียดสีลดลง

นอกจากนี้ การเพิ่มความเร็วในการเลื่อนเป็น 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4 (b) – (c) ทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเห็นอย่างชัดเจน นำไปสู่การสะสมและการแพร่กระจายของความร้อนในบริเวณผิวสัมผัสและโซนใกล้เคียง [18] ซึ่งสภาวะดังกล่าวเอื้อต่อการลดความแข็งแรงและกระตุ้นการไหลตัวเชิงพลาสติกของวัสดุ ในขณะเดียวกัน ยังพบการก่อตัวของชั้นฟิล์มบางถ่ายโอน (Transfer film) ระหว่างวงแหวนเหล็กกล้ากับพื้นผิวตัวอย่าง UHMWPE U511 ซึ่งทำหน้าที่ลดการสัมผัสโดยตรงและเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อลื่นของระบบ ทั้งนี้ กลไกดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานผลของ Xincong Zhou และคณะ [11]

ลักษณะพื้นผิว

จากภาพที่ 5 แสดงพื้นผิวที่สึกหรอของตัวอย่าง UHMWPE U511 หลังจากทดสอบการสึกหรอด้วยวิธีล้อวงแหวนในสภาวะแบบแห้ง ภายใต้ความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้แตกต่างกัน พบว่ารอยสึกหรอที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวบริเวณที่มีการเสียดสีของคู่สัมผัส สามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ รอยสึกหรอแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle) และสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoid) ซึ่งรอยสึกหรอทั้งสองนี้จะอยู่บริเวณตรงกลางที่มีรอยเสียดสีลึกลงไปและมีความสว่างแววววาวมากกว่าพื้นผิวโดยรอบที่ไม่สึกหรอ แสดงให้เห็นถึงการขจัดเนื้อออกและขัดเงาพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญในขณะเลื่อนภายใต้แรงกด

อย่างไรก็ตาม ที่แรงกด 300 นิวตัน พบว่าพื้นผิวตัวอย่างแสดงรอยสึกหรอที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยบริเวณผิวสัมผัสปรากฏรอยสึกหรอค่อนข้างจางๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 (a) เมื่อภาระแรงกดเพิ่มขึ้นเป็น 450 และ 600 นิวตัน ตามลำดับ พบว่าความรุนแรงของรอยสึกหรอเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยรอยสึกจะมีความลึกและขยายกว้างครอบคลุมพื้นที่สัมผัสมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5 (b) และ (c)



(a) (b) (c)

ภาพที่ 5 ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง UHMWPE U511 หลังทดสอบการสึกหรอ ภายใต้ความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้แตกต่างกัน (a) แรงกดที่ใช้ 300 นิวตัน (b) 450 นิวตัน และ (c) 600 นิวตัน

นอกจากนี้ ยังพบเศษพอลิเมอร์ที่ถูกดันออกไปจากแรงกดที่ใช้ควบคู่กับความเร็วในการเลื่อนตามทิศทางการหมุนของล้อวงแหวน โดยเศษดังกล่าวจะถูกดันและยืดตัวออกไปทำให้เกิดเป็นรอยเส้นตรงบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการสึกหรอแบบขัดถูร่วม (Abrasive wear) กับการสึกหรอแบบยึดติดเป็นเศษครีบคล้ายกับริบบิ้น (Ribbon-link debris) และการรวมตัวกันเป็นก้อนพอลิเมอร์ (agglomerated polymer debris) ตลอดแนวการเสียดสี ดังแสดงในภาพที่ 5 (b) และ (c) อย่างไรก็ตาม ความไม่สม่ำเสมอของรอยสึกหรอในบริเวณตรงกลาง อาจเกี่ยวกับสภาพพื้นผิวของตัวอย่างเริ่มต้นและพฤติกรรมการสัมผัส เช่น การกระจายแรงไม่สม่ำเสมอ รวมถึงการเลื่อนผ่านซ้ำ ๆ ของคู่สัมผัส (Repeated sliding) ซึ่งปัจจัยนี้เหล่านี้ส่งผลให้เกิดการสะสมอุณหภูมิความร้อนในบริเวณสัมผัส ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งจะส่งเสริมให้วัสดุอ่อนตัวลงและทำให้เกิดการเสียรูปพลาสติกได้ง่ายขึ้น

สรุปผล

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของความเร็วเสียดทานและแรงกดต่อวัสดุตัวอย่าง UHMWPE U511 ภายใต้การทดสอบการสึกหรอแบบบล็อกออนริ่งในสภาวะแบบแห้ง โดยการวิเคราะห์อุณหภูมิของตัวอย่าง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และอัตราการสึกหรอ ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) อุณหภูมิของตัวอย่าง UHMWPE U511 ภายใต้การทดสอบแบบแห้งเพิ่มขึ้นตามความเร็วเสียดทานและแรงกด โดยมีค่าอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดอยู่ในช่วง 25 ถึง 55 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้วัสดุอ่อนตัวและเกิดการสึกหรอได้ง่ายขึ้น โดยมีอัตราการสึกหรอสูงสุดเท่ากับ 9.156×10^{-10} mm^3/Nm

2) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำสุดและสูงสุดอยู่ในช่วง 0.010 ถึง 0.058 และแปรผันตามแรงกดที่เพิ่มขึ้น

3) ความหยาบผิวและสภาพพื้นผิวของตัวอย่างหลังจากที่ผ่านการเสียดสีกับผิววงแหวนเหล็กกล้ามีบทบาทที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอ รวมถึงกลไกการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE U511

4) พื้นผิวรอยสึกหรอมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม โดยมีความลึกตามแนวส่วนโค้งของวงแหวนและความกว้างตามแนวผิวคู่สัมผัส นอกจากนี้ ยังพบการเกิดเศษพอลิเมอร์และการสึกหรอแบบผสม ทั้งแบบขัดถูและยึดติด เนื่องจากภาระแรงกด การเลื่อนซ้ำ ๆ และความร้อนสะสมที่ทำให้วัสดุอ่อนตัวและเสียรูปได้ง่าย

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความเร็วในการเลื่อนและแรงกดส่งผลให้เกิดการเสียดสีบริเวณพื้นผิวสัมผัสมากขึ้น ทำให้เกิดการสะสมอุณหภูมิความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งความร้อนดังกล่าวส่งผลให้พื้นผิวของวัสดุ UHMWPE U511 อ่อนตัวลงและทำให้เสียรูปได้ง่ายขึ้น งานวิจัยในอนาคตควรศึกษาการใช้สารหล่อลื่นและการปรับปรุงสภาพพื้นผิวสำเร็จด้วยกระบวนการตัดเฉือนอื่น ๆ รวมถึงพฤติกรรมการสึกหรอของคู่สัมผัสต่างชนิด เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 กับ UHMWPE เพื่อให้สอดคล้องกับสภาวะการใช้งานจริงของชิ้นส่วนเครื่องจักรในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา โดยมีความร่วมมือกับสาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม

เอกสารอ้างอิง

1. V. Kapps, M. M. Maru, O. Kuznetsov, C. A. Achete. Identifying differences in the tribological performance of GUR 1020 and GUR 1050 UHMWPE resins associated to pressure × velocity conditions in linear reciprocating sliding tests. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2023; 145: 106038. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106038
2. B. P. Chang, H. M. Akil, R. Md. Nasir. Mechanical and Tribological Properties of Zeolite-reinforced UHMWPE Composite for Implant Application. Procedia Engineering. 2013; 68: 88-94, https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.152
3. S. M. Kurtz. A Primer on UHMWPE. In: UHMWPE Biomaterials Handbook (Third Edition). Elsevier; 2016. p. 1-6. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B9780323354011000016
4. S. Li, C. Dong, C. Yuan, X. Bai. Friction-reducing and vibration-absorbing performances on a novel thermoplastic bearing material reinforced by nano-WS2 and UHMWPE. Tribology International. 2022; 176: 107893. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107893
5. P. Gangwani, J. Kovač, N. Emami, M. Kalin. Effect of multi-scale fillers on the tribological behavior of UHMWPE composites in water-lubricated contacts. Tribology International. 2024; 196: 109669. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109669
6. D. Havalder, J. Walter, A. Starý, L. Cvrček, R. Gabor, K. Mašek, E. Filová, L. Staňková, Z. Jeníková, K. Pawar. Mechanical and tribological behaviour of $BaTiO_3$ nanoparticles reinforced UHMWPE nanocomposite for prospective load-bearing applications. Materials & Design. 2025; 256: 114349. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114349
7. J. Tong, Y. Ma, M. Jiang. Effects of the wollastonite fiber modification on the sliding wear behavior of the UHMWPE composites. Wear. 2003; 255(1-6): 734-741. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00221-7
8. B. Li, X. Zhou, J. Huang, Q. Huang, X. Guo, X. Liu. Investigation of multi-scale fillers on tribological properties of UHMWPE composites for water-lubricated bearings. Tribology International. 2025; 212: 110961. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110961
9. T. Kanchanasangtong, R. Saodaen, M. Kaseewong, W. Chudget. Study of the Surface Roughness affecting on the Tribological Properties of Polyoxymethylene by Turning Process. J. Manuf. Manage. Technol., 2024; 3(1): https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jMMT/article/view/255678
10. T. Cai, S. Zhan, T. Yang, Y. Li, D. Jia, J. Tu, J. Li, H. Duan. Study on the tribological properties of UHMWPE modified by UV-induced grafting under seawater lubrication. Tribology International. 2022; 168: 107419. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107419
11. X. Zhou, L. Wang, S. Xing, Z. Zhou. Influence of oil-water mixing conditions on the friction and wear performance of ship tail-bearing materials. Surface Science and Technology. 2024; 2(33): 1-12. https://doi.org/10.1007/s44251-024-00063-4

12. Y. Zhou, H. Duan, S. Zhan, L. Liu, T. Yang, S. Chen, D. Jia. The effect of magnetic field intensity on the tribological properties of PA6 and UHMWPE in pure water and seawater environments. Tribology International. 2025; 206: 110482. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110482
13. S. K. Nayak, J. K. Hirwani, S. K. Sinha, R. K. Pandey. Mechanical and bio-tribological behaviours of UHMWPE based composites for prosthetic hip joint implant application. Tribology International. 2024; 199: 109945. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109945
14. B. Basuki, A. A. Ismail. Effects of CNC Milling Parameters on the Surface Roughness of UHMWPE Biomaterial. International Journal of Research in Engineering and Technology. 2018; 7(10): 68-73. https://doi.org/10.15623/ijret.2018.0710011
15. J. Song, P. Liu, M. Cremens, P. Bonutti. Effects of machining on tribological behavior of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) under dry reciprocating sliding. Wear. 1999; 225-229(2): 716-723. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00066-6
16. M. Padhan, U. Marathe,-J. Bijwe. A comparative assessment of nano and microparticles of carbides for performance augmentation of UHMWPE in abrasive and erosive wear modes. Wear. 2023; 514-515: 204568. https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204568
17. J. Lan, C. Mo, X. Chen, T. Hu, X. Li, C. Zhang. Carbon fiber/nano SiO_2 reinforced polyelectrolyte-graft UHMWPE for water lubricated superlubricity. Tribology International. 2025; 202: 110303. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110303
18. งามพรรณ ชะโล, ประกอบ ชาติภุกต์. สมบัติทางกลของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์สำหรับการใช้งานทางวิศวกรรม. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2022; 16(1): 192-202. https://doi.org/10.14456/jrmutp.2022.16
19. Z. Tong, Q. Ma, Y. Ni, T. Mei, J. Li, G. Dong. Tribological properties of carbon fabric reinforced phenolic-based composites containing CNTs@MoS_2 hybrids. J Mater Sci. 2019; 54(23): 14354-14366. https://doi.org/10.1007/s10853-019-03723-1
20. S. Jiang, J. S. S. Wong, D. Puhan, T. Yuan, X. Bai, C. Yuan. Tribological evaluation of thermoplastic polyurethane-based bearing materials under water lubrication: Effect of load, sliding speed, and temperature. Friction. 2024; 12(8): 1801-1815. https://doi.org/10.1007/s40544-023-0856-1
21. P. L. Menezes, S. V. Kailas. Role of surface texture and roughness parameters on friction and transfer film formation when UHMWPE sliding against steel. Biosurface and Biotribology. 2016; 2(1): 1-10. https://doi.org/10.1016/j.bsbt.2016.02.001
22. Á. Kalácska, V. Parmentier, P. De Baets, G. Kalácska. Wear investigation of PTFE, PEEK and UHMWPE-based reciprocating shaft seal materials with lunar/Martian regolith simulants. Wear. 2025; 571: 205791. https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205791

23. M. Shen, B. Li, D. Ji, G. Xiong, L. Zhao, J. Zhang, Z. Zhang. Effect of Particle Size on Tribological Properties of Rubber/Steel Seal Pairs Under Contaminated Water Lubrication Conditions. Tribol Lett. 2020; 68: 40. https://doi.org/10.1007/s11249-020-1285-1

24. K. Leksycki, E. Feldshtein, R. W. Maruda, N. Khanna, G. M. Królczyk, C. I. Pruncu. An insight into the effect surface morphology, processing, and lubricating conditions on tribological properties of Ti6Al4V and UHMWPE pairs. Tribology International. 2022; 170: 107504. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107504

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม 2569)

บทความวิจัย (Research Article)

ไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส

Water Filter Made from Water Hyacinth Fibers Mixed with Nanocellulose

จันทร์เพ็ญ ไพรแก่น[1] กิจธนาพัฒน์ บรรดลนพรัตน์[2*] พิไลพร หนูทองคำ[1]
และ สุพรรณี ปริญญาวุฒิชัย[1]
Chanphen Prikaen[1], Kittanapat Bandholnopparat[2*], Pilaipon Nuthongkum[1]
and Supannee Prinyawuttichai[1]
[1]สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
[2]สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[1]Department of Applied Physics, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Rajanagarindra University
[1]Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
*Corresponding author; email: kittanapat_ba@rmutt.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
26 กรกฎาคม 2569	29 กันยายน 2569	29 กันยายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาที่ผสมนาโนเซลลูโลสซึ่งสกัดจากผักตบชวาและทดสอบประสิทธิภาพการกรองกับน้ำเสียจากแหล่งชุมชนในพื้นที่อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา รวมทั้งศึกษาความหนาของไส้กรองและนาโนเซลลูโลสที่มีต่อประสิทธิภาพการกรองน้ำ ไส้กรองมีรูปทรงกระบอกรัศมี 2.5 ซม. มีความหนาตั้งแต่ 1 ถึง 5 ซม. การทดสอบการกรองใช้ระบบกรองแบบพาสซีฟภายใต้แรงโน้มถ่วงโลก โดยวัดอัตราการกรองน้ำและวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เจือปนและละลายอยู่ในน้ำ และค่าการนำไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่าไส้กรองที่ความหนา 5 ซม. ให้ประสิทธิภาพการกรองดีที่สุด เนื่องจากสามารถลดค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เจือปนและละลายอยู่ในน้ำ และค่าการนำไฟฟ้าได้ร้อยละ 3.45±0.08, 4.99±0.08 และ 6.70±0.20 ตามลำดับ และเมื่อผสมนาโนเซลลูโลสในอัตราส่วนร้อยละ 10 ต่อน้ำหนักเส้นใยผักตบชวา ไส้กรองสามารถลดค่าความเป็นกรด-ด่างได้ร้อยละ 4.45±0.07 ลดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เจือปนและละลายอยู่ในน้ำได้ร้อยละ 10.16±0.04และลดค่าการนำไฟฟ้าได้ร้อยละ 11.05±0.07 ซึ่งดีกว่าไส้กรองที่ไม่ได้ผสมนาโนเซลลูโลส ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาที่ผสมนาโนเซลลูโลสสามารถลดสิ่งปนเปื้อนในน้ำและสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในการบำบัดน้ำเสียจากชุมชนหรือโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ รวมทั้งใช้กรองน้ำเพื่อการอุปโภคในอนาคต

คำสำคัญ: การกรองน้ำ, การบำบัดน้ำ, เส้นใยธรรมชาติ, วัสดุกรอง

Abstract

This research aimed to develop a water filter made from water hyacinth fibers mixed with nanocellulose extracted from water hyacinth and to evaluate its filtration efficiency using wastewater collected from a community in Bang Khla District, Chachoengsao Province. The effects of filter thickness and nanocellulose content on filtration efficiency were also investigated. The filters were cylindrical, with a radius of 2.5 cm and thicknesses ranging from 1 to 5 cm. The filtration tests were conducted using a passive gravity-driven filtration system. The filtration rate was measured, and the pH, total dissolved solids (TDS), and electrical conductivity (EC) of the water were analyzed. The results showed that the filtration rate tended to decrease over time. The 5-cm-thick filter exhibited the highest filtration efficiency, reducing pH, TDS, and EC by 3.45 ± 0.08%, 4.99 ± 0.08%, and 6.70 ± 0.20%, respectively. When nanocellulose was incorporated at 10% by weight relative to the water hyacinth fibers, the filter reduced pH, TDS, and EC by 4.45 ± 0.07%, 10.16 ± 0.04%, and 11.05 ± 0.07%, respectively, which was higher than the reduction achieved by the filter without nanocellulose. These results demonstrate that water filters made from water hyacinth fibers mixed with nanocellulose have potential for reducing contaminants in water and could be further developed for the preliminary treatment of community or industrial wastewater before discharge into natural water bodies. They may also have potential for future applications in water filtration for domestic use.

Keywords: water filtration, water treatment, natural fibers, filter media

บทนำ

ปัจจุบันมนุษยชาติกำลังเผชิญปัญหาในการจัดการน้ำเสียที่เกิดจากแหล่งชุมชนและภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยน้ำเสียที่ถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัดที่เหมาะสมก่อให้เกิดผลกระทบเชิงลบต่อระบบนิเวศทางน้ำ แหล่งน้ำผิวดิน และคุณภาพดิน ซึ่งส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว นอกจากนี้ปัญหาดังกล่าวยังเชื่อมโยงกับวิกฤตการขาดแคลนน้ำสะอาดเพื่อใช้ในการอุปโภคและบริโภคซึ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นในหลายภูมิภาคของโลก รวมทั้งในประเทศไทยเอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ชนบทที่ห่างไกลจากระบบประปา ประชาชนในพื้นที่เหล่านี้ต้องเผชิญกับความเสี่ยงด้านสุขภาพอนามัยและขาดแคลนแหล่งน้ำที่ปลอดภัยสำหรับการดำรงชีวิตประจำวัน ดังนั้นแล้วการพัฒนาระบบกรองน้ำเพื่อกรองน้ำเสียจากแหล่งชุมชนหรือจากโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ รวมทั้งใช้ในการกรองน้ำจากแหล่งน้ำในธรรมชาติเพื่อนำมาใช้ในการอุปโภคและบริโภคในชีวิตประจำวันจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง กระบวนการหนึ่งในการจัดการน้ำเสียหรือการผลิตน้ำสะอาดเพื่อใช้งานคือการกรองน้ำ เช่น การกรองแบบระบบรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis หรือ RO) เป็นระบบที่ใช้แรงดันน้ำดันผ่านชั้นเมมเบรนกึ่งซึมผ่าน มีประสิทธิภาพสูงในการลดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายรวมอยู่ในน้ำ (Total Dissolved Solids หรือ TDS) โดยงานวิจัยพบว่าระบบ RO สามารถลด TDS จากน้ำประปาได้ถึงร้อยละ 90 [1] หรือระบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration หรือ UF) ที่ใช้เมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดประมาณ 0.01–0.1 ไมครอน ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดสารปนเปื้อนสูงกว่าร้อยละ 90 และทนทานต่อการอุดตันได้ดี ซึ่งงานวิจัยพบว่าระบบ UF สามารถกรองแบคทีเรียได้ประสิทธิภาพมากถึงร้อยละ 80 [2] อย่างไรก็ตามสำหรับพื้นที่ที่อยู่ห่างไกลจากแหล่งชุมชนบางแห่ง การเข้าถึงการกรองระบบ RO และ UF ค่อนข้างยากจึงมีความจำเป็นในการหาระบบการกรองน้ำที่ใช้วัสดุที่มีในท้องถิ่นที่ไม่จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าในการกรองน้ำ มีต้นทุนต่ำและไม่ใช้สารเคมีในการผลิตน้ำสะอาด แนวทางหนึ่งที่ได้รับความสนใจคือการใช้

วัสดุกรองจากธรรมชาติซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หาได้ง่ายในท้องถิ่น มีต้นทุนต่ำ และสามารถลดปริมาณสารปนเปื้อนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการอุปโภคหรือบำบัดน้ำเสียในเบื้องต้นก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ โดยไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว [3, 4] งานวิจัยหลาย ๆ ผลงานที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าสามารถนำเส้นใยธรรมชาติมาประยุกต์ใช้เพื่อการกรองน้ำสำหรับการอุปโภคหรือบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ เช่นเครื่องกรองน้ำอย่างง่ายที่สร้างขึ้นจากชั้นเปลือกหอย ซังข้าวโพด ก้อนกรวด เส้นใยจากเปลือกมะพร้าว และถ่านไม้ เพื่อใช้ในกรองน้ำทิ้งจากในครัวเรือนก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งพบว่าสามารถลดปริมาณ TDS และลดค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือ ค่า pH ลงได้ร้อยละ 24.03 และ 5.73 ตามลำดับ [5] หรือการกรองน้ำโดยใช้เส้นใยเปลือกมะพร้าว ถ่านไม้ กากอ้อย และชั้นหินกรวดในการกรองน้ำซึ่งสามารถลดค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ (Electrical Conductivity หรือค่า EC) ได้เช่นกัน [6] นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ชั้นก้อนกรวด ชั้นทรายละเอียด เปลือกสนบด และเส้นใยกระบองเพชรในการ กรองน้ำ ผลที่ได้คือค่า pH ในน้ำที่ผ่านการกรองลดลงร้อยละ 13.65 [7]

การประยุกต์ใช้วัสดุธรรมชาติหลากหลายชนิดร่วมกันเพื่อใช้ในการกรองน้ำมักมีข้อจำกัดในด้านประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนระดับโมเลกุลและอนุภาคขนาดเล็กมาก ๆ ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการนำเทคโนโลยีนาโนมาช่วยยกระดับขีดความสามารถของกระบวนการบำบัดน้ำเสียรวมทั้งการกรองน้ำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น หนึ่งในนวัตกรรมที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางคือนาโนเซลลูโลส (Nanocellulose) ซึ่งเป็นวัสดุชีวนาโนที่สังเคราะห์ได้จากแหล่งเซลลูโลสธรรมชาติ เช่น เยื่อไม้ เศษพืชทางการเกษตร เส้นใยพืชน้ำ และของเสียจากอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร นาโนเซลลูโลสเป็นวัสดุชีวนาโนที่มีพื้นที่จำเพาะสูง มีโครงสร้างรูพรุนจำนวนมาก มีความแข็งแรงเชิงกลสูง และที่สำคัญคือมีประสิทธิภาพในการยึดจับสารปนเปื้อนได้ต่าง ๆ ได้ จึงมีการนำนาโนเซลลูโลสเป็นสารเพิ่มประสิทธิภาพในวัสดุกรองน้ำเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียทั้งจากร้านอาหารและโรงงานอุตสาหกรรมต่าง [8, 9] การแยกเกลือออกจากน้ำทะเลเพื่อทำเป็นน้ำจืด [10] หรือการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรม [11]

ผักตบชวา (water hyacinth) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า Eichhornia crassipes (Mart.) Solms จัดอยู่ในวงศ์ Pontederiaceae เป็นวัชพืชต่างถิ่นที่มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมและขยายพันธุ์ได้รวดเร็ว ด้วยเหตุนี้ผักตบชวาจึงก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบนิเวศของประเทศไทย ทั้งในด้านการเกษตร การชลประทาน และสุขภาพอนามัยของชุมชน จึงมีแนวคิดการนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การนำเส้นใยผักตบชวาผสมกับเส้นใยธรรมชาติอื่น ๆ เพื่อใช้ในการผลิตเครื่องนุ่งห่ม [12, 13] การผลิตสารดูดความชื้นที่มีส่วนผสมของผักตบชวา [14] หรือการใช้ผักตบชวาในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากน้ำเสียจากแหล่งชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากลำต้นและระบบรากของผักตบชวามีสมบัติในการดูดซับสารอินทรีย์และโลหะหนักบางชนิดในแหล่งน้ำที่ผักตบชวาเจริญเติบโตได้ [15, 16] นอกจากศักยภาพในการนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้ในข้างต้นแล้วสิ่งที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งของผักตบชวาคือมีปริมาณเซลลูโลสที่ค่อนข้างสูงจึงเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสกัดเป็นนาโนเซลลูโลสได้ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวที่กล่าวมาผักตบชวาจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและยั่งยืนสำหรับการพัฒนาเป็นวัสดุกรองน้ำชีวภาพเนื่องจากเป็นการเปลี่ยนวัชพืชที่สร้างปัญหาให้กลายเป็นทรัพยากรที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ นอกจากนี้การใช้ผักตบชวาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นยังช่วยลดต้นทุนการผลิตนาโนเซลลูโลสเมื่อเทียบกับการใช้เยื่อไม้บริสุทธิ์หรือเส้นใยสังเคราะห์ และยังเป็นการจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อมไปในตัวเนื่องจากเป็นการช่วยลดปริมาณผักตบชวาในแหล่งน้ำธรรมชาติ นอกจากนี้พบว่ามีการศึกษาจำนวนมากที่รายงานถึงประสิทธิภาพของนาโนเซลลูโลสในการดูดซับสารปนเปื้อนชนิดต่าง ๆ เช่น โลหะหนัก ไอออนของโลหะ สีย้อมอินทรีย์ และสารประกอบฟีนอล รวมถึงการใช้นาโนเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบในเมมเบรนกรองและวัสดุคอมโพสิตเพื่อเพิ่มความสามารถในการกำจัดสารตกค้างในน้ำ [17, 18] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การใช้นาโนเซลลูโลสจากแหล่งวัสดุตั้งต้นแบบดั้งเดิม เช่น เยื่อไม้ เยื่อฝ้าย หรือเยื่อพืชเศรษฐกิจ ในขณะที่การใช้เซลลูโลส ที่สกัดจากผักตบชวาซึ่งเป็นวัชพืชที่มีปริมาณมากและหาได้ง่ายในประเทศไทยยังมี

ค่อนข้างจำกัดยิ่งไปกว่านั้น แม้จะมีรายงานการศึกษาการนำเส้นใยผักตบชวามาใช้เป็นวัสดุกรองน้ำในระดับหนึ่งแต่การใช้เซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาในการเสริมประสิทธิภาพของไส้กรองน้ำที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวาโดยตรงเพื่อวัตถุประสงค์ในการกรองน้ำอุปโภคและการบำบัดน้ำเสีย ยังมีช่องว่างทางองค์ความรู้ค่อนข้างมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกรองน้ำของไส้กรองน้ำจากเส้นใยในผักตบชวาและผลของนาโนเซลลูโลสจากใยผักตบชวาต่อประสิทธิภาพการกรองน้ำของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวา โดยใช้น้ำจากแหล่งน้ำเสียในพื้นที่อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการแพร่กระจายของผักตบชวาและยังมีแหล่งกำเนิดน้ำเสียทั้งจากแหล่งชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม บ่อเลี้ยงกุ้งและสวนผลไม้เป็นจำนวนมากเป็นตัวอย่างในการทดสอบ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกรองน้ำของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวา ผลของความหนาของไส้กรองที่มีต่ออัตราการกรอง และผลของนาโนเซลลูโลสต่อประสิทธิภาพการลดค่า pH, TDS และ EC ในน้ำเสียจากแหล่งชุมชน

วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบและดำเนินการวิจัยการผลิตไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลสจากเส้นใยผักตบชวา มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากเส้นใยผักตบชวา

การเตรียมนาโนเซลลูโลสจากเส้นใยผักตบชวา ดำเนินการโดยใช้กระบวนการทางเคมีร่วมกับกระบวนการทางกายภาพ โดยใช้เทคนิคการฟอกขาวแบบไม่ใช้คลอรีนรวมกับกระบวนการบดย่อยทางกลซึ่งนิยมใช้ในการเปลี่ยนชีวมวลทางการเกษตรให้เป็นวัสดุนาโน [19, 20] โดยขั้นตอนการเตรียมนาโนเซลลูโลสมีขั้นตอนคือ

1) นำต้นผักตบชวามาตัดส่วนรากและใบออกให้เหลือแต่ส่วนลำต้น จากนั้นล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก ดิน ฝุ่น และสารปนเปื้อนที่ติดมากับวัตถุดิบ

2) จากนั้นนำส่วนลำต้นผักตบชวาที่ได้จากข้อที่ 1) ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบดลดขนาดด้วยวิธีทางกายภาพ และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 40 mesh เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคเริ่มต้นที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและเหมาะสมต่อกระบวนการปรับสภาพทางเคมี

3) นำอนุภาคที่ผ่านการลดขนาดไปปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 5 wt% ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ภายใต้การกวนอย่างต่อเนื่อง เพื่อช่วยกำจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ไข แว็กซ์ และองค์ประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลสบางส่วนออกจากโครงสร้างเส้นใย

4) จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นหลายครั้งเพื่อลดสารตกค้างของด่างจนตัวอย่างมีสภาวะใกล้เป็นกลาง แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

5) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อที่ 4) ไปลดขนาดเพิ่มเติมด้วยการบดเชิงกลความเร็วสูง 40,000 rpm กำลัง 3,500 W เป็นเวลา 10 นาที เพื่อช่วยลดขนาดเส้นใย เพิ่มพื้นที่ผิว และส่งเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยด้วยกรดในขั้นตอนถัดไป

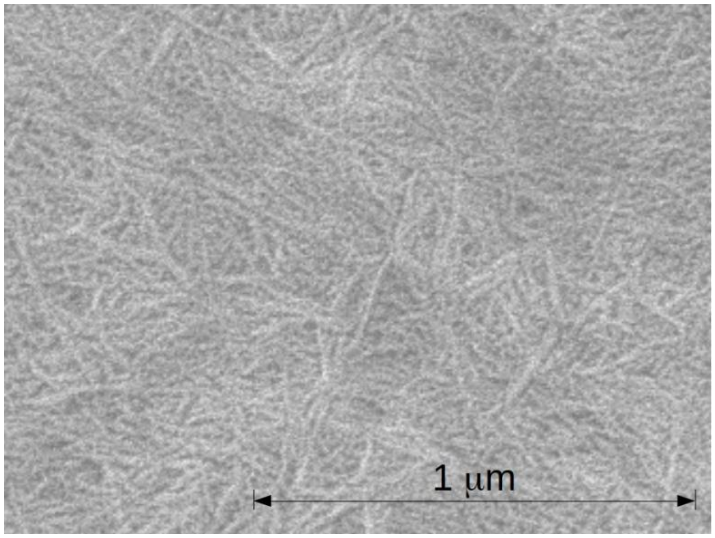
6) จากนั้นนำตัวอย่างไปย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 55 wt% ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้การ กวนอย่างต่อเนื่อง เพื่อย่อยสลายบริเวณอสัณฐานของเซลลูโลสและส่งเสริมการเกิดอนุภาคเซลลูโลสขนาดเล็ก

7) หลังสิ้นสุดกระบวนการย่อยด้วยกรด ตัวอย่างถูกล้างด้วยน้ำกลั่นซ้ำหลายครั้งจนมีค่า pH เป็นกลาง เพื่อลดกรดตกค้างที่อาจส่งผลต่อสมบัติของวัสดุและการนำไปประยุกต์ใช้งาน

8) จากนั้นนำตัวอย่างเข้าสู่กระบวนการฟอกด้วยด่างร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 wt% และเติมสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 35% เพื่อปรับค่า pH ให้ได้ประมาณ 11 แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ภายใต้การกวนอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของเซลลูโลส ลดปริมาณลิกนินตกค้าง และทำให้สีของตัวอย่างอ่อนลง

9) ล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่า pH เป็นกลาง และอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปเตรียมเป็นสารแขวนลอยเซลลูโลส/นาโนเซลลูโลสสำหรับประยุกต์เป็นวัสดุไส้กรองน้ำ

เมื่อนำนาโนเซลลูโลสที่ได้มาศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) เพื่อศึกษารูปร่าง การกระจายตัว และขนาดของเส้นใยในระดับนาโนเมตร จากการวิเคราะห์ภาพ FE-SEM ร่วมกับการวัดขนาดด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่า ตัวอย่างนาโนเซลลูโลสที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นเส้นใยขนาดเล็กและกระจายตัวเป็นโครงข่าย โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 32.6 ± 9.4 nm และมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 620 ± 270 nm แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโน ทั้งนี้ พบการซ้อนทับและการรวมตัวของเส้นใยบางส่วน ซึ่งอาจสัมพันธ์กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสและการรวมตัวระหว่างกระบวนการเตรียมและอบแห้งตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ด้วย FE-SEM



ภาพที่ 1 ภาพสัณฐานวิทยาของนาโนเซลลูโลสจากผักตบชวา จาก FE-SEM ที่สกัดได้เป็นเส้นใยขนาดเล็กระดับนาโน กระจายตัวเป็นโครงข่ายหนาแน่น มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 32.6 ± 9.4 nm และมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 620 ± 270 nm

2. การผลิตไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส

ผักตบชวาที่ใช้ในกระบวนการผลิตไส้กรองน้ำและสังเคราะห์นาโนเซลลูโลส รวมทั้งน้ำเสียจากชุมชนที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของไส้กรองน้ำในงานวิจัยนี้ เก็บมาจากพื้นที่อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่มีนิคมอุตสาหกรรม สวนมะม่วง พื้นที่ไร่นา และบ่อเลี้ยงกุ้ง จึงเป็นพื้นที่ที่มีแหล่งน้ำเสียเป็นปริมาณมาก อีกทั้งยังเป็นพื้นที่ที่มีผักตบชวาในแหล่งน้ำธรรมชาติในปริมาณมากเช่นกัน โดยผักตบชวาที่นำมาผลิตเป็นไส้กรองน้ำนั้น มีขั้นตอนการแปรรูป ดังภาพที่ 2 และสรุปขั้นตอนกระบวนการผลิตและผสมนาโนเซลลูโลสแสดงในภาพที่ 3 โดยขั้นตอนการผลิตจะเริ่มจาก

1) รวบรวมผักตบชวาจากแหล่งน้ำธรรมชาติมาทั้งหมด 100 กก. จากนั้นตัดเอาเฉพาะส่วนที่เป็นลำต้นของผักตบชวา ดังแสดงในภาพที่ 2 (ก) เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีเส้นใยมากที่สุด

2) นำส่วนลำต้นผักตบชวาไปปลอกเปลือกให้เหลือแต่เส้นใยสีขาวที่อยู่ข้างใน จากนั้นนำไปตัดเป็นท่อนให้มีความยาว 1.5 ซม. เพื่อสะดวกต่อการนำไปปั่นเป็นเส้นใย

3) นำส่วนของลำต้นที่ได้จากข้อที่ 2) ไปล้างด้วยน้ำสะอาด 1 รอบ แล้วนำไปเข้าเครื่องปั่นเพื่อปั่นให้เป็นเส้นใยละเอียด โดยใช้เวลา 5 นาที (ภาพที่ 2 (ข))

4) นำเส้นใยที่ปั่นละเอียดแล้ว ไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำการฆ่าเชื้อโรคและขจัดสิ่งปนเปื้อนในเส้นใยผักตบชวาให้ได้มากที่สุด (ภาพที่ 2 (ค))

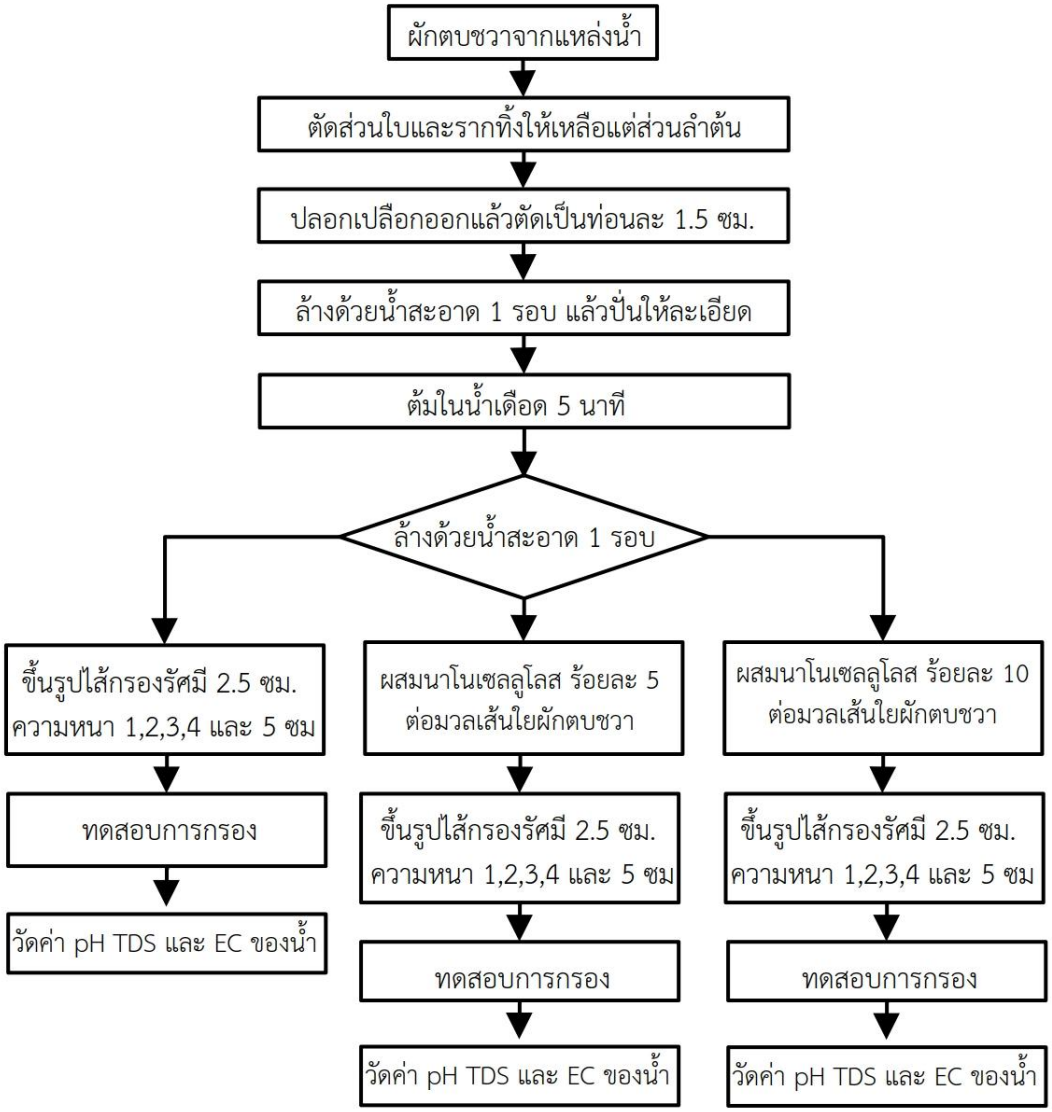
5) นำเส้นใยปั่นละเอียดที่ได้ล้างด้วยน้ำสะอาดอีก 1 รอบ แล้วทิ้งไว้ให้เส้นใยเย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส โดยเส้นใยที่เย็นตัวแล้วจะถูกแบ่งเป็น 3 ส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นไส้กรองที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวาเพียงอย่างเดียว และส่วนที่สองและสามจะนำไปผสมนาโนเซลลูโลส ที่ได้จากผักตบชวาในอัตราส่วนร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ต่อมวลของเส้นใยผักตบชวาตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2 (ง)

6) จากนั้นนำไปขึ้นรูปโดยการใส่เส้นใยผักตบชวาลงไปในท่อ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. ที่ตัดเป็นรูปทรงกระบอกความสูง 1, 2, 3, 4 และ 5 ซม. และมีตาข่ายปิดหัวท้ายดังแสดงในภาพที่ 2(จ) โดยควบคุมความหนาแน่นของไส้กรองให้อยู่ที่ 0.44±0.02 กก./ลบ.ม. จากนั้นนำไปผึ่งให้แห้งในแดดจัด เป็นเวลา 2-3 วัน จึงจะได้ไส้กรองน้ำเพื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพการกรองต่อไป



ภาพที่ 2 กระบวนการแปรรูปและผลิตไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาที่ผสมนาโนเซลลูโลส

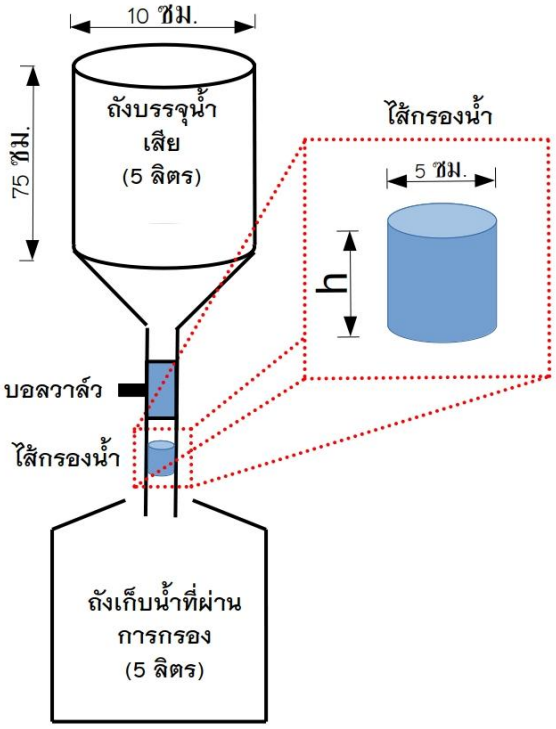
สำหรับค่าใช้จ่ายซึ่งเป็นต้นทุนของการผลิตไส้กรองน้ำที่ไม่รวมตัวเครื่องกรองน้ำจะอยู่ที่ 20.10 บาท/หนึ่งชิ้น และไส้กรองความหนา 5 ซม. สามารถกรองน้ำได้อยู่ที่ 28.21 ลิตรก่อนที่อัตราการกรองจะลดลงต่ำมากจนน้ำไม่สามารถไหลผ่านไส้กรองได้ ดังนั้นแล้วหากคำนวณเป็นต้นทุนเฉลี่ยของการกรองน้ำจะอยู่ที่ 0.72 บาท/ลิตร สำหรับไส้กรองน้ำที่ผสมนาโนเซลลูโลส หากเป็นไส้กรองน้ำที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวาอย่างเดียวต้นทุนไส้กรองที่ความหนา 5 ซม. จะอยู่ที่ 9.68 บาทต่อหนึ่งชิ้นและสามารถกรองน้ำได้อยู่ที่ 32.44 ลิตรก่อนที่ไส้กรองจะตัน ดังนั้นแล้วหากคำนวณเป็นต้นทุนเฉลี่ยของการกรองน้ำจะอยู่ที่ 0.30 บาท/ลิตร



ภาพที่ 3 สรุปขั้นตอนกระบวนการผลิตต้นแบบไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวา การผสมนาโนเซลลูโลส และการหาประสิทธิภาพการลดค่า pH, TDS และ EC ออกจากน้ำเสีย

3. การทดสอบอัตราการกรองน้ำของไส้กรองน้ำ

การทดสอบหาผลของความหนาของไส้กรองน้ำกับอัตราการกรองน้ำและการลดค่า pH, TDS และ EC ในน้ำทำโดยใช้ต้นแบบเครื่องกรองน้ำอย่างง่ายที่สร้างขึ้นมาจากท่อ PVC ที่มีระบบการกรองน้ำแบบพาสซีพที่อาศัยแรงโน้มถ่วงโลกทำให้น้ำไหลผ่านไส้กรองน้ำ เมื่อเปิดบอลวาล์วน้ำในถังเก็บน้ำดิบปริมาตร 5.0 ลิตร ซึ่งติดตั้งอยู่ด้านบนของเครื่องกรองน้ำ จะไหลผ่านไส้กรองน้ำที่ติดตั้งอยู่ด้านล่างของบอลวาล์วแล้วไหลเข้าสู่ถังเก็บน้ำที่ผ่านการกรองแล้วซึ่งติดตั้งอยู่ด้านล่างดังภาพที่ 4 สำหรับน้ำที่ใช้ในการทดสอบนั้นนำมาจากแหล่งน้ำเสียจากชุมชนในพื้นที่อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทราโดยแบ่งน้ำเป็นตัวอย่างละ 5 ลิตรทั้งหมด 40 ตัวอย่าง โดย 5 ตัวอย่างแรกจะถูกนำไปตรวจเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานของน้ำจากแหล่งน้ำ อีก 25 ตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบการกรองกับไส้กรองน้ำที่ความหนา 1, 2, 3, 4, และ 5 ซม. ตามลำดับ และที่เหลืออีก 10 ตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบผลของนาโนเซลลูโลสต่อไส้กรองน้ำ โดย 5 ตัวอย่างแรกจะนำไปทดสอบกับไส้กรองน้ำที่ผสมนาโนเซลลูโลสร้อยละ 5 ต่อน้ำหนักมวลของเส้นใยผักตบชวาและอีก 5 ตัวอย่างจะนำไปทดสอบกับไส้กรองน้ำที่ผสมนาโนเซลลูโลส ร้อยละ 10 ต่อน้ำหนักมวลของเส้นใยผักตบชวา



ภาพที่ 4 ภาพแสดงหลักการงานของเครื่องกรองน้ำที่ใช้ติดตั้งไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาเพื่อหาอัตราการกรองและประสิทธิภาพการกรองสิ่งปนเปื้อนในน้ำของไส้กรองจากเส้นใยผักตบชวา

เพื่อทำการหาอัตราการกรองจะเริ่มจากการวัดค่าอุณหภูมิ, pH, TDS และ EC ของน้ำเสียจากแหล่งน้ำ จากนั้นนำน้ำเสียจากแหล่งน้ำใส่ลงในถังบรรจุน้ำเสียที่ติดตั้งไส้กรองน้ำที่ความหนา 1 ซม. ในเครื่องกรอง เมื่อทำการเปิดบอลวาล์วให้น้ำไหลผ่านไส้กรองจะทำการบันทึกเวลาและปริมาตรน้ำที่ไหลลงสู่ถังพักน้ำที่ผ่านการกรอง โดยการวัดอัตราการ กรองน้ำ Q ที่ความหนาของไส้กรอง h หาได้จากสมการที่ 1 กล่าวคือ

$$Q = (V_f - V_i) / (t_f - t_i) \quad (1)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการกรองน้ำ (ลิตร/วินาที)

t_i คือ เวลาเริ่มต้น (วินาที)

t_f คือ เวลาสุดท้าย (วินาที)

V_i คือ ปริมาตรน้ำที่ผ่านการกรองที่เวลา t_i(ลิตร)

V_f คือ ปริมาตรน้ำที่ผ่านการกรองที่เวลา t_f (ลิตร)

ในขั้นตอนสุดท้ายน้ำที่ได้จากการกรองโดยไส้กรองจากเส้นใยผักตบชวาจะถูกนำไปทดสอบเพื่อวัดค่า pH, TDS และ EC จากนั้นจะทำซ้ำแต่เปลี่ยนไส้กรองเป็นความหนา 2, 3, 4 และ 5 ซม. ตามลำดับ โดยแต่ละความหนาของไส้กรองจะทำซ้ำ 5 ครั้ง เพื่อเปรียบเทียบการลดลงของค่าดังกล่าวของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาที่ความหนาต่าง ๆ รวมทั้งไส้กรองน้ำที่ไม่ผสมนาโนเซลลูโลสและเมื่อผสมนาโนเซลลูโลส

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ปริมาณสารตกค้างในน้ำเสียจากแหล่งชุมชนที่ใช้ทดลอง

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการลดค่า pH, TDS และ EC ของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลสในในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเริ่มต้นจากการตรวจวัดข้อมูลพื้นฐานดังกล่าวของน้ำในแหล่งน้ำเสียที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งน้ำเสียที่ได้เก็บมาจากแหล่งน้ำในชุมชนอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา เพื่อให้ทราบว่าน้ำเสียที่ใช้ทดสอบมีค่า pH TDS และ EC มากน้อยเพียงใด ซึ่งค่าที่ตรวจวัดได้แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลอุณหภูมิ, ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ และสภาพนำไฟฟ้าของน้ำ จากน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง โดยตัวเลขที่อยู่ในวงเล็บแสดงถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

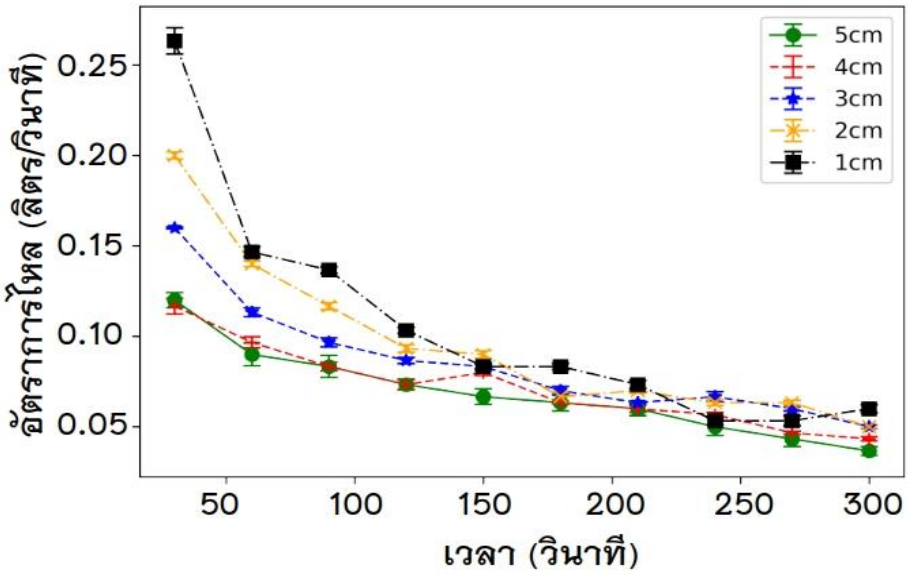
ตัวแปร	ผลจากห้องปฏิบัติการ
อุณหภูมิ	29.37 (0.03)
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	8.11 (0.12)
ปริมาณของแข็งละลายในน้ำ	496.89 (34.80) mg/L
สภาพนำไฟฟ้าของน้ำ	244.11 (9.24) µS/cm

จากผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำพบว่าแหล่งน้ำที่นำมาใช้ในการทดลองมีค่า pH ของน้ำ 8.11 ซึ่งอยู่ในช่วงด่างค่อนข้างสูงแสดงให้เห็นว่าน้ำมีองค์ประกอบของสารคาร์บอเนตหรือไบคาร์บอเนตในปริมาณมาก นอกจากนี้ยังมีค่า TDS และ EC ที่สูง แสดงให้เห็นว่าในน้ำเสียที่ใช้ทดสอบมีสารปนเปื้อนค่อนข้างมาก ซึ่งผลจากห้องปฏิบัติการสะท้อนว่าน้ำจากแหล่งน้ำดังกล่าวไม่เหมาะสมสำหรับการอุปโภคหรือบริโภค

2. อัตราการกรองน้ำของไส้กรองน้ำ

จากการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกรองน้ำของไส้กรองในหน่วยลิตรต่อวินาทีกับระยะเวลาที่ใช้ในการ กรองในหน่วยวินาที ของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาในกรณีที่ยังไม่ได้เติมนาโนเซลลูโลส ที่ความหนาของไส้กรองน้ำ

1, 2, 3, 4 และ 5 ซม. ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงเห็นอย่างชัดเจนว่าอัตราการกรองน้ำของไส้กรองทุกความหนามีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการกรองเพิ่มขึ้น ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ของอัตราการกรองน้ำของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวากับระยะเวลาการกรองน้ำที่ความหนาของไส้กรอง 1 ซม. (สีดำ), 2 ซม. (สีเหลือง), 3 ซม. (สีน้ำเงิน), 4 ซม. (สีแดง) และ 5 ซม. (สีเขียว) ตามลำดับ

โดยอัตราการกรองน้ำกับความหนาของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวามีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 2

$$Q = -a \ln(t) + b \quad (2)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการกรองน้ำในหน่วย (ลิตรต่อวินาที)
t คือ เวลาในหน่วย (วินาที)
โดยที่ค่าคงที่ a และ b ในสมการที่ 2 เป็นไปตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าคงที่สำหรับสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกรองน้ำของไส้กรองกับระยะเวลาการกรอง

ความหนา(ซม.)	a	b	R^2
1	0.0077	0.0480	0.922
2	0.0064	0.0402	0.953
3	0.0051	0.0342	0.948
4	0.0031	0.0118	0.948
5	0.0034	0.0120	0.975

โดยค่า b สอดคล้องกับอัตราการไหลเริ่มต้นหรืออัตราการกรองของไส้กรองสะอาดที่จุดเริ่มต้นของการกรอง ส่วนค่า a เป็นตัวแปรที่ควบคุมอัตราการลดลงของอัตราการกรอง ซึ่งแสดงถึงความรุนแรงของการอุดตันของไส้กรอง โดยค่า a ที่มากขึ้นหมายความว่าอัตราการไหลลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป บ่งชี้ถึงความเร็วในการอุดตันที่รวดเร็ว นอกจากนี้การทดลองพบว่าอัตราการกรองน้ำของไส้กรองที่ทุกความหนามีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการกรองเพิ่มขึ้น

ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวอาจเกิดจากการเพิ่มความต้านทานต่อการไหลภายในโครงสร้างรูพรุนของไส้กรองซึ่งเป็นผลมาจากการสะสมของตะกอนและสารแขวนลอยที่ถูกดักจับไว้ภายในเนื้อวัสดุของไส้กรอง ส่งผลให้ค่าความพรุนและค่าการซึมผ่านของไส้กรองลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาผลของความหนาไส้กรองที่มีต่ออัตราการกรอง พบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการกรอง ไส้กรองที่มีความหนาน้อย โดยเฉพาะความหนา 1 ซม. และ 2 ซม. ให้ค่าอัตราการกรองที่แทบไม่แตกต่างกัน โดยพบว่าอัตราการกรองเริ่มต้นสูงกว่าไส้กรองที่มีความหนามาก ทั้งนี้เนื่องจากความยาวของเส้นทางการไหลภายในตัวกลางกรองมีค่าน้อย ส่งผลให้ความต้านทานเชิงไฮดรอลิกลดลง อย่างไรก็ตามข้อได้เปรียบดังกล่าวปรากฏเพียงในระยะสั้น เนื่องจากไส้กรองที่มีความหนาน้อยมีความสามารถในการรองรับการสะสมของตะกอนจำกัด ทำให้เกิดการอุดตันของรูพรุนในอัตราที่รวดเร็วกว่า ในทางตรงกันข้าม ไส้กรองที่มีความหนามากกว่า (4–5 ซม.) แม้จะมีอัตราการกรองเริ่มต้นต่ำกว่า แต่แสดงแนวโน้มการลดลงของอัตราการกรองที่ช้ากว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถของไส้กรองหนาในการกระจายและการสะสมของสิ่งปนเปื้อนตลอดความหนาของไส้กรองลดการเกิดการอุดตันเฉพาะบริเวณผิวหน้าและส่งเสริมกลไกการกรองเชิงลึกที่มีประสิทธิภาพมากกว่า เมื่อพิจารณาในช่วงเวลาการกรองที่ยาวขึ้น พบว่า อัตราการกรองของไส้กรองทุกความหนามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าเมื่อการอุดตันสะสมถึงระดับหนึ่งแล้ว ความแตกต่างด้านความหนาของไส้กรองจะมีผลต่ออัตราการกรองลดลง การไหลถูกกำหนดส่วนใหญ่โดยความต้านทานจากชั้นตะกอนที่สะสมอยู่มากกว่าคุณสมบัติเชิงเรขาคณิตดั้งเดิมของไส้กรอง ดังนั้นแล้วความหนาไส้กรองเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลทั้งต่ออัตราการกรองเริ่มต้นและเสถียรภาพของระบบกรองในระยะยาว โดยไส้กรองที่มีความหนาน้อยเหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการอัตราการไหลสูงในช่วงเวลาสั้น ขณะที่ไส้กรองที่มีความหนามากเหมาะสมกับการใช้งานต่อเนื่อง ซึ่งต้องการความคงทนของสมรรถนะการกรอง อย่างไรก็ตามจากการทดลอง พบว่า ที่ความหนาของไส้กรองหนาเกินกว่า 5 ซม. น้ำเสียจะไหลผ่านไส้กรองที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวาด้วยอัตราการกรองที่น้อยมาก ๆ โดยอัตราการไหลอยู่ที่ 0.001 ลิตรต่อวินาที และจะหยุดไหลเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 วินาที ดังนั้นที่ความหนาของไส้กรองที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวาที่มีความหนามากกว่า 5 ซม. จึงยังไม่เหมาะสมในการทดลองครั้งนี้ สาเหตุดังกล่าวน่าจะเป็นผลมาจากถังเก็บน้ำมีขนาดเล็กเกินเนื่องจากบรรจุน้ำได้แค่ 5 ลิตร ทำให้แรงดันของน้ำที่สะสมอยู่ในถังเก็บน้ำเสียดังกล่าวไม่สามารถสร้างแรงดันน้ำมากเพียงพอที่จะทำให้น้ำไหลผ่านไส้กรองได้

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสมบัติของน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการกรองจากไส้กรองจากเส้นใยผักตบชวา โดยในวงเล็บแสดงถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (วัดที่อุณหภูมิ 25.7±0.21 °C)

ความหนาของไส้กรอง (ซม.)	ความเป็นกรด-ด่าง		ปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำ (ppm)		ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ (µS/cm)	
	ผลการวัด	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง	ผลการวัด	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง	ผลการวัด	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง
0 (ไม่ผ่านไส้กรอง)	8.11 (0.12)	0.00	496.8 (34.8)	0.00	244.1 (9.2)	0.00
1.0	8.15 (0.08)	0.49	495.0 (9.5)	-0.36	246.8 (5.0)	-0.73
2.0	7.95 (0.19)	-1.79	489.5 (13.4)	-1.47	245.0 (5.4)	0.37
3.0	8.03 (0.26)	-0.98	488.0 (2.0)	-1.77	242.3 (0.6)	-0.74
4.0	8.11 (0.08)	0.00	478.6 (39.7)	-3.77	238.0 (18.7)	-2.50
5.0	7.83 (0.06)	-3.45	472.0 (28.3)	-4.99	228.0 (10.6)	-6.70

เมื่อพิจารณาผลประสิทธิภาพการกรองน้ำของไส้กรองที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวา ซึ่งถูกออกแบบให้มีความหนาต่างกัน 5 ระดับ (ได้แก่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ซม.) ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ค่าพารามิเตอร์สำคัญทางคุณภาพน้ำทั้ง 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่า pH, ค่า TDS และค่า EC มีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาของชั้นไส้กรองเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความหนาของไส้กรองเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการดูดซับและกักเก็บสารละลายไอออนิกและอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่ความหนาของไส้กรองเท่ากับ 5 ซม. ซึ่งเป็นความหนามากที่สุดในการทดลองนี้ พบว่าสามารถลดค่าพารามิเตอร์ทั้งสามได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับความหนาอื่น ๆ โดยมีอัตราการลดลงคิดเป็นร้อยละ ดังนี้ 1) ค่า pH ลดลง ร้อยละ 3.45 (จากค่าเริ่มต้น 8.11±0.12 เหลือประมาณ 7.83±0.06) ถึงแม้ว่าค่า pH จะลดลงไม่มากในเชิงตัวเลข แต่ถือว่าค่อนข้างสำคัญเนื่องจากบ่งชี้ว่าเส้นใยผักตบชวาสามารถดูดซับไอออนไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตบางส่วนผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุหรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบนผิวก้อนเส้นใย 2) ค่า TDS ลดลง ร้อยละ 4.99 (จากค่าเริ่มต้น 496.8±34.8 เหลือประมาณ 472.0±28.3) แสดงให้เห็นว่าไส้กรองสามารถกรองเอาของแข็งที่ละลายน้ำบางส่วนออกไป เช่น เกลือแร่และสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ซึ่งอาจเกิดจากการดูดซับทางกายภาพตามรูพรุนของเส้นใย 3) ค่า EC ลดลง ร้อยละ 6.70 (จากค่าเริ่มต้น 244.1±9.2 เหลือประมาณ 228.0±10.6) ซึ่งเป็นอัตราการลดลงที่สูงที่สุดในสามตัวแปร สะท้อนว่าความสามารถในการนำไฟฟ้าของน้ำลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากไอออนอิสระในน้ำถูกดูดซับหรือกักไว้ในโครงสร้างเส้นใยของไส้กรองจึงส่งผลให้ความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าในสารละลายลดลง

จากการทดลองไส้กรองความหนา 5 ซม. ให้ประสิทธิภาพการกรองดีที่สุดนั้น อาจอธิบายได้ด้วยปัจจัยเชิงกลไกหลายประการ ได้แก่ 1) ระยะเวลาสัมผัสที่ยาวนานขึ้นเนื่องจากเมื่อน้ำไหลผ่านชั้นเส้นใยที่หนาขึ้น น้ำจะใช้เวลามากขึ้นในการซึมผ่าน ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนและการดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพ 2) พื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้น เพราะที่ความหนาที่มากกว่าทำให้พื้นที่ผิวต่อปริมาตรน้ำสูงขึ้น ทำให้เกิดตำแหน่งดูดซับจำนวนมากขึ้น ทำให้การจับกับสารปนเปื้อนมีมากขึ้นตาม อย่างไรก็ตามแม้ไส้กรองจะลดลงค่า pH, TDS และ EC แต่ยังอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ (ไม่เกินร้อยละ 7) ซึ่งบ่งชี้ว่าไส้กรองเส้นใยผักตบชวาเพียงอย่างเดียวอาจไม่สามารถใช้กรองน้ำบริโภคได้ แต่มีศักยภาพในการใช้เป็นขั้นตอนการกรองหยาบในระบบบำบัดน้ำขนาดเล็กหรือในระดับชุมชน เพื่อลดภาระให้กับระบบกรองหลัก นอกจากนี้ ความหนา 5 ซม. ยังถือเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้ เนื่องจากความหนาที่มากขึ้นอาจทำให้อัตราการไหลลดลงมากเกินไปจนไม่เหมาะกับการใช้งานจริง ซึ่งควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติมในขั้นตอนถัดไป

3. ผลของนาโนเซลลูโลสต่อไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวา

3.1 ผลของนาโนเซลลูโลสต่อการลดลงของค่า TDS และ EC ในน้ำที่ผ่านการกรอง

ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยได้ปรับปรุงประสิทธิภาพของไส้กรองน้ำที่ผลิตจากเส้นใยผักตบชวา โดยการเติมนาโนเซลลูโลส ซึ่งเป็นอนุภาคนาโนเซลลูโลสที่สกัดได้จากเส้นใยผักตบชวาเช่นเดียวกันลงในไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาที่มีความหนา 5 ซม. ซึ่งเป็นความหนาของไส้กรองที่สามารถลดค่า pH, TDS และ EC ได้มากที่สุดในบรรดาความหนาทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง และมีเสถียรภาพการกรองดีที่สุดในกรณีที่ยังไม่ได้เติมนาโนเซลลูโลส โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 3 เงื่อนไข คือ

1) ชุดควบคุม – ไส้กรองเส้นใยผักตบชวาที่ไม่มีการเติมนาโนเซลลูโลส

2) ชุดทดลองที่ 1 – เติมนาโนเซลลูโลสในอัตราส่วน ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ของเส้นใยผักตบชวา

3) ชุดทดลองที่ 2 – เติมนาโนเซลลูโลสในอัตราส่วน ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ของเส้นใยผักตบชวา

ผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมนาโนเซลลูโลสลงไปในไส้กรองน้ำเส้นใยผักตบชวา ให้ผลเชิงบวกต่อประสิทธิภาพการกรองน้ำของไส้กรอง โดยไส้กรองสามารถลดค่า pH, TDS และ EC ของน้ำเสียมากกว่าเมื่อเทียบกับไส้กรองที่ไม่เติมนาโนเซลลูโลส โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราส่วนการผสมนาโนเซลลูโลสร้อยละ 10 สามารถลดค่าพารามิเตอร์ทั้งสามได้สูงสุด โดยสามารถลดค่า pH จากชุดควบคุมถึง ร้อยละ 4.45±0.07 (คิดเป็นค่าที่ลดลงประมาณ 0.36–0.38 หน่วย pH) ซึ่งถือเป็นการปรับสมดุลความเป็นด่างของน้ำให้เข้าใกล้ความเป็นกลางมากขึ้น สาเหตุเนื่องจากการที่นาโนเซลลูโลมีสภาพเป็นกรดอ่อน ๆ บนพื้นผิวสามารถทำปฏิกิริยาสะเทินกับไอออนไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตในน้ำได้ เช่นเดียวกันไส้กรองน้ำสามารถลดค่า TDS ลงร้อยละ 10.16±0.04 ซึ่งเป็นอัตราที่สูงกว่าการเพิ่มความหนาของไส้กรองเพียงอย่างเดียว (ซึ่งลดได้สูงสุด 4.99% ที่ความหนา 5 ซม.) แสดงให้เห็นว่านาโนเซลลูโลสมีกลไกการดูดซับที่ดีกว่าเส้นใยขนาดใหญ่ สาเหตุเนื่องจากอนุภาคนาโนสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างเส้นใยของไส้กรองน้ำจากผักตบชวาและเพิ่มพื้นที่ผิวในการจับกับเกลือแร่ที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในส่วนของค่า EC ไส้กรองน้ำจากผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลสสามารถลดค่า EC ได้ร้อยละ 11.05±0.07 ซึ่งเป็นอัตราการลดลงสูงสุดในทุกตัวแปร แสดงให้เห็นว่านาโนเซลลูโลสสามารถดูดซับไอออนอิสระได้ดี อาจเนื่องมาจากประจุลบบนผิวของนาโนเซลลูโลสสามารถยึดเหนี่ยวไอออนบวกไว้ที่ผิว ทำให้ความเข้มข้นของตัวนำไฟฟ้าในน้ำลดลง

ตารางที่4 เปรียบเทียบสารตกค้างในน้ำที่ผ่านไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาในกรณีที่ไม่ผสมนาโนเซลลูโลส, ผสมนาโนเซลลูโลส ร้อยละ 5 และผสมนาโนเซลลูโลส ร้อยละ 10 ต่อน้ำหนักมวลเส้นใยผักตบชวา

ตัวแปร	น้ำเสียก่อนผ่านการกรอง	ไส้กรองผสมนาโนเซลลูโลส ร้อยละ 5		ไส้กรองผสมนาโนเซลลูโลส ร้อยละ 10	
		ผลการกรอง	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง	ผลการกรอง	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง
อุณหภูมิ (°C)	29.37 (0.23)	28.63 (0.23)	-2.52 (0.03)	28.90 (0.01)	-1.60 (0.05)
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	8.09 (0.04)	8.03 (0.05)	-0.74 (0.02)	7.73 (0.06)	-4.45 (0.07)
ปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำ (mg/L)	597.33 (2.31)	574.67 (3.06)	-3.79 (0.06)	536.67 (5.03)	-10.16 (0.04)
สภาพนำไฟฟ้า (µS/cm)	298.67 (1.53)	285.00 (4.58)	-4.58 (0.05)	265.67 (2.08)	-11.05(0.07)

3.2 อัตราการกรองน้ำของไส้กรองน้ำที่ผสมนาโนเซลลูโลส

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรองของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส กับการกรองน้ำโดยใช้วัสดุธรรมชาติอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าอัตราการกรองของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส มีอัตราการกรองอยู่ที่ 0.0070 ลิตร/วินาที หรือคิดเป็นประมาณ 25.2 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับไส้กรองจากเปลือกสน ใยกระบองเพชร ทรายละเอียด ซึ่งมีอัตราการกรองเพียง 0.0031 ลิตร/วินาที (ประมาณ 11.2 ลิตร/ชั่วโมง) [7] พบว่าไส้กรองผักตบชวามีอัตราการไหลสูงกว่า 2.26 เท่า แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเส้นใยผักตบชวามีความพรุนตัวสูงกว่าและมีความต้านทานต่อการไหลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุผสมที่มีเปลือกสนและใยกระบองเพชร ซึ่งอาจมีเส้นใยที่เหนียวและแน่นกว่าทำให้น้ำไหลผ่านได้ช้ากว่า

3.3 ประสิทธิภาพในการลดค่า pH ของไส้กรองน้ำที่ผสมนาโนเซลลูโลส

เช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาการลดค่า pH ของไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส กับการกรองน้ำที่ใช้เปลือกสนผสมใยกระบองเพชรและทรายละเอียดซึ่งมีประสิทธิภาพลด pH สูงสุดที่ ร้อยละ 13.65 [7] ซึ่งมากกว่าระบบผักตบชวา (ร้อยละ 4.45) ถึงประมาณ 3 เท่า แสดงให้เห็นว่าวัสดุเหล่านั้นมีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อนหรือมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถสะเทินประจุในน้ำได้ดีกว่าเส้นใยผักตบชวา โดยเฉพาะเปลือกสนซึ่งมักมีสารประกอบฟีนอลิกและกรดแทนนินที่สามารถปลดปล่อย H^+ไอออนลงสู่น้ำ ช่วยปรับสมดุลความเป็นด่างได้ดี อย่างไรก็ตาม การลด pH ที่มากเกินไปอาจทำให้น้ำที่ผ่านการ กรองมีความเป็นกรดสูงขึ้น (อาจต่ำกว่า 6.5) ทำให้เกิดการกัดกร่อนท่อหรือการละลายโลหะหนักจากท่อประปาหรือภาชนะบรรจุได้ ดังนั้นการลด pH อย่างพอเหมาะ (ค่า pH 7.5–8.0) จะเหมาะสำหรับการนำไปใช้อุปโภคมากกว่า นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองครั้งนี้กับการกรองน้ำโดยใช้เส้นใยเปลือกมะพร้าว, ถ่านไม้ ซังขาวโพด เปลือกหอย และชั้นหินกรวด ซึ่งมีการลด pH อยู่ที่ ร้อยละ 5.73 [5] ซึ่งใกล้เคียงกับระบบผักตบชวา (4.45%) แสดงให้เห็นว่าการกรองโดยใช้วัสดุทั้งสองแบบอาจมีกลไกการ กรองที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคืออาศัยการดูดซับเชิงกลและการแลกเปลี่ยนประจุบนพื้นผิวของถ่านไม้และแกลบที่มีรูพรุนสูง

3.4 ประสิทธิภาพในการลดค่า TDS

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการลดค่า TDS การกรองน้ำโดยใช้เส้นใยเปลือกมะพร้าว, ถ่านไม้, ซังขาวโพด, เปลือกหอย และชั้นหินกรวดสามารถลด TDS ในน้ำได้ถึงร้อยละ 24.03 [5] ซึ่งสูงกว่าไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส ถึงเกือบ 2 เท่า แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมดังกล่าวมีศักยภาพสูงมากในการดักจับของแข็งที่ละลายน้ำโดยเฉพาะถ่านไม้ซึ่งมีโครงสร้างรูพรุนระดับไมโครและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากสามารถดูดซับสารอินทรีย์และอนินทรีย์ได้ดี อย่างไรก็ตามการกรองโดยใช้วัสดุธรรมชาติตามที่ได้กล่าวมาในการกรองน้ำจะมีประสิทธิภาพในการลดสิ่งปนเปื้อนได้ แต่เมื่อพิจารณาถึงความซับซ้อนในการผลิตและต้นทุนวัสดุจะพบว่าไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวามีข้อได้เปรียบกว่าเนื่องจากไส้กรองผักตบชวาใช้เส้นใยจากวัสดุธรรมชาติชนิดเดียวเป็นหลักและใช้นาโนเซลลูโลสที่สกัดจากผักตบชวาเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นแนวทางที่สะดวกและมีขั้นตอนน้อยกว่าการใช้วัสดุหลากหลายชนิดในการ กรองน้ำ

3.5 ประสิทธิภาพในการลดค่า EC

ไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส มีประสิทธิภาพลด EC อยู่ที่ร้อยละ 11.05 เมื่อเทียบกับการกรองน้ำโดยใช้เส้นใยเปลือกมะพร้าว, ถ่านไม้, ซังขาวโพด, เปลือกหอย และชั้นหินกรวด ที่สามารถลด EC ได้เพียงร้อยละ 2.61 [5] ซึ่งน้อยกว่ามาก แสดงให้เห็นว่าแม้การใช้วัสดุธรรมชาติดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการลดค่านำไฟฟ้าในน้ำได้น้อย นั่นหมายความว่าสารที่ถูกกรองออกส่วนใหญ่เป็นสารไม่มีประจุหรือสารอินทรีย์ที่ไม่ก่อให้เกิดการนำไฟฟ้า เช่น สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ในขณะที่ไอออนอิสระในน้ำยังคงอยู่สูง ส่งผลให้ค่า EC ยังคงสูง ในทางตรงกันข้าม ระบบผักตบชวาสามารถลด EC ได้สูงกว่า แสดงให้เห็นว่านาโนเซลลูโลสที่เติมลงไปมีกลไกในการดูดซับไอออนอิสระทำให้จำนวนตัวนำประจุในน้ำลดลงซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญหากต้องการนำน้ำไปใช้ในระบบที่ไวต่อค่าความนำไฟฟ้า เช่น ระบบชลประทานพืช หรือน้ำหล่อเย็นในอุตสาหกรรม

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลของการกรองน้ำของไส้กรองน้ำจากผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลสกับวัสดุธรรมชาติอื่นๆ

วัสดุกรอง	อัตราการกรอง (ลิตร/วินาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่า pH	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่า TDS	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่า EC
เส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลสร้อยละ 10	0.0070	-4.45	-10.16	-11.05
เส้นใยเปลือกมะพร้าว, ถ่านไม้, ซังขาวโพด, เปลือกหอย และชั้นหินกรวด[5]	-	-5.73	-24.03	-2.61
เปลือกสน ใยกระบองเพชร ทรายละเอียด [7]	0.0031	-13.65	-	-

สรุปผล

การวิจัยนี้ได้ประสบความสำเร็จในการผลิตต้นแบบไส้กรองน้ำชีวภาพจากเส้นใยผักตบชวาผสมกับนาโนเซลลูโลสที่สกัดจากใยผักตบชวา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกรอง จากการทดลองพบว่าไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาที่ยังไม่ได้ผสมนาโนเซลลูโลสที่ความหนา 5 ซม. รัศมี 2.5 ซม. ให้ผลดีที่สุดในแง่ของความเสถียรของอัตราการไหล ปริมาณน้ำที่กรองได้ และการลดค่าสารปนเปื้อน เช่น pH, TDS และ EC เมื่อทดสอบกับการกรองกับน้ำเสียที่ได้มาจากแหล่งชุมชน ในอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ในการทดลองพบว่าไส้กรองดังกล่าวมีอัตราการกรองน้ำอยู่ที่ 0.0070 ลิตรต่อวินาที นอกจากนี้ในการทดลองพบว่าการเติมนาโนเซลลูโลสลงในไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวา ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ต่อมวลของเส้นใยผักตบชวา สามารถลดค่า pH, TDS และ EC จากตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ทดสอบได้ร้อยละ 4.45, 10.16 และ 11.05 ตามลำดับ ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการผลิตไส้กรองน้ำจากเส้นใยผักตบชวาผสมนาโนเซลลูโลส และผู้วิจัยจะนำไส้กรองน้ำที่ได้ในงานวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อยอดเพื่อพัฒนาเป็นไส้กรองน้ำสำหรับกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดได้ รวมทั้งยังเป็นการแก้ไขปัญหาในการจัดการวัชพืชอย่างผักตบชวาได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณต่อห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด และ ห้องปฏิบัติการ บริษัท เอส เอส ซี ออยล์ จำกัด เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนทางด้านการวิเคราะห์ทางเคมีและจุลชีววิทยาอย่างครบวงจร ตลอดจนการทดสอบสารปนเปื้อนชนิดต่าง ๆ ในแหล่งน้ำดิบที่ใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ซึ่งนับเป็นส่วนสำคัญยิ่งที่ทำให้งานวิจัยสามารถดำเนินไปได้ด้วยความถูกต้อง แม่นยำ และเป็นไปตามมาตรฐานสากล นอกจากการวิเคราะห์สารปนเปื้อนในแหล่งน้ำเสียแล้ว ทั้งสองห้องปฏิบัติการยังได้ให้ความร่วมมือในการตรวจวัดปริมาณสารตกค้างหลากชนิด ทั้งสารอินทรีย์ระเหยง่าย โลหะหนัก สารแขวนลอย และจุลินทรีย์ก่อโรค ในน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองด้วยไส้กรองน้ำผสมเส้นใยผักตบชวา ผู้วิจัยขอขอบคุณในน้ำใจ ความเชี่ยวชาญ และความละเอียดรอบคอบของทีมนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการเก็บตัวอย่าง วิเคราะห์ผล และจัดทำรายงานอย่างโปร่งใส ครบถ้วน และทันตามกำหนดเวลา ซึ่งเป็นการสนับสนุนที่เหนือความคาดหมายและมีคุณค่ายิ่งต่องานวิจัยชิ้นนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Walker JT, Surman-Lee S, McDermott PJ, Weinbren MJ. Safe water in healthcare, a practical and clinical guide. 1st ed. New York: Academic Press; 2023. https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780323904926/safe-water-in-healthcare
2. Li X, Jiang L, Li H. Application of ultrafiltration technology in water treatment. IOP Conf Ser Earth Environ Sci. 2018; 186(3): 1-6. doi:10.1088/1755-1315/186/3/012009
3. Geetha M, Veettil RP, Sadasivuni KK. Green solutions for clean water: Natural materials in contaminant detection and removal. Trends Environ Anal Chem. 2025; 48: e00285. doi:10.1016/j.teac.2025.e00285
4. Kakde S, Roundhal H, Nimbr S, Lokhande K, Rayat V. Low-cost water filter using local material. Int J Green Energy. 2026; 3(1): 22-31. doi:10.34218/IJOGE_03_01_002
5. Afreen M, Suma Y, Sri MS, Rohit G, Ashish Raju JD. Low cost water purifier using natural and waste material. J Phys Conf Ser. 2024; 2779(1): 012091. doi:10.1088/1742-6596/2779/1/012091
6. Katre F, Vaidya D, Kamble A, Patil A, Shrirang A, Kodape S. Economical Water Purifier Using Natural and Waste Materials. Int J Eng Res Technol. 2020; 7(1): 2168-2170. https://www.irjet.net/archives/V7/i1/IRJET-V7I1388.pdf
7. Praveen DD, Kavitha S, Anantha K, Assif Ali J. Water filter using natural materials. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2018; 5(10): 1859-1865. https://www.semanticscholar.org/paper/WATER-FILTER-USING-NATURAL-MATERIALS-Dathan-Krishnan/410b6f088d51b1633ad0fcd032160fd51f2e1330
8. Salama A, Abouzeid R, Leong WS, Jeevanandam J, Samyn P, Dufresne A, Bechelany M, Barhoum A. Nanocellulose-Based Materials for Water Treatment: Adsorption, Photocatalytic Degradation, Disinfection, Antifouling, and Nanofiltration. Nanomaterials. 2021; 11(11): 3008. doi:10.3390/nano11113008
9. Abdelhamid HN. Nanocellulose-Based Materials for Water Pollutant Removal: A Review. Int J Mol Sci. 2024; 25(15), 8529. doi:10.3390/ijms25158529
10. Liu S, Low ZX, Hegab HM, Xie Z, Ou R, Yang G, Simon GP, Zhang X, Zhang L, Wang H. Enhancement of desalination performance of thin-film nanocomposite membrane by cellulose nanofibers. J Membr Sci. 2019; 592, 117363. doi:10.1016/j.memsci.2019.117363
11. Valencia L, Monti S, Kumar S, Zhu C, Liu P, Yu S, Mathew AP. Nanocellulose/graphene oxide layered membranes: elucidating their behaviour during filtration of water and metal ions in real time. Nanoscale. 2019; 11(46), 22413-22422. doi:10.1039/C9NR07116D
12. Cheik D. Developing Of Water Hyacinth Fibre Extraction ForReasearching Sustainable Apparel Fibre. J Text Sci Eng. 2021; 11(9): 459. https://www.hilarispublisher.com/open-access/developing-of-water-hyacinth-fibre-extraction-for-reasearching-sustainable-apparel-fibre-85781.html

13. Habibie S, Suhendra N, Setiawan BA, Hamzah M, Aisah N, Fitriani DA, Tasomara R, Anggaravidya M. Prospect of Ramie Fiber Development in Indonesia and Manufacturing of Ramie Fiber Textile-based Composites for Industrial Needs, an Overview. Int J Compos Mater. 2021; 11(3): 43-53. doi:10.5923/j.cmaterials.20211103.01
14. Abral H, Hartono J. Moisture absorption of starch based biocomposites reinforced with water hyacinth fibers. IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2017; 213(1): 012035. doi:10.1088/1757-899X/213/1/012035
15. Churko EE, Nhamo L, Chitakira M. Phytoremediation Capacity of Water Hyacinth (Eichhornia crassipes) as a Nature-Based Solution for Contaminants and Physicochemical Characterization of Lake Water. Water. 2023; 15(14): 2540. doi:10.3390/w15142540
16. Kar S, Paul S, Singh RK, Parveen S, Hossain K, RoyChowdhury A. Application of water hyacinth for phytoremediation of ammoniacal nitrogen. Nitrogen. 2026; 7(1), 27. doi:10.3390/nitrogen7010027
17. Amalina F, Abd Razak AS, Krishnan S, Zularisam AW, Nasrullah M. Dyes removal from textile wastewater by agricultural waste as an absorbent--a review. Clean Waste Syst. 2022; 3: 100051. doi:10.1016/j.clwas.2022.100051
18. Pisitsak P, Phamonpon W, Soontornchatchavet P, Sittinun A, Ummartyotin S, Buajarern S, Inprasit T. The use of water hyacinth fibers to develop chitosan-based biocomposites with improved Cu2+ removal efficiency. Compos Commun. 2019; 16, 1-4. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452213919301263
19. Wong KJ, Leiu YX, Hoo DY, Kikichi Y, Kanematsu Y, Tan KW, Teah HY. Life cycle assessment and techno-economic analysis of nanocellulose synthesis via chlorine-free biomass pretreatments. Process Saf Environ Prot. 2025; 203(A). doi:10.1016/j.psep.2025.107912
20. Nuthongkum P, Noonuruk R, Bootchanont A, Porjai P,Wattanawikkam C, Pavasupree S, Tatmala N, Chanchula N, Pecharapa W, Junlabhut P. RSM optimization of spray-coating parameters to enhance paper strength using cellulose nanocrystals extracted from young coconut husks. Nord Pulp Pap Res J. 2025;40(3), 599-614. doi:10.1515/npprj-2025-0005

บทความวิจัย (Research Article)

การออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชน โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

Design and Development of a Community-Scale Charcoal Briquette Mixing and Compaction Machine Using Quality Function Deployment

พีระวัฒน์ คำชนะ[1] ไวรุจน์ อิ่มโพ[1*] และ ภาณุวัฒน์ วงค์แสงน้อย[1]
Peerawat Khamchana[1], Wairut Impho[1] and Phanuwat Wongsangnoi[1]
[1]*คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร*
[1]*Faculty of Industrial Technology, Sakon Nakhon Rajabhat University*
[*]Corresponding author; email: Wairut@snru.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
13 สิงหาคม 2569	1 ตุลาคม 2569	1 ตุลาคม 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชน โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ ทดสอบสมรรถนะของเครื่อง และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน เครื่องต้นแบบได้รับการออกแบบจากความต้องการของผู้ผลิตถ่านแท่งในชุมชน จำนวน 20 คน โดยใช้การสัมภาษณ์ แบบสอบถาม การสังเกตกระบวนการผลิตเดิม และการวิเคราะห์บ้านคุณภาพ เพื่อแปลงความต้องการของผู้ใช้เป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรม เครื่องต้นแบบประกอบด้วยถังผสมวัตถุดิบ ชุดเพลากวนและใบกวน ระบบส่งกำลัง ช่องลำเลียงส่วนผสม ชุดอัดถ่านแท่งแนวนอน และโครงสร้างรองรับ การทดสอบสมรรถนะดำเนินการกับวัตถุดิบ 3 ชนิด ได้แก่ ผงถ่านจากไม้ตะเกียบ ผงถ่านจากกะลามะพร้าว และกากกาแฟแห้ง โดยกำหนดเวลาผสม 5 นาทีเท่ากันทุกสูตร ผลการทดสอบพบว่า เครื่องมีกำลังการผลิตเฉลี่ย 45.71 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการอัดเฉลี่ย 92.21% ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของส่วนผสม (Coefficient of Variation: CV) เฉลี่ย 5.27% และอัตราการแตกหักเฉลี่ย 5.62% ถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวให้ค่าความร้อนสูงสุด 5,535.36 แคลอรีต่อกรัม รองลงมาคือผงถ่านจากไม้ตะเกียบ 5,354.76 แคลอรีต่อกรัม และกากกาแฟแห้ง 4,680.91 แคลอรีต่อกรัม ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานอยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ย 4.53 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.51 แสดงว่าเครื่องต้นแบบมีความเหมาะสมต่อการผลิตถ่านอัดแท่งระดับชุมชน โดยเฉพาะเมื่อใช้ผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ตะเกียบเป็นวัตถุดิบหลัก

คำสำคัญ: เครื่องผสมและอัดถ่านแท่ง, ถ่านอัดแท่ง, การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ, บ้านคุณภาพ

Abstract

This research aimed to design and develop a community-scale charcoal briquette mixing and compaction machine using Quality Function Deployment (QFD), to evaluate its performance, and to assess user satisfaction. The machine design was based on the requirements of 20 community charcoal briquette producers. Data were collected through interviews, questionnaires, observation of the existing production process, and House of Quality analysis to translate user requirements into engineering specifications. The prototype consisted of a raw material mixing tank, stirring shaft and blades, power transmission system, material conveying chute, horizontal briquette compaction unit, and supporting frame. Machine performance was tested using three raw materials: chopstick charcoal powder, coconut shell charcoal powder, and briquette made from dried spent coffee grounds. The mixing time was fixed at 5 minutes for all formulations. The results showed that the machine achieved an average production capacity of 45.71 kg/h, an average compaction efficiency of 92.21%, an average coefficient of variation (CV) of the mixture of 5.27%, and an average breakage rate of 5.62%. The coconut shell charcoal briquette had the highest heating value of 5,535.36 cal/g, followed by chopstick charcoal briquette at 5,354.76 cal/g and dried spent coffee grounds briquette at 4,680.91 cal/g. The overall user satisfaction was at the highest level, with a mean score of 4.53 and a standard deviation of 0.51. These findings indicate that the developed machine is suitable for community-scale charcoal briquette production, particularly when coconut shell charcoal powder and chopstick charcoal powder are used as the main raw materials.

Keywords: Charcoal briquette machine, Charcoal briquette, Quality function deployment, House of quality

บทนำ

ถ่านอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีความสำคัญต่อครัวเรือน ชุมชน และสถานประกอบการ เนื่องจากสามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น ช่วยลดปัญหาของเสีย เพิ่มมูลค่าวัตถุดิบ และส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในระดับชุมชน งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าวัสดุเหลือใช้ เช่น กากโหระพาและไม้ไผ่ สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านอัดแท่งที่มีค่าความร้อนและสมบัติการใช้งานเหมาะสมได้ [1, 2] อย่างไรก็ตาม คุณภาพของถ่านอัดแท่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ อัตราส่วนของผงถ่าน ตัวประสาน น้ำ ความสม่ำเสมอของการผสม และประสิทธิภาพของการอัดขึ้นรูป ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความแน่น การคงรูป และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ [2, 3]

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า มีการพัฒนาเครื่องอัดถ่านแท่งหลายรูปแบบ เช่น เครื่องอัดถ่านแท่งจากฝักราชพฤกษ์และเครื่องอัดถ่านอัตโนมัติควบคุมด้วย PLC ซึ่งช่วยเพิ่มกำลังการผลิตและคุณภาพการอัดขึ้นรูป [4, 5] อย่างไรก็ตาม งานส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นเครื่องอัดหรือสูตรส่วนผสมเป็นหลัก ขณะที่การพัฒนาเครื่องที่บูรณาการกระบวนการผสมและอัดให้เหมาะสมกับการใช้งานระดับชุมชนยังพบไม่มากนัก เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ หรือ Quality Function Deployment: QFD เป็นเครื่องมือที่สามารถแปลงความต้องการของผู้ใช้ให้เป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรมอย่างเป็นระบบ และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องจักรต้นแบบให้ตอบสนองต่อการใช้งานจริงได้ [6, 7] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชน โดยประยุกต์ใช้เทคนิค QFD เพื่อให้ได้เครื่องต้นแบบที่ใช้งานง่าย ปลอดภัย ลดแรงงาน และเพิ่มความสม่ำเสมอของกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่ง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชน โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ
2. เพื่อทดสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งที่พัฒนาขึ้น
3. เพื่อประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งที่พัฒนาขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงประยุกต์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชน โดยประยุกต์ใช้เทคนิค QFD ในการแปลงความต้องการของผู้ใช้เป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรมของเครื่องต้นแบบ ขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วย การศึกษาสภาพปัญหาของกระบวนการผลิตเดิม การรวบรวมเสียงของผู้ใช้จากกลุ่มผู้ผลิตถ่านแท่งหรือผู้ใช้งานในชุมชน จำนวน 20 คน ด้วยการสัมภาษณ์ แบบสอบถาม และการสังเกตงานจริง การจัดทำบ้านคุณภาพเพื่อจัดลำดับความสำคัญของข้อกำหนดทางวิศวกรรม การออกแบบเครื่องด้วยโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ การสร้างเครื่องต้นแบบ การทดสอบสมรรถนะด้านการผสม การลำเลียง และการอัดขึ้นรูป และการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานด้วยแบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ เพื่อนำผลที่ได้ไปประเมินความเหมาะสมของเครื่องต้นแบบต่อการใช้งานจริงในระดับชุมชน

1. การศึกษาสภาพปัญหาและความต้องการของผู้ใช้

ผู้วิจัยศึกษาสภาพปัญหาของกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งระดับชุมชนด้วยการสังเกตกระบวนการผลิตเดิม การสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง และการรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มผู้ผลิตถ่านอัดแท่งหรือผู้ใช้งานในชุมชน จำนวน 20 คน โดยศึกษาขั้นตอนตั้งแต่การเตรียมผงถ่าน การผสมตัวประสาน การเติมน้ำ การคลุกเคล้าส่วนผสมการลำเลียงส่วนผสมเข้าสู่เครื่องอัดและการอัดขึ้นรูปถ่านแท่ง ผลการศึกษาพบว่า กระบวนการเดิมใช้แรงงานเฉลี่ยประมาณ 3 คน ใช้เวลาผสมเฉลี่ย 20 นาทีต่อชุดมีกำลังการผลิตเฉลี่ยประมาณ 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีผลิตภัณฑ์เสียจากการอัดไม่สมบูรณ์ประมาณ 15% ต่อรอบการผลิตปัญหาดังกล่าวสะท้อนข้อจำกัดด้านแรงงาน เวลา ความต่อเนื่องของกระบวนการ ความสม่ำเสมอของส่วนผสม และคุณภาพของถ่านอัดแท่ง ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลดังกล่าวเป็นฐานในการออกแบบเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งที่รวมกระบวนการผสม ลำเลียง และอัดขึ้นรูปไว้ในระบบเดียว เพื่อลดแรงงานและเพิ่มความสม่ำเสมอของการผลิต

2. การรวบรวมเสียงของลูกค้าหรือผู้ใช้

การรวบรวมเสียงของลูกค้าหรือผู้ใช้ ดำเนินการจากการรวบรวมเสียงของกลุ่มผู้ผลิตถ่านแท่งหรือผู้ประกอบการชุมชน จำนวน 20 คน โดยใช้การสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง แบบสอบถาม และการสังเกตการทำงานจริง ประเด็นที่ใช้สอบถามครอบคลุมความต้องการด้านการใช้งาน ความปลอดภัย คุณภาพของแท่งถ่าน การบำรุงรักษา และต้นทุนการผลิต ตัวอย่างความต้องการที่ได้จากผู้ใช้ ได้แก่ เครื่องต้องใช้งานง่าย ผสมวัตถุดิบได้สม่ำเสมอ อัดถ่านได้แน่น ลดแรงงาน มีความปลอดภัย ทำความสะอาดง่าย ซ่อมบำรุงสะดวก ใช้ต้นทุนเหมาะสม และมีขนาดเหมาะกับพื้นที่ปฏิบัติงานของชุมชน

3. การจัดทำบ้านคุณภาพ

ผู้วิจัยนำความต้องการของผู้ใช้มาจัดทำบ้านคุณภาพ โดยกำหนดความต้องการของผู้ใช้เป็น WHATs และกำหนดคุณลักษณะทางเทคนิคของเครื่องเป็น HOWs ได้แก่ ความจุถังผสม รูปแบบใบกวน ความเร็วรอบเพลากวน กำลังมอเตอร์ ระบบส่งกำลัง ขนาดช่องลำเลียง ขนาดกระบอกอัด ความแข็งแรงของโครงสร้าง และระบบป้องกันอันตราย จากนั้นประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง WHATs และ HOWs โดยใช้ระดับคะแนน 9, 3 และ 1 แทนความสัมพันธ์มาก ปานกลาง และน้อย ตามลำดับ ผลรวมคะแนนถ่วงน้ำหนักถูกนำมาใช้จัดลำดับความสำคัญของข้อกำหนดทางวิศวกรรม เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบเครื่องต้นแบบ โดยคำนวณคะแนนความสำคัญทางเทคนิคจากผลรวมของผลคูณระหว่างค่าน้ำหนักความสำคัญของ

ความต้องการผู้ใช้และค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของผู้ใช้กับคุณลักษณะทางเทคนิค ดังสมการที่ (1) และคำนวณร้อยละความสำคัญของข้อกำหนดทางวิศวกรรมแต่ละรายการ ดังสมการที่ (2)

$$T_j = \sum_{i=1}^{m} W_i R_{ij} \quad (1)$$

เมื่อ T_j = คะแนนความสำคัญทางเทคนิคของข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่ j
W_i = ค่าน้ำหนักความสำคัญของความต้องการผู้ใช้ที่ i
R_{ij} = ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการผู้ใช้ที่ i กับข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่ j
M = จำนวนความต้องการของผู้ใช้

$$P_j = \frac{T_j}{\sum_{j=1}^{n} Tj} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ P_j = ร้อยละความสำคัญของข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่ j
n = จำนวนข้อกำหนดทางวิศวกรรมทั้งหมด

4. การแปลงความต้องการของผู้ใช้เป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรม

ผลจากบ้านคุณภาพถูกนำมาแปลงเป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรมของเครื่องต้นแบบ โดยความต้องการด้านการผสมสม่ำเสมอถูกแปลงเป็นรูปแบบใบกวนโค้งหรือใบกวนแบบกวาดผสม ความเร็วรอบเพลากวนระหว่าง 30–60 รอบต่อนาที และความจุถังผสมระหว่าง 40–60 กิโลกรัมต่อรอบ ความต้องการด้านการลดแรงงานถูกแปลงเป็นระบบผสมและอัดต่อเนื่องผ่านช่องลำเลียงจากถังผสมไปยังชุดอัด ความต้องการด้านการอัดแน่นถูกแปลงเป็นชุดอัดแนวนอนแบบสกรูอัด ขนาดกระบอกอัดระหว่าง 45–60 มิลลิเมตร และความเร็วรอบสกรูอัดระหว่าง 200–300 รอบต่อนาที ความต้องการด้านความปลอดภัยถูกแปลงเป็นฝาครอบสายพาน จุดป้องกันชิ้นส่วนหมุน และสวิตช์ควบคุม ส่วนความต้องการด้านการบำรุงรักษาถูกแปลงเป็นโครงสร้างเปิด ตรวจสอบง่าย และสามารถถอดประกอบชิ้นส่วนสำคัญได้

5. การออกแบบเครื่องผสมและอัดถ่านแท่ง

การออกแบบเครื่องดำเนินการด้วยโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ โดยใช้ผลจาก QFD เป็นเกณฑ์กำหนดรูปแบบและขนาดเบื้องต้นของชิ้นส่วน เครื่องต้นแบบแบ่งเป็น 6 ระบบย่อย ได้แก่ 1) ชุดถังผสมวัตถุดิบด้านบน ทำหน้าที่รองรับผงถ่านตัวประสานและน้ำ โดยกำหนดความจุถังผสมระหว่าง 40–60 กิโลกรัมต่อรอบ 2) ชุดเพลากวนและใบกวน ทำหน้าที่คลุกเคล้าส่วนผสมให้สม่ำเสมอ 3) ระบบส่งกำลัง ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2 แรงม้า ถ่ายกำลังผ่านสายพานและพูลเลย์ไปยังชุดผสมและชุดอัด 4) ช่องลำเลียงส่วนผสม ทำหน้าที่ส่งวัสดุจากถังผสมลงสู่ชุดอัดอย่างต่อเนื่อง 5) ชุดอัดถ่านแท่งแนวนอน ทำหน้าที่อัดขึ้นรูปถ่านแท่งให้มีความแน่นและรูปทรงสม่ำเสมอ และ 6) โครงสร้างเครื่อง ทำจากเหล็กรูปพรรณเพื่อรองรับน้ำหนักแรงสั่นสะเทือน และแรงจากกระบวนการอัด โดยกำหนดเป้าหมายกำลังการผลิตเบื้องต้น 30–50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

6. การคำนวณออกแบบทางวิศวกรรมเบื้องต้น

การคำนวณออกแบบทางวิศวกรรมเบื้องต้นใช้เพื่อกำหนดความเหมาะสมของกำลังมอเตอร์ ระบบส่งกำลัง และชิ้นส่วนรับแรงของเครื่องต้นแบบ โดยพิจารณาสมการหลัก 3 ส่วน ได้แก่ แรงบิดของเพลาขับ อัตราทดของระบบสายพานและพูลเลย์ และความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนรับแรง เครื่องต้นแบบเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2 แรงม้า หรือประมาณ 1.49 กิโลวัตต์ ส่งกำลังผ่านระบบสายพานและพูลเลย์ไปยังชุดกวนและชุดอัด เพื่อให้ได้ความเร็วรอบที่เหมาะสมกับกระบวนการผสมและอัดขึ้นรูปถ่านแท่ง ดังสมการที่ 3 และ 4

$$T = \frac{9550.P}{n} \tag{3}$$

เมื่อ T = แรงบิดของเพลา (N.m)
P = กำลังที่ส่งผ่านเพลา (kW)
n = ความเร็วรอบของเพลา (rpm)

การคำนวณอัตราทดของระบบสายพานและพูลเลย์พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพูลเลย์ดังสมการที่ 4

$$i = \frac{N_1}{N_2} = \frac{D_2}{D_1} \tag{4}$$

เมื่อ i = อัตราทด
N_1 = ความเร็วรอบของพูลเลย์ขับ (rpm)
N_2 = ความเร็วรอบของพูลเลย์ตาม (rpm)
D_1 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพูลเลย์ขับ
D_2 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพูลเลย์ตาม

การคำนวณความแข็งแรงของวัสดุจากความสามารถในการรับแรงอัดและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างการอัด ดังสมการที่ 5

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{5}$$

เมื่อ σ = ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนรับแรง (MPa)
F = แรงอัดที่กระทำต่อกระบอกอัด (N)
A = พื้นที่หน้าตัดรับแรง (mm^2)

7. การสร้างเครื่องต้นแบบ

การสร้างเครื่องต้นแบบเริ่มจากการจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ ได้แก่ เหล็กรูปพรรณ แผ่นเหล็กสำหรับถังผสม เพลากวน ใบกวน ชุดสกรูอัด กระบอกอัด มอเตอร์ สายพาน พูลเลย์ ตลับลูกปืน และอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้า จากนั้นดำเนินการตัดและเชื่อมโครงสร้าง ประกอบถังผสม ติดตั้งเพลากวนและใบกวน ติดตั้งช่องลำเลียงส่วนผสม ประกอบชุดอัดแนวนอน ติดตั้งระบบส่งกำลัง และตรวจสอบแนวศูนย์ของเพลา ความตึงสายพาน การหมุนของชุดกวนและชุดอัด รวมถึงความมั่นคงของโครงสร้างก่อนเข้าสู่การทดสอบสมรรถนะ

8. การทดสอบสมรรถนะของเครื่อง

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องแบ่งเป็นการทดสอบการผสม การลำเลียงส่วนผสม การอัดขึ้นรูป และการทำงานต่อเนื่อง โดยใช้ส่วนผสมได้แก่ ผงถ่าน 20 กิโลกรัม แป้งมันสำปะหลัง 0.8 กิโลกรัม และน้ำ 4 ลิตร ต่อการทดสอบหนึ่งชุด ตัวชี้วัดที่ใช้ประกอบด้วย เวลาที่ใช้ในการผสม ความสม่ำเสมอของส่วนผสม อัตราการป้อนเข้าสู่ชุดอัด กำลังการผลิต ความสมบูรณ์ของแท่งถ่าน และอัตราการแตกหัก โดยคำนวณกำลังการผลิต ประสิทธิภาพการอัด ความสม่ำเสมอของส่วนผสม อัตราการแตกหักจากสมการที่ (6)–(9) ตามลำดับ

$$Q = \frac{W_o \times 60}{t_m + t_p} \tag{6}$$

เมื่อ Q = กำลังการผลิตของเครื่อง (kg/h)
W_o = น้ำหนักถ่านแท่งหลังอัด (kg)
t_m = เวลาผสม (min)
t_p = เวลาอัดขึ้นรูป (min)

$$\eta_m = \frac{W_{out}}{W_{in}} \times 100 \tag{7}$$

เมื่อ η_m = ประสิทธิภาพการอัดเชิงมวล (%)
W_{out} = น้ำหนักส่วนผสมหลังอัด (kg)
W_{in} = น้ำหนักส่วนผสมก่อนอัด (kg)

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \tag{8}$$

เมื่อ CV = ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของส่วนผสม (%)
S = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความชื้นรวมของส่วนผสมที่สุ่มเก็บจาก 5 จุด
$\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยของค่าความชื้นของส่วนผสมที่สุ่มเก็บจาก 5 จุด

$$B = \frac{N_b}{N_t} \times 100 \quad (9)$$

เมื่อ B = อัตราการแตกหักของถ่านแท่ง (%)
N_b = จำนวนถ่านแท่งที่แตกหักหรือขึ้นรูปไม่สมบูรณ์
N_t = จำนวนถ่านแท่งทั้งหมดที่ผลิตได้

9. การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

หลังจากทดสอบเครื่องต้นแบบ ผู้วิจัยประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานโดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ กลุ่มผู้ประเมินคือผู้ผลิตถ่านแท่งหรือผู้ใช้งานในชุมชน จำนวน 20 คน ประเด็นประเมินประกอบด้วย ความสะดวกในการใช้งาน ความปลอดภัย ความสม่ำเสมอของการผสม ความสามารถในการอัด ความเหมาะสมของขนาดเครื่อง ความสะดวกในการทำความสะอาด การบำรุงรักษา และความเหมาะสมต่อการใช้งานระดับชุมชน วิเคราะห์ข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังสมการที่ (10) และ (11) โดยกำหนดเกณฑ์ความพึงพอใจเป้าหมายเบื้องต้นไม่น้อยกว่า 3.50 จากคะแนนเต็ม 5.00

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} \quad (10)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum \left(X_i - \bar{X}\right)^2}{n - 1}} \quad (11)$$

เมื่อ $\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจ
X_i = คะแนนความพึงพอใจของผู้ตอบแบบสอบถามแต่ละคน
n = จำนวนผู้ตอบแบบสอบถาม
SD = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลการวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้

ผลการศึกษาสภาพปัญหาและความต้องการของผู้ใช้จากกระบวนการผลิตเดิม พบว่าสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ 4 ด้าน ได้แก่ 1) ด้านกระบวนการผลิตและแรงงาน กระบวนการเดิมมีหลายขั้นตอน ต้องขนถ่ายวัสดุระหว่างการผสมและการอัด และใช้แรงงานคนเป็นหลัก จึงต้องการเครื่องที่สามารถรวมกระบวนการผสมและอัดไว้ในระบบเดียวเพื่อลดขั้นตอนและลดแรงงาน 2) ด้านความสม่ำเสมอของส่วนผสมและการลำเลียงวัตถุดิบ พบว่าการผสมผงถ่าน ตัวประสาน และน้ำยังไม่ทั่วถึง รวมทั้งการป้อนวัสดุเข้าสู่ชุดอัดไม่ต่อเนื่อง ผู้ใช้จึงต้องการถังผสม เพลากวน ใบกวน และช่องลำเลียงที่ช่วยให้ส่วนผสมเข้าสู่ชุดอัดได้อย่างสม่ำเสมอ 3) ด้านคุณภาพถ่านแท่งและกำลังการผลิต พบว่าถ่านแท่งบางส่วนอัดไม่แน่น แตกหักง่าย และมีกำลังการผลิตต่ำ จึงต้องการชุดอัดที่ให้แรงอัดเหมาะสม ได้รูปทรงถ่านแท่งคงที่ และสามารถทำงานได้ต่อเนื่อง และ 4) ด้านความเหมาะสมต่อการใช้งานในชุมชน ผู้ใช้ต้องการเครื่องที่ใช้งานง่าย มีความปลอดภัย ทำความสะอาดและบำรุงรักษาได้สะดวก ใช้

วัสดุและอุปกรณ์ที่จัดหาได้ในท้องถิ่น มีต้นทุนเหมาะสม และซ่อมแซมได้ง่าย ผลการศึกษาดังกล่าวจึงถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการจัดทำ QFD และการกำหนดข้อกำหนดทางวิศวกรรมของเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชนในขั้นตอนถัดไป

2. ผลการรวบรวมเสียงของลูกค้าหรือผู้ใช้

ผลการรวบรวมเสียงของลูกค้าหรือผู้ใช้จากกลุ่มผู้ผลิตถ่านแท่งและผู้ประกอบการชุมชน จำนวน 20 คน พบว่าผู้ใช้ให้ความสำคัญกับเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งที่สามารถแก้ปัญหาการผลิตเดิมได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยเฉพาะด้านความสม่ำเสมอของการผสม การลดแรงงาน การอัดถ่านให้แน่นและมีรูปทรงคงที่ ความปลอดภัย ความสะดวกในการใช้งาน การทำความสะอาดและบำรุงรักษา รวมถึงต้นทุนที่เหมาะสมกับระดับชุมชน

เมื่อนำข้อมูลจากการสัมภาษณ์ แบบสอบถาม และการสังเกตการทำงานจริงมาจัดกลุ่มเป็นความต้องการของผู้ใช้หรือ Voice of Customer: VOC พบว่าสามารถสรุปความต้องการหลักได้ 7 ประเด็น ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยค่าน้ำหนักความสำคัญ (W_i) คำนวณจากค่าเฉลี่ยคะแนนความสำคัญของผู้ใช้จำนวน 20 คน ด้วยมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ

ตารางที่ 3 ผลการรวบรวมเสียงของลูกค้าหรือผู้ใช้

รหัส	ความต้องการของผู้ใช้	W_i	ลำดับ
CR1	ผสมวัตถุดิบได้สม่ำเสมอ	4.85	1
CR2	อัดถ่านได้แน่นและรูปทรงคงที่	4.80	2
CR3	ลดแรงงานและขั้นตอนการผลิต	4.75	3
CR4	มีความปลอดภัยในการใช้งาน	4.70	4
CR5	ต้นทุนเหมาะสมกับระดับชุมชน	4.65	5
CR6	ทำความสะอาดและบำรุงรักษาง่าย	4.65	6
CR7	ใช้งานง่ายและเหมาะกับผู้ใช้ชุมชน	4.50	7

จากตารางที่ 3 พบว่าความต้องการที่มีค่าน้ำหนักความสำคัญสูงสุด คือ การผสมวัตถุดิบได้สม่ำเสมอ (W_i = 4.85) รองลงมาคือ การอัดถ่านได้แน่นและมีรูปทรงคงที่ (W_i = 4.80) และการลดแรงงานและขั้นตอนการผลิต (W_i = 4.75) ตามลำดับ ผลดังกล่าวสะท้อนว่าผู้ใช้ให้ความสำคัญกับคุณภาพของส่วนผสมก่อนการอัด คุณภาพของแท่งถ่านหลังการอัด และความต่อเนื่องของกระบวนการผลิตเป็นหลัก

นอกจากนี้ ความต้องการด้านความปลอดภัย ต้นทุนที่เหมาะสม การทำความสะอาดและบำรุงรักษาง่าย รวมถึงการใช้งานที่เหมาะสมกับผู้ใช้ในชุมชน มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับสูงเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบไม่ควรมุ่งเน้นเฉพาะสมรรถนะการผลิตเท่านั้น แต่ต้องคำนึงถึงความปลอดภัย ความง่ายในการใช้งาน และความสามารถในการดูแลรักษาโดยผู้ใช้ในชุมชนด้วย ผลการรวบรวมเสียงของผู้ใช้นี้จึงถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการจัดทำบ้านคุณภาพและการแปลงเป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรมในขั้นตอนถัดไป

3. ผลการจัดทำบ้านคุณภาพ

ผลการจัดทำบ้านคุณภาพ หรือ House of Quality: HOQ ได้จากการนำความต้องการของผู้ใช้ที่รวบรวมได้ในข้อ 2 มากำหนดเป็น WHATs ได้แก่ การผสมวัตถุดิบให้สม่ำเสมอ การลดแรงงานและขั้นตอนการผลิต การอัดถ่านให้แน่นและมีรูปทรงคงที่ ความปลอดภัย ต้นทุนที่เหมาะสม การบำรุงรักษาง่าย และความสะดวกในการใช้งาน จากนั้นกำหนดข้อกำหนดทางวิศวกรรมเป็น HOWs จำนวน 10 รายการ ได้แก่ ความจุถังผสม รูปแบบใบกวน ความเร็วรอบเพลากวน ระบบส่งกำลัง

ช่องลำเลียงส่วนผสม รูปแบบสกรูอัด ขนาดกระบอกอัด โครงสร้างรองรับ ระบบป้องกันอันตราย และการถอดประกอบเพื่อบำรุงรักษา

การประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง WHATs และ HOWs ใช้ระดับคะแนน 9, 3, 1 และ 0 แทนความสัมพันธ์มาก ปานกลาง น้อย และไม่มีความสัมพันธ์ ตามลำดับ จากนั้นนำค่าน้ำหนักความสำคัญของผู้ใช้ (W_i) มาคูณกับค่าความสัมพันธ์ (R_{ij}) เพื่อคำนวณคะแนนความสำคัญทางเทคนิค (T_j) ของข้อกำหนดทางวิศวกรรมแต่ละรายการ ผลการวิเคราะห์แสดงภาพที่ 1

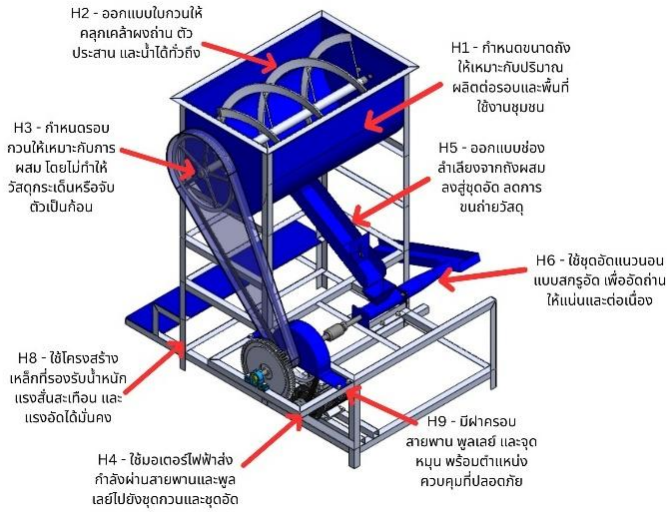
		IMP: Importance Rating	H1 ความจุผสม	H2 รูปแบบใบกวน	H3 ความเร็วรอบเพลากวน	H4 ระบบส่งกำลัง	H5 ช่องลำเลียงส่วนผสม	H6 รูปแบบสกรูอัด	H7 ขนาดกระบอกอัด	H8 โครงสร้างรองรับ	H9 ระบบป้องกันอันตราย	H10 การถอดประกอบบำรุงรักษา	Sum Rij	คะแนน
			คุณลักษณะเชิงวิศวกรรม (HOWs)											
WHATs (ความต้องการของชุมชนผู้ใช้งาน)	CR1 ผสมวัตถุดิบได้สม่ำเสมอ	4.85	3	9	9	1	3						25	121.25
	CR2 อัดถ่านได้แน่นและรูปทรงคงที่	4.80	1			9	9	3					22	105.60
	CR3 ลดแรงงานและขั้นตอนการผลิต	4.75	3			9		3		3	1		19	90.25
	CR4 มีความปลอดภัยในการใช้งาน	4.70				3	1	9	3				16	75.20
	CR5 ต้นทุนเหมาะสมกับระดับชุมชน	4.65					3			1	9	3	16	74.40
	CR6 ทำความสะอาดและบำรุงรักษาง่าย	4.65	1	1			1	3	3	3		3	15	69.75
	CR7 ใช้งานง่ายและเหมาะกับผู้ใช้ชุมชน	4.50	1			1	3			1	3	3	12	54.00
คะแนนรวมเชิงเทคนิค			42.75	48.30	43.65	109.40	94.55	84.90	28.05	37.35	60.10	41.40	590.45	
สัดส่วน (%)			7.24	8.18	7.39	18.53	16.01	14.38	4.75	6.33	10.18	7.01	100	
ลำดับ			7	5	6	1	2	3	10	9	4	8		

ภาพที่ 1 ผลการจัดลำดับข้อกำหนดทางวิศวกรรมจากบ้านคุณภาพ

จากภาพที่ 1 ผลการวิเคราะห์บ้านคุณภาพพบว่า ข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่มีความสำคัญสูงสุด คือ ระบบส่งกำลัง มีคะแนน 109.40 หรือร้อยละ 18.53 รองลงมาคือ ช่องลำเลียงส่วนผสม มีคะแนน 94.55 หรือร้อยละ 16.01 รูปแบบสกรูอัด มีคะแนน 84.90 หรือร้อยละ 14.38 ระบบป้องกันอันตราย มีคะแนน 60.10 หรือร้อยละ 10.18 และรูปแบบใบกวน มีคะแนน 48.30 หรือร้อยละ 8.18 ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การออกแบบเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชนควรให้ความสำคัญกับระบบส่งกำลังที่เหมาะสม การลำเลียงส่วนผสมเข้าสู่ชุดอัดอย่างต่อเนื่อง รูปแบบสกรูอัดที่ช่วยให้ถ่านแท่งมีความแน่นและรูปทรงคงที่ ระบบป้องกันอันตรายจากชิ้นส่วนหมุน และใบกวนที่ช่วยให้ส่วนผสมมีความสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นข้อกำหนดหลักที่นำไปใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

4. ผลการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

ผลจากการจัดทำบ้านคุณภาพถูกนำมาใช้แปลงความต้องการของผู้ใช้เป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรมของเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชน โดยกำหนดให้เครื่องต้นแบบประกอบด้วยชุดถังผสมวัตถุดิบ ชุดเพลากวนและใบกวน ระบบส่งกำลัง ช่องลำเลียงส่วนผสม ชุดอัดถ่านแท่งแนวนอน และโครงสร้างรองรับ เครื่องต้นแบบออกแบบด้วยโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ โดยกำหนดความจุถังผสม 40–60 กิโลกรัมต่อรอบ ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2 แรงม้า ส่งกำลังผ่านสายพานและพูลเลย์ ชุดอัดเป็นแบบสกรูอัดแนวนอน ขนาดกระบอกอัด 45–60 มิลลิเมตร และกำหนดเป้าหมายกำลังการผลิตเบื้องต้น 30–50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แบบสามมิติของเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชน

การสร้างเครื่องต้นแบบดำเนินการตามแบบที่กำหนด โดยเลือกใช้วัสดุและชิ้นส่วนที่จัดหาได้ง่ายในท้องถิ่น ได้แก่ เหล็กรูปพรรณ แผ่นเหล็ก เพลากวน ใบกวน ชุดสกรูอัด กระบอกอัด มอเตอร์ไฟฟ้า สายพาน พูลเลย์ ตลับลูกปืน และอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้า หลังการประกอบได้ตรวจสอบแนวศูนย์ของเพลา ความตึงสายพาน การหมุนของชุดกวนและชุดอัด และความมั่นคงของโครงสร้างก่อนเข้าสู่การทดสอบสมรรถนะ ดังแสดงในภาพที่ 3 ทั้งนี้ ก่อนนำเครื่องไปใช้งานจริงควรติดตั้งการ์ดป้องกันชุดสายพาน พูลเลย์ จุดหมุน และจุดหนีบ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานระดับชุมชน



ภาพที่ 3 เครื่องผสมและอัดถ่านแท่งต้นแบบที่สร้างเสร็จ

จากภาพที่ 3 เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นมีโครงสร้างหลักทำจากเหล็กรูปพรรณ เพื่อรองรับน้ำหนักของถังผสม ชุดส่งกำลัง และแรงที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการอัด ถังผสมถูกติดตั้งบริเวณด้านบนของเครื่องเพื่อรองรับผงถ่าน ตัวประสาน และน้ำ ส่วนเพลากวนและใบกวนติดตั้งภายในถังผสมเพื่อทำหน้าที่คลุกเคล้าส่วนผสมให้สม่ำเสมอ ช่องลำเลียงถูกติดตั้งเชื่อมต่อระหว่างถังผสมกับชุดอัด เพื่อให้ส่วนผสมสามารถไหลเข้าสู่ชุดอัดได้โดยตรง ลดการขนถ่ายวัสดุด้วยแรงงานคน และช่วยให้กระบวนการผลิตมีความต่อเนื่อง

ชุดอัดถ่านแท่งแนวนอนถูกประกอบร่วมกับชุดสกรูอัดและกระบอกอัด เพื่อทำหน้าที่อัดขึ้นรูปส่วนผสมให้เป็นแท่งถ่าน ระบบส่งกำลังใช้มอเตอร์ไฟฟ้าถ่ายทอดกำลังผ่านสายพานและพูลเลย์ไปยังชุดทำงาน โดยหลังการประกอบได้ตรวจสอบแนวศูนย์ของเพลา ความตึงของสายพาน การหมุนของชุดกวนและชุดอัด รวมถึงความมั่นคงของโครงสร้างก่อนเข้าสู่การทดสอบสมรรถนะ ผลการตรวจสอบเบื้องต้นพบว่า ชุดกวนและชุดอัดสามารถหมุนได้ต่อเนื่อง ระบบส่งกำลังทำงานได้ตามลำดับ และโครงสร้างเครื่องมีความมั่นคงเพียงพอต่อการทดสอบการผสมและอัดถ่านแท่ง

เครื่องผสมและอัดถ่านแท่งต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ทดสอบสมรรถนะในขั้นตอนถัดไปได้ โดยมีระบบการทำงานไม่ซับซ้อน ใช้วัสดุและชิ้นส่วนที่เหมาะสมกับบริบทชุมชน สามารถตรวจสอบและบำรุงรักษาได้สะดวก และมีองค์ประกอบครบสำหรับกระบวนการผลิตตั้งแต่การผสมวัตถุดิบจนถึงการอัดขึ้นรูปถ่านแท่ง

อย่างไรก็ตาม ในระยะการทดสอบเครื่องต้นแบบ ชุดสายพาน พูลเลย์ และจุดหมุนบางส่วนยังอยู่ในสภาพเปิดโล่งเพื่อความสะดวกในการตรวจสอบแนวศูนย์ การปรับตั้งความตึงสายพาน และการสังเกตการทำงานของระบบส่งกำลัง ก่อนนำเครื่องไปใช้งานจริงในระดับชุมชน จำเป็นต้องติดตั้งการ์ดป้องกันบริเวณชุดสายพานและพูลเลย์ จุดหมุนของเพลา และจุดหนีบที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งาน โดยการ์ดป้องกันควรมีความแข็งแรง สามารถป้องกันการสัมผัสชิ้นส่วนหมุนได้ ไม่รบกวนการทำงานของเครื่อง และสามารถถอดเปิดได้เฉพาะเมื่อต้องการตรวจสอบหรือบำรุงรักษาเครื่องภายใต้สภาวะหยุดการทำงาน

5. ผลการทดสอบสมรรถนะและค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องดำเนินการกับวัตถุดิบ 3 ชนิด ได้แก่ ผงถ่านจากไม้ตะเกียบ ผงถ่านจากกะลามะพร้าว และกากกาแฟแห้ง โดยกำหนดส่วนผสมต่อการทดลองหนึ่งชุดเป็นวัตถุดิบหลัก 20 กิโลกรัม แป้งมันสำปะหลัง 0.8 กิโลกรัม และน้ำ 4 ลิตร และใช้เวลาผสม 5 นาทีเท่ากันทุกสูตร ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องผสมและอัดถ่านแท่ง

วัตถุดิบ	เวลาผสม (min)	เวลาอัด (min)	น้ำหนักหลังอัด (kg)	กำลังผลิต (kg/h)	ประสิทธิภาพการอัด (%)	CV ส่วนผสม (%)	อัตราแตกหัก (%)
ผงถ่านจากไม้ตะเกียบ	5.0	23.0	23.20	49.71	93.55	4.80	4.84
ผงถ่านจากกะลามะพร้าว	5.0	25.0	23.50	47.00	94.76	4.20	3.33
กากกาแฟแห้ง	5.0	27.5	21.90	40.43	88.31	6.80	8.70
เฉลี่ย	**5.0**	**25.2**	**22.87**	**45.71**	**92.21**	**5.27**	**5.62**

จากตารางที่ 5 พบว่า เครื่องต้นแบบมีกำลังการผลิตอยู่ในช่วง 40.43–49.71 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการอัด 88.31–94.76% ค่า CV ของส่วนผสม 4.20–6.80% และอัตราการแตกหัก 3.33–8.70% โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 45.71 กิโลกรัมต่อชั่วโมง 92.21% 5.27% และ 5.62% ตามลำดับ ซึ่งกำลังการผลิตเฉลี่ยอยู่ในช่วงเป้าหมาย 30–50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง วัตถุดิบที่ให้ผลเหมาะสมที่สุดคือผงถ่านจากกะลามะพร้าว เนื่องจากมีประสิทธิภาพการอัดสูงสุด ค่า CV ต่ำสุด และอัตราการแตกหักต่ำสุด ส่วนผงถ่านจากไม้ตะเกียบให้กำลังการผลิตสูงสุด ขณะที่กากกาแฟแห้งควรปรับอัตราส่วนตัวประสานหรือน้ำเพิ่มเติมเพื่อลดอัตราการแตกหัก

การทดสอบค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งดำเนินการด้วยเครื่อง Bomb calorimeter ตามมาตรฐาน ASTM D5865 จำนวน 3 ตัวอย่างต่อสูตร ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้งต่อสูตร

วัตถุดิบ	Sample 1 (J/g)	Sample 2 (J/g)	Sample 3 (J/g)	Mean ± SD (J/g)	Mean ± SD (cal/g)	Mean ± SD (MJ/kg)
ผงถ่านจากไม้ตะเกียบ	22,890.19	23,140.30	21,182.40	22,404.30 ± 1,065.56	5,354.76 ± 254.67	22.40 ± 1.07
ผงถ่านจากกะลามะพร้าว	23,248.57	23,038.21	23,193.11	23,159.96 ± 109.03	5,535.36 ± 26.06	23.16 ± 0.11
กากกาแฟแห้ง	19,508.73	19,742.77	19,503.27	19,584.92 ± 136.73	4,680.91 ± 32.68	19.58 ± 0.14

จากตารางที่ 6 พบว่า ถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวให้ค่าความร้อนเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 23,159.96 ± 109.03 J/g หรือ 5,535.36 ± 26.06 cal/g รองลงมาคือถ่านอัดแท่งจากผงถ่านไม้ตะเกียบ มีค่าความร้อนเฉลี่ย 22,404.30 ± 1,065.56 J/g หรือ 5,354.76 ± 254.67 cal/g เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง มผช. 238/2547 ซึ่งกำหนดค่าความร้อนไม่น้อยกว่า 5,000 cal/g พบว่าถ่านอัดแท่งทั้งสองชนิดมีค่าความร้อนสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ขณะที่ถ่านอัดแท่งจากกากกาแฟแห้งมีค่าความร้อนเฉลี่ย 19,584.92 ± 136.73 J/g หรือ 4,680.91 ± 32.68 cal/g ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าว เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วย One-way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

พบว่าค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจากวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F = 27.40$, $p = 0.00096$) และเมื่อเปรียบเทียบรายคู่ด้วยวิธี Tukey's HSD พบว่า ถ่านอัดแท่งจากกากกาแฟแห้งมีค่าความร้อนต่ำกว่าถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ตะเกียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ตะเกียบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

6. ผลต้นทุนการสร้างเครื่องต้นแบบ

เพื่อประเมินความเหมาะสมด้านต้นทุนของเครื่องต้นแบบต่อการนำไปใช้จริงในระดับชุมชน ผู้วิจัยได้สรุปต้นทุนวัสดุ อุปกรณ์ ระบบส่งกำลัง ระบบควบคุม และค่าแรงประกอบ โดยจัดกลุ่มรายการต้นทุนเป็นหมวดหลักเพื่อลดความซ้ำซ้อนของรายละเอียด ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ต้นทุนโดยสรุปของการสร้างเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งต้นแบบ

รายการต้นทุน	รายละเอียดโดยสรุป	จำนวนเงิน (บาท)
วัสดุโครงสร้างและชุดผสม	เหล็กรูปพรรณ แผ่นเหล็ก ถังผสม เพลากวน ใบกวน โครงรองรับ และล้อเลื่อน	8,000
ชุดอัดและช่องลำเลียงส่วนผสม	สกรูอัด กระบอกอัด หัวอัด ช่องลำเลียง และชิ้นส่วนประกอบชุดอัด	5,600
ระบบส่งกำลัง ระบบควบคุม และความปลอดภัย	มอเตอร์ไฟฟ้า 2 แรงม้า สายพาน พูลเลย์ เพลา ตลับลูกปืน ตู้ควบคุม สวิตช์ เบรกเกอร์ สายไฟ และฝาครอบป้องกัน	8,500
ค่าแรงประกอบและวัสดุสิ้นเปลือง	งานตัด เชื่อม เจาะ ประกอบ สี ลวดเชื่อม ใบตัด และอุปกรณ์สิ้นเปลือง	3,400
รวมต้นทุนการสร้างเครื่องต้นแบบ		**25,500**

จากตารางที่ 7 พบว่า เครื่องผสมและอัดถ่านแท่งต้นแบบมีต้นทุนการสร้างรวมประมาณ 25,500 บาท โดยต้นทุนหลักอยู่ที่ระบบส่งกำลัง ระบบควบคุม ชุดผสม และชุดอัด ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อความต่อเนื่องของกระบวนการผลิต ความปลอดภัย และคุณภาพการอัดขึ้นรูป ทั้งนี้ ต้นทุนดังกล่าวอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับเครื่องต้นแบบระดับชุมชน เนื่องจากใช้วัสดุและชิ้นส่วนมาตรฐานที่สามารถจัดหาและซ่อมบำรุงได้ในท้องถิ่น

7. ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

หลังจากทดสอบสมรรถนะของเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งต้นแบบ ผู้วิจัยประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานจากกลุ่มผู้ผลิตถ่านแท่งหรือผู้ใช้งานในชุมชน จำนวน 20 คน โดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ผลการประเมินพบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจโดยรวมต่อเครื่องต้นแบบอยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ย 4.53 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.51 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์เป้าหมายที่กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 3.50 รายการที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด ได้แก่ ความเหมาะสมต่อการใช้งานระดับชุมชน มีค่าเฉลี่ย 4.70 รองลงมาคือ ความสม่ำเสมอของการผสมวัตถุดิบ มีค่าเฉลี่ย 4.65 และความสามารถในการอัดขึ้นรูปถ่านแท่ง มีค่าเฉลี่ย 4.60 สะท้อนว่าเครื่องต้นแบบสามารถตอบสนองความต้องการหลักของผู้ใช้ในด้านการใช้งานจริง การผสมวัตถุดิบ และการอัดขึ้นรูปได้ดี อย่างไรก็ตาม รายการที่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่ารายการอื่น คือ ความสะดวกในการทำความสะอาด มีค่าเฉลี่ย 4.35 และความสะดวกในการบำรุงรักษา มีค่าเฉลี่ย 4.40 แม้ยังอยู่ในระดับมาก แต่ควรปรับปรุงตำแหน่ง

ช่องเปิด จุดถอดประกอบ และคู่มือการทำความสะอาดหรือบำรุงรักษาให้ชัดเจนยิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มความสะดวกในการใช้งานระยะยาว

8. อภิปรายผล

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้เทคนิค QFD สามารถแปลงความต้องการของผู้ใช้เป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรมของเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งได้อย่างเป็นระบบ โดยข้อกำหนดสำคัญ ได้แก่ ระบบส่งกำลัง ช่องลำเลียงส่วนผสม รูปแบบสกรูอัด ระบบป้องกันอันตราย และรูปแบบใบกวน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้ QFD ในการออกแบบและพัฒนาเครื่องจักรต้นแบบ โดยสามารถแปลงความต้องการของผู้ใช้ให้เป็นข้อกำหนดทางเทคนิคที่นำไปใช้กำหนดรูปแบบโครงสร้าง และองค์ประกอบของเครื่องได้อย่างเป็นระบบ [6, 8] เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถรวมกระบวนการผสม การลำเลียง และการอัดขึ้นรูปไว้ในเครื่องเดียว จึงช่วยลดการขนถ่ายวัสดุ ลดแรงงาน และเพิ่มความต่อเนื่องของกระบวนการผลิต เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยด้านการสร้างเครื่องอัดถ่านแท่งและการประเมินประสิทธิภาพการผลิตถ่านอัดแท่ง ซึ่งมุ่งเน้นกำลังการผลิต ประสิทธิภาพการอัด และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [5, 9] งานวิจัยนี้มีจุดเด่นที่การบูรณาการชุดผสมและชุดอัดให้เหมาะสมกับการใช้งานระดับชุมชน

ด้านสมรรถนะและคุณภาพผลิตภัณฑ์ เครื่องต้นแบบมีกำลังการผลิตเฉลี่ย 45.71 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการอัดเฉลี่ย 92.21% ค่า CV ของส่วนผสมเฉลี่ย 5.27% และอัตราการแตกหักเฉลี่ย 5.62% โดยถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวให้ผลเหมาะสมที่สุด ส่วนผงถ่านไม้ตะเกียบให้กำลังการผลิตสูงสุด ขณะที่กากกาแฟแห้งมีข้อจำกัดด้านการอัดขึ้นรูปและค่าความร้อน เนื่องจากมีอนุภาคละเอียด ดูดซับน้ำ และจับตัวเป็นก้อนได้ง่าย จึงควรปรับสัดส่วนตัวประสานปริมาณน้ำ หรือใช้ร่วมกับผงถ่านชนิดอื่น แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่พัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านจากเศษวัสดุเหลือใช้ในกระบวนการผลิตกาแฟชุมชน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าลักษณะของวัตถุดิบและกระบวนการอัดมีผลต่อสมบัติทางเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ [10] เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มผช. 238/2547 พบว่าถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ตะเกียบมีค่าความร้อนผ่านเกณฑ์ ส่วนกากกาแฟแห้งต่ำกว่าเกณฑ์ จึงควรปรับสูตรส่วนผสมหรือใช้เป็นวัตถุดิบเสริมร่วมกับผงถ่านชนิดอื่น [11] ทั้งนี้ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยระดับนานาชาติที่รายงานว่า ชนิดของชีวมวล ขนาดอนุภาค และตัวประสานมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง [3, 12] นอกจากนี้ ผลความพึงพอใจของผู้ใช้งานอยู่ในระดับมากที่สุด สะท้อนว่าเครื่องต้นแบบเหมาะสมต่อการใช้งานจริงในชุมชน อย่างไรก็ตาม ควรปรับปรุงความสะดวกในการทำความสะอาด การบำรุงรักษา และติดตั้งการ์ดป้องกันชิ้นส่วนหมุนก่อนนำไปใช้งานจริง

9. สรุปผล

การวิจัยนี้ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชนโดยประยุกต์ใช้เทคนิค QFD เพื่อแปลงความต้องการของผู้ใช้เป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรม เครื่องต้นแบบสามารถรวมกระบวนการผสม การลำเลียง และการอัดขึ้นรูปไว้ในเครื่องเดียว ผลการทดสอบพบว่าเครื่องมีกำลังการผลิตเฉลี่ย 45.71 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการอัดเฉลี่ย 92.21% ค่า CV ของส่วนผสมเฉลี่ย 5.27% และอัตราการแตกหักเฉลี่ย 5.62% ถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ตะเกียบมีค่าความร้อนสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มผช. 238/2547 ขณะที่กากกาแฟแห้งควรปรับสูตรหรือใช้เป็นวัตถุดิบเสริม ผลการประเมินความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ย 4.53 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.51 แสดงว่าเครื่องต้นแบบมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงในระดับชุมชน

เอกสารอ้างอิง

1. น้ำอ้อย ปัญญา, นฎาภัสส์ คุ้มกลาง. การผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ (กากโหระพา) ในอุตสาหกรรมเครื่องหอม. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 2568; 44(2): 172-180. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/scimsujournal/article/view/261803
2. จุฑาพล จำปาแถม, ลำพูน เหลาราช, ภิตินันท์ อารยางกูร, สุรสิงห์ อารยางค์กูร. การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมและสมบัติถ่านอัดแท่งจากไม้ไผ่. วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี. 2565; 3(3): 81-93. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/atj/article/view/256174
3. J. Yirijor, A. A. T. Bere. Production and characterization of coconut shell charcoal-based bio-briquettes as an alternative energy source for rural communities. Heliyon, 2024: 10(16); e35717. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e35717
4. ปกรณ์ อุ่นไธสง, รชต มณีโชติ. การสร้างเครื่องและหาประสิทธิภาพถ่านอัดแท่งจากฝักราชพฤกษ์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี. 2562; 7(2): 147-157. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/scudru/article/view/191134
5. กันญา โกสุมภ์, กฤษณพงศ์ ชาตัน, กฤษณพงศ์ วังหอม, สหัสวรรษ มั่นหมาย. การออกแบบและพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านอัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์. วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2566; 16(1): 38-50. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/250866
6. สร้อยจีน จิตรมั่น, ฐิติพร ชัยบ้านกุด, ภัทธณีย์ แจ่มใส, บัญชา อริยะจรรยา, โรสมารินทร์ สุขเกษม, ฤภูวัลย์ จันทรสา. การพัฒนาเครื่องเลื่อยกระบอกไม้ไผ่ด้วยหลักการยศาสตร์และเทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2564; 28(2): 100-115. 2564. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/EngJCMU/article/view/244904
7. ขวัญชัย เสวีนันท์, นิตยา ศิริวัน, วรรณลักษณ์ เหล่าทวีทรัพย์. การออกแบบและพัฒนาเครื่องยิงพาเลท. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 2567; 20(1): 186-200. doi:10.14416/j.ind.tech.2024.04.013
8. ทรงวุฒิ เอกวุฒิวงศา, สมชาย เชะวิเศษ. การศึกษาและประเมินการออกแบบเพื่อพัฒนาเครื่องแปรสภาพขยะเปียกเป็นดินเทียมสำหรับเกษตรอินทรีย์: โดยใช้การจำแนกวิเคราะห์การแปลงหน้าที่ผลิตภัณฑ์เชิงคุณภาพให้เป็นแนวปฏิบัติ. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. 2560; 5(2): 15-28. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/fit-ssru/article/view/252105
9. กฤษณ์ชาคริตส ณวัฒนประเสริฐ, กุสุมา ผลาพรม. การพัฒนาต้นแบบเครื่องอัดถ่านแท่งระบบอัตโนมัติด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ของชุมชนบ้านนาโสม อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี. วารสารมหาจุฬานาครทรรศน์. 2569; 13(1): 211-219. https://so03.tci-thaijo.org/index.php/JMND/article/view/295615
10. พงษ์ศักดิ์ อยู่มั่น. การพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านในรูปแบบเกลียวอัดเย็นสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ในกระบวนการผลิตกาแฟชุมชนและการหาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงจากผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่ง. วารสารวิชาการวิทยสารบูรณาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรมประยุกต์. 2559; 9(1): 34-48. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/Itech/article/view/58548
11. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่ง มผช. 238/2547. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547. https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps238_47.pdf

12. M. Lubwama, V. A. Yiga, F. Muhairwe, J. Kihedu. Physical and combustion properties of agricultural residue bio-char bio-composite briquettes as sustainable domestic energy sources. Renewable Energy. 2020: 148; 1002-1016. doi:10.1016/j.renene.2019.10.085

บทความวิจัย (Research Article)

การประเมินสภาพและฟื้นฟูโครงสร้างลานคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล: กรณีศึกษาลานอเนกประสงค์สาธารณะเมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี

Structural Assessment and Rehabilitation of a Coastal Reinforced Concrete Platform: A Case Study of a Public Multipurpose Plaza in Pattaya City, Chonburi

อมรชัย ใจยงค์[1], เพชร์รัตน์ ลิ้มสุปรียารัตน์[1], ภัทรพร พรเทพเกษมสันต์[1],
วรรณวรางค์ รัตนานิคม[1] และ พัทรพงษ์ อาสนจินดา[1*]
Amornchai Jaiyong[1], Petcharat Limsupreeyarat[1], Patraphorn Phornthepkasemsant[1],
Wanwarang Rattananikom[1] and Pattarapong Asnachinda[1*]
[1]ศูนย์พัฒนาและที่ปรึกษาด้านวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
[1]Civil Engineering Development and Solution Center, Faculty of Engineering, Burapha University
[*]Corresponding author; email: pattarapong@eng.buu.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
15 กันยายน 2569	25 กันยายน 2569	2 ตุลาคม 2569

บทคัดย่อ

การศึกษานี้นำเสนอแนวทางการประเมินสภาพ การซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างลานอเนกประสงค์คอนกรีตเสริมเหล็ก บริเวณชายฝั่งทะเล เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี ซึ่งมีอายุกว่า 17 ปี โดยทำการสำรวจด้วยการตรวจพินิจด้วยสายตาประกอบกับการทดสอบภาคสนามอาทิ การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเจาะแกน การวัดความลึกคาร์บอเนชั่น การทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของผิวคอนกรีต โดยพบชิ้นส่วนโครงสร้างเสียหายระดับรุนแรงในหลายตำแหน่ง โดยเฉพาะบริเวณแป้นหัวเสาที่มีจำนวนชิ้นส่วนที่เสียหายรุนแรงถึงร้อยละ 32.5 และคานในโซนน้ำขึ้นน้ำลง ซึ่งมีสาเหตุหลักจากระยะหุ้มคอนกรีตที่ไม่เพียงพอ ผลการสำรวจและการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าเสาที่เสียหายรุนแรงกว่าปกติจากพฤติกรรมเสาสั้นซึ่งเกิดความเค้นภายในเพิ่มขึ้นจากผลการทับถมของทรายที่โคนเสาซึ่งทำให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงเป็น 4 เท่าของกรณีปกติ โดยกำลังอัดคอนกรีตพบว่ายังอยู่ในเกณฑ์ที่สูงกว่าค่าที่ออกแบบเดิม การฟื้นฟูสภาพโครงสร้างประกอบด้วยการซ่อมคอนกรีตหุ้มที่แตกร่อน การเปลี่ยนเหล็กเสริมที่เกิดสนิม และเสริมกำลังด้วยการพันแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ในเสาตอม่อเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดและโมเมนต์ดัดในเสาจากภาวะการโอบรัด และเปลี่ยนเหล็กเสริมด้านล่างของคานพร้อมทั้งเสริมแผ่น CFRP เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดัด ขณะที่แป้นหัวเสาที่เสียหายมากซ่อมแซมด้วยการรื้อและเทคอนกรีตใหม่ด้วยระยะหุ้มที่มากขึ้น แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบกลวงที่ชำรุดถูกเปลี่ยนเป็นระบบพื้นหล่อในที่โดยเพิ่มคานย่อยและปรับพฤติกรรมให้ถ่ายแรงแบบพื้นทางเดียว พร้อมทั้งเคลือบผิวด้วยสารไซเลน (Silane) สำหรับลดการซึมน้ำและคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตในขั้นตอนสุดท้าย

คำสำคัญ: โครงสร้างริมทะเล, ลานคอนกรีตเสริมเหล็ก, ความเสื่อมสภาพของคอนกรีตในทะเล, การเสริมกำลังด้วย CFRP, การฟื้นฟูสภาพโครงสร้าง

Abstract

This study presents an approach to the condition assessment, repair, and strengthening of a reinforced concrete multipurpose platform located along the coast of Pattaya City, Chonburi Province, which has been in service for more than 17 years. The structure was assessed through visual inspection together with field tests, including compressive strength testing of concrete cores, carbonation depth measurement, half-cell potential testing, and pull-off testing of the concrete surface. Severe damage was identified at several locations, particularly at the column caps, of which 32.5% were severely damaged, and beams within the tidal zone, primarily due to insufficient concrete cover. Field observations and structural model analyses further indicated that some columns experienced unusually severe damage associated with short-column behavior, in which sand accumulation around the column bases increased the internal stresses and produced flexural moments approximately four times those under the normal condition. The concrete compressive strength remained higher than the original design value. Structural rehabilitation included repair of deteriorated concrete cover, replacement of corroded reinforcement, and strengthening of the pier columns by wrapping them with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) to enhance axial compressive and flexural capacities through confinement. For the beams, the bottom reinforcement was replaced and supplemented with CFRP laminates to increase flexural capacity. Severely damaged column caps were demolished and recast with increased concrete cover. Damaged precast hollow-core slabs were replaced with a cast-in-place slab system incorporating additional secondary beams to provide one-way load transfer. Finally, the concrete surfaces were treated with silane to reduce water absorption and chloride penetration into the concrete.

Keywords: coastal structure, reinforced concrete platform, marine concrete degradation, CFRP strengthening, structural rehabilitation

บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อความทนทานของโครงสร้างอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการสัมผัสน้ำทะเล ไอเค็ม และวัฏจักรเปียกสลับแห้ง ซึ่งเอื้อต่อการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีต [1,2] เมื่อปริมาณคลอไรด์บริเวณผิวเหล็กเสริมสูงเกินระดับวิกฤต ชั้นฟิล์มออกไซด์ที่ป้องกันผิวเหล็กจะสูญเสียเสถียรภาพและเกิดการกัดกร่อน [3] ผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนมีปริมาตรเพิ่มขึ้นและก่อให้เกิดแรงดันภายใน ส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าว กะเทาะ และหลุดร่อน โดยเฉพาะบริเวณโซนน้ำขึ้นน้ำลงและโซนละอองคลื่น ซึ่งมีทั้งคลอไรด์และการเปลี่ยนแปลงความชื้นสูง จึงมีแนวโน้มเกิดการเสื่อมสภาพรุนแรงกว่าโซนจมน้ำหรือโซนบรรยากาศชายฝั่ง [4]

นอกจากการแทรกซึมของคลอไรด์แล้ว คาร์บอเนชั่นยังเป็นอีกกลไกหนึ่งที่อาจลดความเป็นด่างของคอนกรีตและเพิ่มความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริม [5] โดยสามารถประเมินความลึกคาร์บอเนชั่นด้วยสารฟีนอล์ฟทาลีนตามมาตรฐาน BS EN 14630 [6] ขณะที่ความเสี่ยงของการกัดกร่อนสามารถประเมินเพิ่มเติมด้วยการทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตาม ASTM C876 [7] ซึ่งให้ข้อมูลเชิงความน่าจะเป็นเกี่ยวกับการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม [8] สำหรับการประเมินความพร้อมของผิวคอนกรีตก่อนการเสริมกำลัง งานนี้พิจารณาเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบ FRP ตาม ACI 440.2R [9] ร่วมกับการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวแบบดึงออกตาม ASTM D4541 [10] การใช้ผลจากการตรวจสอบหลายวิธีร่วมกันช่วยลดข้อจำกัดของการประเมินจากความเสียหายที่มองเห็นได้เพียงอย่างเดียว สอดคล้องกับกรณีศึกษาของ Loreto และคณะ [11] และ Bayuaji และคณะ

[12] ที่แสดงถึงประโยชน์ของการบูรณาการการสำรวจภาคสนามและการทดสอบในการประเมินโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทางทะเล

เมื่อโครงสร้างเกิดความเสียหาย การเลือกวิธีซ่อมแซมและเสริมกำลังควรพิจารณาทั้งระดับความรุนแรง สมรรถนะคงเหลือขององค์อาคาร และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างต้องเผชิญ [12] ปัจจุบันพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยเฉพาะพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer: CFRP) ถูกนำมาใช้ในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักสูง ทนต่อการกัดกร่อน และเพิ่มน้ำหนักให้แก่โครงสร้างเพียงเล็กน้อย [13, 14] มาตรฐาน ACI 440.2R [9] กำหนดแนวทางการออกแบบระบบ FRP แบบติดภายนอก รวมถึงการพิจารณาผลกระทบจากสภาพแวดล้อม ขณะที่ Al Nuaimi และคณะ [15] ศึกษาความคงทนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้สภาพแวดล้อมรุนแรง ส่วน Sigit Darmawan และคณะ [16] รายงานการประเมินโครงสร้างท่าเรือคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้งานในสภาพแวดล้อมทางทะเลเป็นเวลานาน โดยสนับสนุนแนวทางการประเมินแบบบูรณาการเพื่อใช้ประกอบการกำหนดมาตรการซ่อมแซมและเสริมกำลัง

กรณีศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นลานอเนกประสงค์คอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณสวนสาธารณะตลาดลานโพธิ์ ตำบลนาเกลือ เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี ซึ่งเปิดใช้งานตั้งแต่ประมาณ พ.ศ. 2552 ระบบโครงสร้างประกอบด้วยเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง แป้นหัวเสา คานคอนกรีตเสริมเหล็ก และพื้นสำเร็จรูปแบบกลวง โดยโครงสร้างส่วนหนึ่งยื่นเหนือบริเวณทะเลและได้รับอิทธิพลจากสภาวะน้ำขึ้นน้ำลงโดยตรง หลังจากใช้งานมากกว่าหนึ่งทศวรรษพบความเสียหายหลายลักษณะ ได้แก่ การแตกร้าวและหลุดร่อนของคอนกรีต การกัดกร่อนของเหล็กเสริม และความเสียหายเฉพาะบริเวณขององค์อาคารบางประเภท การประเมินโครงสร้างดังกล่าวจึงจำเป็นต้องพิจารณาร่วมกันทั้งสภาพวัสดุ การกระจายของความเสียหาย สมรรถนะในการรับแรง และข้อจำกัดในการซ่อมแซมและเสริมกำลังภายใต้สภาพพื้นที่จริง เพื่อกำหนดแนวทางฟื้นฟูที่เหมาะสมและรองรับการใช้งานในระยะยาว

แม้งานศึกษาที่ผ่านมาจะแสดงให้เห็นความสำคัญของการประเมินการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทางทะเล รวมถึงการใช้ผลสำรวจภาคสนามและการทดสอบประกอบการตัดสินใจซ่อมแซม แต่การเชื่อมโยงสภาพหน้างานเฉพาะที่เปลี่ยนพฤติกรรมการรับแรงของโครงสร้าง กับผลการประเมินวัสดุและการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อกำหนดแนวทางฟื้นฟูยังมีรายงานค่อนข้างจำกัด เช่น ผลของการทับถมของทรายบริเวณโคนเสาตอม่อบางต้นในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งทำให้เงื่อนไขการยึดรั้งและความยาวประสิทธิผลของเสาเปลี่ยนไปจนเกิดพฤติกรรมคล้ายเสาสั้น, แนวทางการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังในแนวทางที่เหมาะสมและมีความคุ้มค่าทางวิศวกรรมตามข้อจำกัดและความสามารถในการปฏิบัติงานในพื้นที่แคบ เป็นต้น จุดเด่นของการศึกษานี้จึงอยู่ที่การบูรณาการการตรวจพินิจ การทดสอบวัสดุและการกัดกร่อนในภาคสนาม ร่วมกับการวิเคราะห์สมรรถนะและแบบจำลองโครงสร้าง เพื่อเชื่อมโยงลักษณะความเสียหายที่ตรวจพบกับสาเหตุทางกายภาพและพฤติกรรมการรับแรง และนำผลดังกล่าวไปกำหนดแนวทางฟื้นฟูที่เหมาะสมกับสภาพใช้งานจริงของโครงสร้างชายฝั่งทะเล

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) สำรวจและจำแนกขอบเขตและระดับความรุนแรงของความเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้าง (2) ประเมินสภาพคอนกรีต ความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริม และสมรรถนะของโครงสร้างจากการทดสอบภาคสนาม ห้องปฏิบัติการ และการวิเคราะห์พฤติกรรมและแรงภายในของโครงสร้างจากสภาพความเสียหายและผลของสภาพแวดล้อม และ (3) กำหนดแนวทางการซ่อมแซมและเสริมกำลังที่เหมาะสมกับสภาพความเสียหายและข้อจำกัดในการปฏิบัติงานจริง เพื่อฟื้นฟูความปลอดภัยและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง

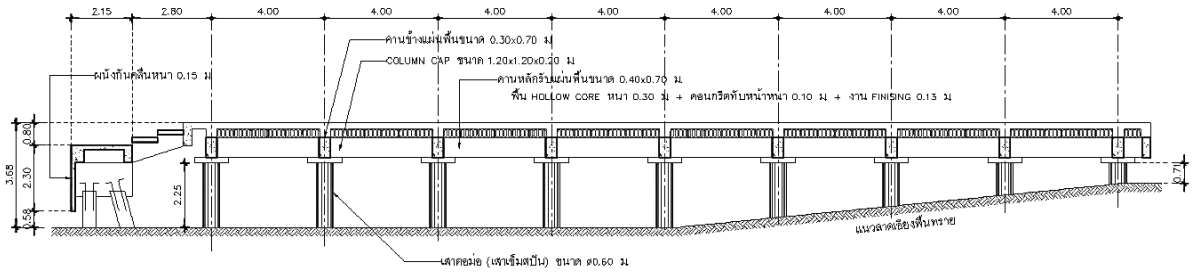
วิธีดำเนินการวิจัย

รายละเอียดโครงการและระบบโครงสร้าง

โครงสร้างที่ศึกษาเป็นลานอเนกประสงค์คอนกรีตเสริมเหล็กตั้งอยู่ในสวนเฉลิมพระเกียรติ ตลาดลานโพธิ์ อำเภอบางละมุง (เมืองพัทยา) จังหวัดชลบุรี มีขนาดพื้นที่ประมาณ 52 × 112 เมตร วางตัวในแนวขนานชายฝั่งทะเล ระบบโครงสร้างหลักประกอบด้วยเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง แป้นหัวเสา คานคอนกรีตเสริมเหล็ก และระบบพื้นสำเร็จรูปแบบกลวง (Hollow-core) แสดงดังภาพที่ 1 ทั้งนี้ โดยมีแนวเส้นกริด A ถึง M วางตัวขนานกับแนวชายฝั่งทะเล และแนวเส้นกริดที่ 1 ถึง 29 วางตัวในทิศทางตั้งฉากกับแนวชายฝั่ง ตำแหน่งโครงสร้างส่วนใหญ่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทางทะเลระดับรุนแรง โดยตั้งอยู่ในโซนน้ำขึ้นน้ำลงและโซนละอองคลื่น อีกทั้งบริเวณชายฝั่งยังมีลักษณะเป็นชายหาดลาดเอียงดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งทำให้องค์อาคารโครงสร้างสัมผัสกับน้ำทะเล ไอเค็ม และวัฏจักรเปียกสลับแห้งอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับสภาพภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อนที่มีความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิสูงตลอดปี ซึ่งเป็นปัจจัยเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริมอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 1 ภาพถ่ายทางอากาศ (ซ้าย) และผังโครงสร้างลานอเนกประสงค์ (ขวา)



ภาพที่ 2 รูปตัดตามแนวตั้งฉากกับชายฝั่งทะเล

การตรวจประเมินสภาพโครงสร้าง

การประเมินสภาพโครงสร้างในภาคสนามสำรวจด้วยการตรวจพินิจด้วยสายตา (Visual Inspection) ครอบคลุมชิ้นส่วนโครงสร้างทั้งหมดที่สามารถเข้าถึงในการสำรวจภาคสนามได้ เพื่อระบุตำแหน่งและบันทึกความเสียหาย การหลุดร่อนของคอนกรีต การโผล่พ้นผิวของเหล็กเสริมและคราบสนิม โดยจำแนกระดับความเสียหายของแต่ละองค์อาคารตามเกณฑ์ที่กำหนดในตารางที่ 1 ซึ่งกำหนดสัญลักษณ์สีเพื่อใช้ในการจัดทำแผนที่ความเสียหาย (Damage Mapping) ซึ่งมีตัวอย่างลักษณะความเสียหายแสดงดังภาพที่ 3

ตารางที่ 1 เกณฑ์การจำแนกระดับความเสียหายจากการตรวจพินิจด้วยสายตา

ความเสียหาย	ลักษณะความเสียหาย	สีแผนผัง
ระดับ 1	ไม่ปรากฏรอยแตกร้าวหรือความเสียหายที่มองเห็นได้ด้วยสายตา	-
ระดับ 2	รอยแตกร้าวเฉพาะจุดและคอนกรีตหลุดร่อนเล็กน้อย ไม่พบการสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริม	สีเหลือง
ระดับ 3	เหล็กเสริมเกิดสนิมและสูญเสียหน้าตัดอย่างมีนัยสำคัญ คอนกรีตแตกร้าวและหลุดร่อนรุนแรง	สีแดง

การทดสอบภาคสนาม

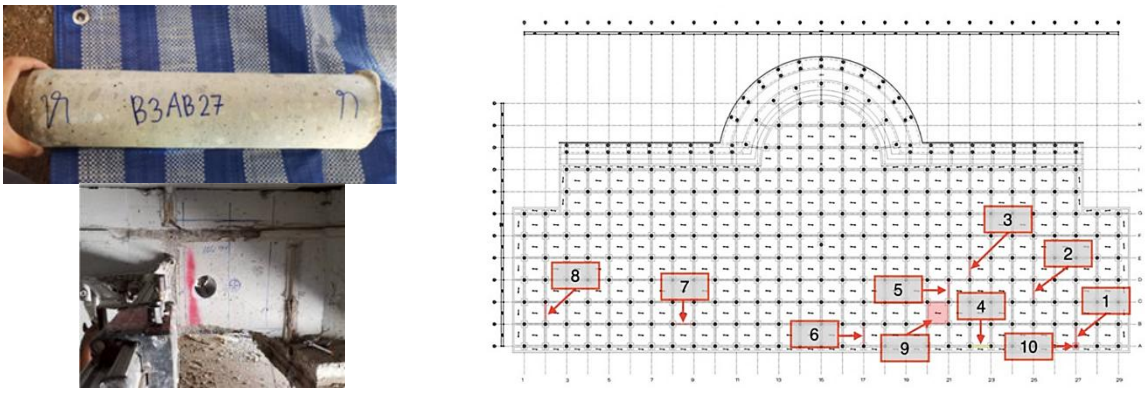
การทดสอบภาคสนามประกอบด้วยการทดสอบ 4 วิธี ได้แก่ 1) การเจาะเก็บแท่งคอนกรีตและการทดสอบกำลังรับแรงอัด 2) การทดสอบความลึกคาร์บอเนชั่น 3) การทดสอบการเกิดสนิมด้วยศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และ 4) การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตด้วยวิธีการดึงออก

การเจาะเก็บแท่งคอนกรีต (Concrete Coring) ดำเนินการตาม ASTM C42/C42M-20 [17] และทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยเก็บตัวอย่างทรงกระบอกรวม 10 แท่งจากตำแหน่งที่แตกต่างกัน ครอบคลุมชิ้นส่วนคานและเสา โดยมีตัวอย่างและแผนผังการเจาะสำรวจแสดงดังภาพที่ 4 ตัวอย่างมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) อยู่ในช่วง 1.13-1.93 สำหรับตัวอย่างที่มี L/D ไม่เกิน 1.75 ได้ปรับแก้ค่ากำลังอัดด้วยตัวประกอบตาม ASTM C42/C42M ได้แก่ 0.87, 0.93, 0.96 และ 0.98 สำหรับ L/D เท่ากับ 1.00, 1.25, 1.50 และ 1.75 ตามลำดับ และใช้การประมาณค่าเชิงเส้นสำหรับค่า L/D ระหว่างช่วงดังกล่าว ส่วนตัวอย่างที่มี L/D มากกว่า 1.75 ไม่ได้ปรับแก้ค่าเพิ่มเติม



(ก) (ข)

ภาพที่ 3 ตัวอย่างลักษณะความเสียหายในแต่ละระดับ: (ก) ความเสียหายระดับ 2 (ข) ความเสียหายระดับ 3



(ก) (ข)

ภาพที่ 4 (ก) ตัวอย่างแท่งคอนกรีตที่เจาะเพื่อนำไปทดสอบกำลังอัด (ข) ผังตำแหน่งการเจาะเก็บแท่งคอนกรีต

การทดสอบความลึกคาร์บอเนชั่นได้ทดสอบกับตัวอย่างแท่งคอนกรีตจำนวน 7 แท่ง ซึ่งเจาะเก็บจากตำแหน่งตัวแทนชิ้นส่วนคานรวม 4 ตำแหน่ง การเลือกตำแหน่งเจาะเก็บตัวอย่างยังได้พิจารณาถึงปัจจัยการสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่แตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบระหว่างชิ้นส่วนด้านที่หันออกสู่ทะเลกับด้านที่หันเข้าหาชายฝั่งเพื่อประเมินอิทธิพลของทิศทางลมและสภาพแวดล้อมต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น โดยการทดสอบอ้างอิงขั้นตอนตามมาตรฐาน BS EN 14630:2006 [6] โดยพ่นสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein Solution) ลงบนผิวหน้าของแท่งคอนกรีตที่เพิ่งกะเทาะให้แตกใหม่เพื่อสังเกตการเปลี่ยนสีของเนื้อคอนกรีต จากนั้นวัดระยะความลึกคาร์บอเนชั่นตลอดแนวที่เกิดปฏิกิริยาเพื่อคำนวณหาค่าความลึกสูงสุดและค่าความลึกเฉลี่ย

การประเมินแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้พิจารณาทดสอบในชิ้นส่วนคานซึ่งพบความเสียหายระดับ 3 จำนวน 5 ตำแหน่ง โดยใช้การทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Test) ชนิดขั้วอ้างอิงคอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต ($Cu/CuSO_4$) ตามมาตรฐาน ASTM C876-15 [7] เพื่อประเมินโอกาสความน่าจะเป็นในการเกิดการกัดกร่อนแบบแอคทีฟ ของเหล็กเสริมภายใน

การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตด้วยวิธีดึงออก (Pull-off Test) ดำเนินการขึ้นเพื่อประเมินกำลังยึดเหนี่ยวรับแรงดึงที่ผิวหน้าคอนกรีตขององค์อาคารโครงสร้างที่คาดว่าจะเสริมกำลังด้วยวิธีติดตั้งวัสดุ CFRP รวมจำนวน 10 ตำแหน่ง ตามมาตรฐาน ASTM D4541 [10] การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความพร้อมและประสิทธิภาพในการยึดเกาะของผิวหน้าคอนกรีตเดิม ก่อนการติดตั้งระบบเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) โดยต้องมีค่ากำลังยึดเหนี่ยวขั้นต่ำไม่น้อยกว่า 1.4 MPa ตามเกณฑ์ข้อกำหนดของมาตรฐาน ACI 440.2R [9]

การวิเคราะห์ย้อนกลับเพื่อหาน้ำหนักบรรทุกจรออกแบบเดิม

เนื่องจากปัญหาที่ไม่พบเอกสารรายการคำนวณและแบบก่อสร้างเดิม (As-built Drawings) ของโครงสร้างลานอเนกประสงค์ การศึกษานี้จึงใช้วิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back-Calculation) เพื่อประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจรเดิม (Design Live Load) ของโครงสร้าง โดยอาศัยทฤษฎีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design: WSD) ซึ่งเป็นมาตรฐานการออกแบบที่นิยมใช้ในยุคสมัยของการก่อสร้างดังกล่าว การวิเคราะห์ใช้ข้อมูลมิติขนาดหน้าตัดและรายละเอียดการจัดวางเหล็กเสริมที่รวบรวมได้จากการสำรวจภาคสนาม โดยเฉพาะจากบริเวณที่คอนกรีตเกิดการแตกร่อนรุนแรงจนเผยให้เห็นตำแหน่งและขนาดของเหล็กเสริม ร่วมกับผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้เจาะสำรวจ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์สมรรถนะการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนโครงสร้างหลัก ในกรณีที่ผลการสำรวจพบลักษณะความเสียหายหรือสภาพแวดล้อมเฉพาะที่อาจส่งผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้าง จะใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เพื่อประกอบการประเมินพฤติกรรมและใช้กำหนดแนวทางการฟื้นฟูสภาพที่เหมาะสม

การออกแบบซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้าง

แนวทางการซ่อมแซมและเสริมกำลัง ได้พิจารณาแบ่งเป็น 3 ระดับตามระดับความรุนแรงโดยความเสียหายระดับ 1 กำหนดให้ดำเนินการติดตามตรวจสอบสภาพโครงสร้างอย่างต่อเนื่องตามรอบระยะเวลา ความเสียหายระดับ 2 พิจารณาซ่อมแซมคอนกรีตเฉพาะจุด โดยสกัดคอนกรีตที่เสื่อมสภาพ ทำความสะอาดขจัดสนิม และฉาบซ่อมด้วยมอร์ต้าร์ซีเมนต์ชนิดไม่หดตัว ขณะที่ความเสียหายระดับ 3 พิจารณาสกัดคอนกรีตที่แตกร่อนออก ขจัดสนิมหรือตัดต่อเปลี่ยนเหล็กเสริมใหม่ เทซ่อมแซมเนื้อคอนกรีตและให้มีระยะหุ้มเพียงพอ เสริมกำลังด้วย CFRP ตามมาตรฐาน ACI 440.2R [9] โดยใช้ตัวประกอบลดค่าเนื่องจากสภาพแวดล้อมทางทะเลระดับรุนแรง โดยหากการซ่อมแซมเนื้อคอนกรีตและเสริมเหล็กทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักยังไม่เพียงพอ จะใช้แผ่น CFRP เพื่อเสริมกำลัง โดยพันรอบชิ้นส่วนเสาให้เกิดสภาวะโอบรัด (Confinement) เพื่อเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตและกำลังรับแรงดัด สำหรับคานสามารถหุ้มแผ่น CFRP บริเวณท้องคานเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดัด และหากพบความเสียหายที่ต้องรื้อถอนอาจพิจารณาเสริมชิ้นส่วนย่อยเพื่อกระจายน้ำหนักบรรทุกให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้

ในบางบริเวณที่อาจมีข้อจำกัดในการทำงานด้วยพื้นที่แคบ แนวทางการซ่อมแซมและเสริมกำลังจึงต้องพิจารณาปัจจัยความคุ้มค่าในการจัดการทางวิศวกรรมด้วยเช่นกัน และฉีดพ่นสารเคลือบผิวคอนกรีตทั้งหมดในขั้นตอนสุดท้าย เพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำและการแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาว

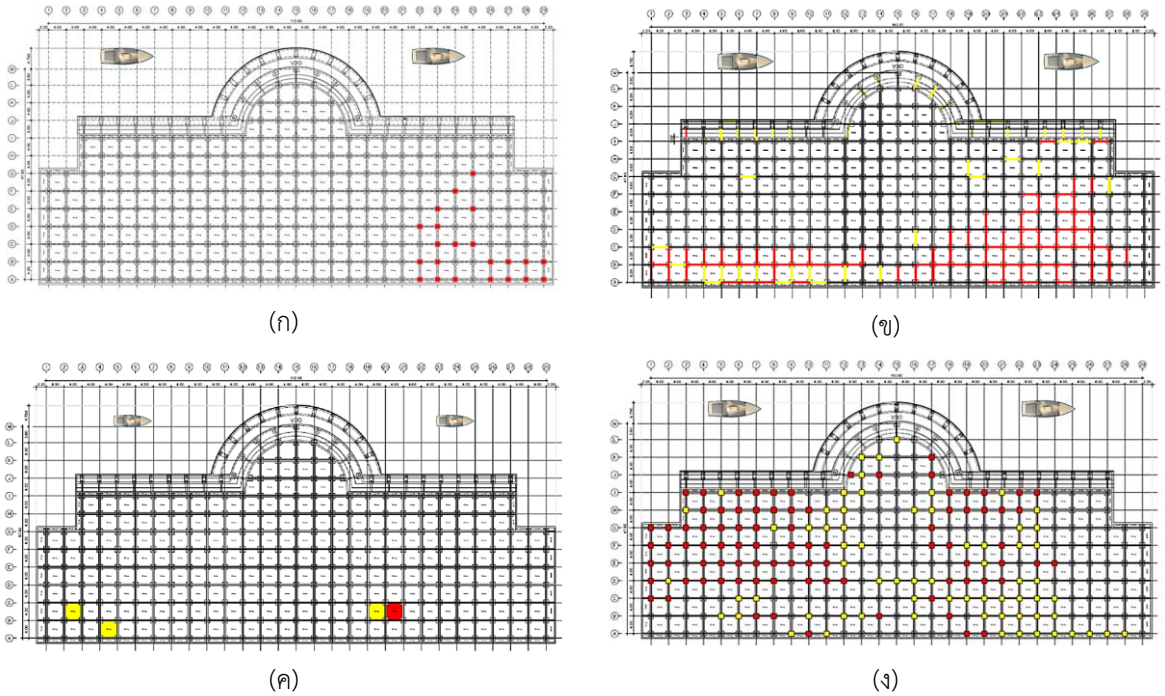
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการสำรวจความเสียหายด้วยการตรวจพินิจด้วยสายตา

ผลการตรวจพินิจพบความเสียหายกระจายตัวทั่วโครงสร้าง โดยมีการกระจุกตัวของความเสียหายระดับ 3 บริเวณแนวริมทะเลและโซนน้ำขึ้นน้ำลง จำนวนและสัดส่วนที่ตรวจพบความเสียหายแสดงดังตารางที่ 2 โดยมีแผนผังแสดงความเสียหายของเสา คาน พื้น และแป้นหัวเสา ดังภาพที่ 5 โดยพบว่าแป้นหัวเสามีสัดส่วนความเสียหายระดับ 3 สูงสุดในสัดส่วน 32.5% รองลงมาคือคานในสัดส่วน 15.1% และเสาในสัดส่วน 8.2% กระจุกตัวบริเวณใกล้ชายหาด และพื้นพบเพียง 1 ส่วนเท่านั้น

ตารางที่ 2 ผลการสำรวจความเสียหายด้วยการตรวจพินิจด้วยสายตา

องค์อาคาร	จำนวนทั้งหมด	ความเสียหายระดับ 1		ความเสียหายระดับ 2		ความเสียหายระดับ 3	
		จำนวน	สัดส่วน	จำนวน	สัดส่วน	จำนวน	สัดส่วน
เสา	268 ต้น	246	91.8%	-	-	22	8.2%
คาน	569 ช่วง	441	77.5%	42	7.4%	86	15.1%
พื้น	226 ส่วน	222	98.2%	3	1.3%	1	0.5%
แป้นหัวเสา	268 ชิ้น	114	42.5%	67	25.0%	87	32.5%



ภาพที่ 5 แผนผังความเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้าง (ก) เสา (ข) คาน (ค) พื้น และ (ง) แป้นหัวเสา

ผลการทดสอบภาคสนาม

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างแท่งคอนกรีตจากการเจาะสำรวจจำนวน 10 ตัวอย่างดังตารางที่ 3 ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดที่ปรับแก้ผลจากสัดส่วน L/D แล้ว พบว่าคอนกรีตทั้งในคานและในเสาทุกตำแหน่งมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่ากำลังอัดออกแบบที่ประเมินไว้ที่ 280 ksc และมีสภาพที่สมบูรณ์ และการเสื่อมสภาพจำกัดที่บริเวณระยะหุ้มคอนกรีตและเหล็กเสริมเท่านั้น ซึ่งสนับสนุนแนวทางการซ่อมแซมที่มุ่งเน้นการฟื้นฟูสภาพคอนกรีตหุ้มและเหล็กเสริม ร่วมกับการเสริมกำลังด้วย CFRP แทนการรื้อถอนและหล่อชิ้นส่วนใหม่

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างแท่งคอนกรีตที่เจาะสำรวจ

ตำแหน่งที่	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
แนวกริดตามแผนผัง	27/A-B	25/C-D	22/D-E	22-23/A1	22-23/A2	21/C-D	17/A-B	8-9/B1	2/C-B	A/27
ชิ้นส่วนโครงสร้าง	คาน	คาน	คาน	คาน	คาน	คาน	คาน	คาน	คาน	เสา
สัดส่วน L/D	1.92	1.92	1.93	1.45	1.41	1.92	1.91	1.13	1.13	1.88
กำลังอัด (ksc)	418	336	434	358	338	391	424	374	422	324

ผลการทดสอบความลึกคาร์บอเนชั่นในตารางที่ 4 สะท้อนความแตกต่างตามสภาพการรับสัมผัสสภาวะแวดล้อมอย่างชัดเจน โดยผิวคอนกรีตคานด้านที่หันเข้าชายฝั่งพบความลึกคาร์บอเนชั่นที่สูงกว่าที่ผิวด้านข้างขนานชายฝั่งหรือผิวด้านบน ขณะที่ไม่พบความลึกคาร์บอเนชั่นในด้านที่หันออกทะเลในทุกตัวอย่าง

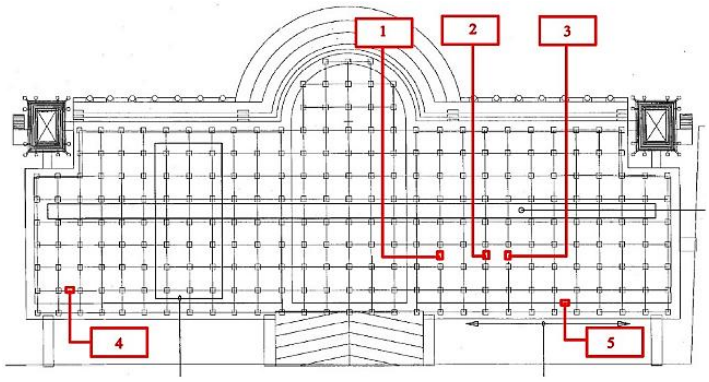
ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความลึกคาร์บอเนชั่นของชิ้นส่วนคาน

ลำดับ	**แนวกริดแผนผัง**	**การเกิดคาร์บอเนชั่น**	**ความลึกคาร์บอเนชั่น (มม.)**		**หมายเหตุ**
			ความลึกสูงสุด	**ความลึกเฉลี่ย**	
1	22-23/A1.1	ไม่พบ	–	–	ด้านหันออกทะเล
2	22-23/A2.2	พบ	14.1	12.6	ด้านหันเข้าชายฝั่ง
3	17/A-B	พบ	9.4	6.9	ด้านข้างขนานชายฝั่ง
4	8-9/B1.1	ไม่พบ	–	–	ด้านหันออกทะเล
5	8-9/B1.3	พบ	14.6	10.9	ด้านหันเข้าชายฝั่ง
6	8-9/B2.1	ไม่พบ	–	–	ด้านหันออกทะเล
7	20-21/B-C	พบ	5.6	4.7	ผิวด้านบน

การทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์บริเวณชิ้นส่วนคานที่พบความเสียหายทางกายภาพระดับ 3 จำนวน 5 ตำแหน่งแสดงดังภาพที่ 6 โดยมีผลทดสอบดังตารางที่ 5 จากผลการประเมินพบว่า ตัวอย่างส่วนใหญ่มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ไม่ต่ำกว่า -200 mV ($CuSO_4$) ซึ่งแปลผลตามมาตรฐานได้ว่า มีความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่ไม่เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมแบบแอคทีฟ (Active Corrosion) ณ ขณะทดสอบ มีเพียงตำแหน่ง HC4 เท่านั้นที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ -289 mV ซึ่งบ่งชี้ว่าไม่สามารถสรุปความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจมีความเสี่ยงพบความเสียหายจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้

จากผลการทดสอบพบว่าความแตกต่างระหว่างระดับความเสียหายทางกายภาพภายนอกระดับ 3 กับผลศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ส่วนใหญ่ยังอยู่ในช่วงที่บ่งชี้ถึงความน่าจะเป็นต่ำของการเกิดการกัดกร่อนแบบแอคทีฟ โดยพบว่าการเกิดสนิมและการแตกร่อนของคอนกรีตกระจุกตัวอยู่เฉพาะบริเวณเหล็กเสริมล่าง ณ ปลายคานที่เชื่อมต่อกับแป้นหัวเสา ซึ่งเป็นผลจากการชำรุดของแป้นหัวเสาในระดับรุนแรงหลายตำแหน่งจนเกิดการสูญเสียกำลังและเกิดการขยับตัวบริเวณรอยต่อการเทคอนกรีต (Cold Joint) ระหว่างปลายคานและแป้นหัวเสา ซึ่งก่อให้เกิดรอยแตกร้าวเฉพาะจุด ทำให้ความชื้นและคลอไรด์สามารถแทรก

ซึมเข้าถึงเหล็กเสริมล่างบริเวณปลายคานได้ง่าย ในขณะที่คอนกรีตบริเวณกลางคานและส่วนครึ่งบนของหน้าตัดยังคงมีสภาพสมบูรณ์และไม่ปรากฏรอยแตกร้าว โดยพบการกัดกร่อนเฉพาะในตำแหน่งที่ใกล้กับรอยต่อที่เสียหายซ้ำซ้อนเท่านั้น (HC4) ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Otieno และคณะ [8] ที่ชี้ว่ารอยร้าวและคุณภาพคอนกรีตมีผลต่อการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมทางทะเล และสอดคล้องกับแนวทางการประเมินแบบบูรณาการของ Loreto และคณะ [11] และ Bayuaji และคณะ [12] ทั้งนี้การทดสอบ Half-cell Potential แสดงความน่าจะเป็นของกิจกรรมการกัดกร่อน ณ ขณะและบริเวณที่ทดสอบ แต่ไม่ได้วัดอัตราการกัดกร่อนหรือการสูญเสียหน้าตัดที่สะสมในอดีตโดยตรง ดังนั้นความเสียหายที่เกิดขึ้นแล้วบริเวณ Cold Joint อาจยังปรากฏทางกายภาพแม้ค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงเวลาทดสอบจะไม่แสดงความน่าจะเป็นสูงของ Active Corrosion การแปลผลจึงควรพิจารณาร่วมกับการตรวจพินิจ สภาพรอยแตกร้าว และผลการทดสอบอื่นประกอบกัน



ภาพที่ 6 ผังตำแหน่งคานที่ทำการทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของชิ้นส่วนคาน

รหัสตัวอย่าง	ช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า (mV vs $Cu/CuSO_4$)	การแปลผลทดสอบ
HC1	-106 ถึง -85	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่ไม่มีการกัดกร่อน
HC2	-80 ถึง -70	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่ไม่มีการกัดกร่อน
HC3	-69 ถึง -63	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่ไม่มีการกัดกร่อน
HC4	-289 ถึง -61	ไม่สามารถสรุปความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนได้อย่างชัดเจน
HC5	-112 ถึง -80	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่ไม่มีการกัดกร่อน

สำหรับผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวรับแรงดึงที่ผิวหน้าคอนกรีต (Pull-off Strength Test) ตามมาตรฐาน ASTM D4541 [10] ของชิ้นส่วนโครงสร้างลานอเนกประสงค์รวม 10 ตำแหน่งทดสอบ แสดงดังตารางที่ 6 จากผลการทดสอบพบว่าค่าความแข็งแรงในการยึดเกาะของผิวหน้าคอนกรีตเดิมมีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 3.0 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์กำลังยึดเหนี่ยวขั้นต่ำที่กำหนดไว้ 1.4 MPa ตามมาตรฐาน ACI 440.2R [9] ในทุกตำแหน่งการทดสอบ ผลลัพธ์นี้ยืนยันว่าผิวหน้าคอนกรีตเดิมของชิ้นส่วนคาน เสาและท้องพื้นมีสมรรถนะความแข็งแรงรับแรงดึงเพียงพอต่อการถ่ายโอนหน่วยแรงและรองรับการติดตั้งระบบเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP โดยไม่ก่อให้เกิดการวิบัติจากการร่อนหลุดของชั้นผิวคอนกรีตเดิม

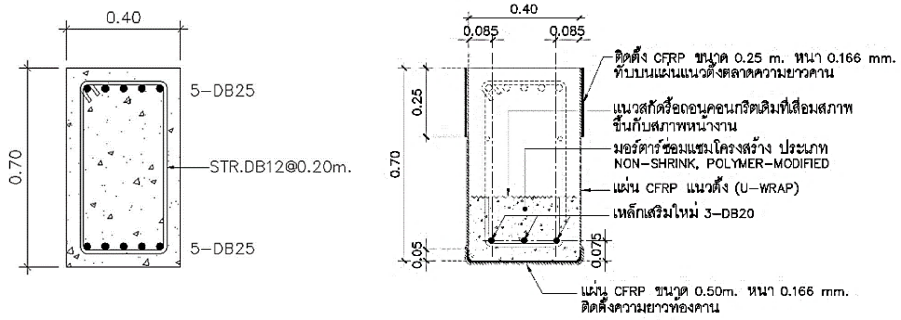
ตารางที่ 6 ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของผิวคอนกรีตด้วยการดึงออก

ตำแหน่งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ชิ้นส่วนโครงสร้าง	คาน	คาน	เสา	คาน	บันได	คาน	ท้องพื้น	เสา	คาน	คาน
ค่าออกแบบ (MPa)	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
ค่าจริง (MPa)	3.0	2.0	1.5	3.0	2.0	3.0	2.5	2.0	2.0	1.5
ผลการประเมิน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน

ผลการวิเคราะห์ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุก การซ่อมแซมและเสริมกำลัง

จากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design, WSD) จากข้อมูลรายละเอียดหน้าตัดคานเดิมดังแสดงในภาพที่ 7 (ก) โดยกำหนดคุณสมบัติวัสดุประกอบด้วย กำลังอัดคอนกรีต 280 ksc ตามค่ากำลังอัดออกแบบเดิมที่ประเมินไว้ และกำลังครากของเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอก 4,000 ksc พบว่าโครงสร้างคานเดิมมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจรออกแบบปลอดภัยสูงสุดประมาณ 1,750 กก./ตร.ม. โดยมีความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดเป็นตัวควบคุม อย่างไรก็ดีลานเอนกประสงค์นี้เคยผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยการเทพอกเพิ่มความหนา 8 ซม. เพื่อทำเป็นผิวคอนกรีตพิมพ์ลาย ซึ่งส่งผลให้เกิดน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมประมาณ 192 กก./ตร.ม. ดังนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจรจึงคงเหลือประมาณ 1,500 กก./ตร.ม.

จากผลการประเมินข้างต้น ได้กำหนดเป้าหมายการซ่อมแซมและเสริมกำลังออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักประกอบด้วย ขั้นตอนที่ 1: การฟื้นฟูกำลังขั้นต่ำของโครงสร้างคานกรณีตัดชิ้นส่วนเหล็กเสริมเดิมที่เกิดสนิมออกแล้วทำการเข้าแบบเทคอนกรีตโครงสร้างใหม่พร้อมติดตั้งเหล็กเสริมล่างใหม่ขนาด 3-DB20 เกรด SD40 ซึ่งจะส่งผลให้คานมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจรพื้นฐานเท่ากับ 500 กก./ตร.ม. ซึ่งสอดคล้องตามข้อกำหนดกฎกระทรวงกำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคารและลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร พ.ศ. 2566 [18] สำหรับประเภทการใช้อาคารสนามนันทนาการ และขั้นตอนที่ 2: การเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP บริเวณใต้ท้องคานตามมาตรฐาน ACI 440.2R [9] เพื่อยกระดับและฟื้นฟูความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจรให้กลับมาสมบูรณ์เต็มประสิทธิภาพที่ระดับ 1,500 กก./ตร.ม. โดยในขั้นตอนนี้ คานได้รับการออกแบบให้สามารถต้านทานแรงเฉือนออกแบบสูงสุด (Vu) เท่ากับ 42,730 กก. และโมเมนต์ดัดออกแบบสูงสุด (Mu) เท่ากับ 20,861 กก.ม. โดยหน้าตัดคานที่ได้รับการออกแบบเสริมกำลังได้แสดงไว้ดังภาพที่ 7 (ข)

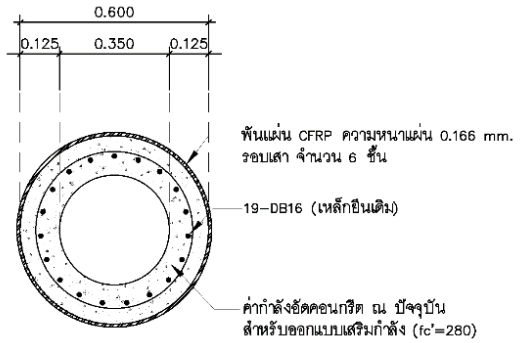


(ก) (ข)

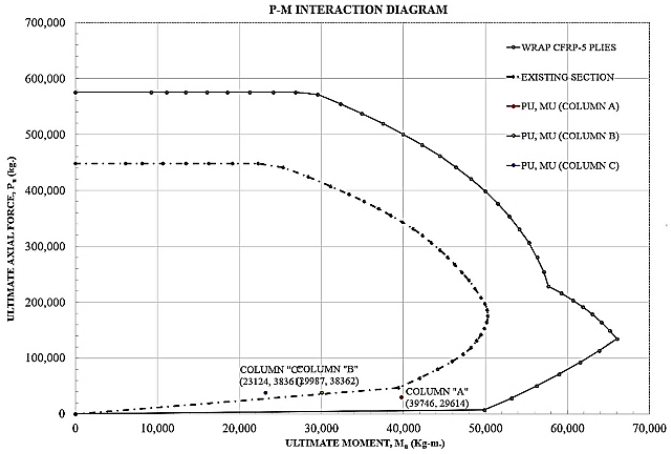
ภาพที่ 7 (ก) รายละเอียดหน้าตัดคานโครงสร้างเดิมและ (ข) รายละเอียดหน้าตัดคานภายหลังซ่อมแซมและเสริมกำลัง

สำหรับชิ้นส่วนเสาตอม่อที่เสียหายระดับ 3 มีสาเหตุจากสภาพแวดล้อมริมทะเลที่มีทรายทับถมบริเวณเสา ทำให้ความยาวประสิทธิผลสั้นลงและเกิดพฤติกรรมคล้ายเสาสั้น ประกอบกับแรงดันด้านข้างจากมวลทรายตะกอนที่ทับถม ซึ่งเมื่อ

วิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกประลัยตามมาตรฐาน ASCE/SEI 7-22 [19] จะได้แรงอัดประลัยตามแนวแกนออกแบบ Pu เท่ากับ 29,614 กก. และโมเมนต์ดัดประลัยออกแบบ Mu เท่ากับ 39,746 กก.ม. การฟื้นฟูสภาพและเสริมกำลังเสาจึงดำเนินการโดยการสกัดคอนกรีตเสาและเปลี่ยนเหล็กที่เป็นสนิมด้วยเหล็กเสริมใหม่และทำการซ่อมผิวคอนกรีตแล้วจึงพันโอบรัดด้วยแผ่น CFRP หนา 0.166 มม. จำนวน 6 ชั้น รอบเสาตอม่อทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการโอบรัด (Confinement) ซึ่งจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดและแรงดัดของเสาเพิ่มสูงขึ้นถึงระดับเกณฑ์ความปลอดภัย โดยแผนภาพแรงอัดในแนวแกนและโมเมนต์ดัด (P-M Diagram) สำหรับหน้าตัดเสาก่อนและหลังการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP แสดงดังภาพที่ 9



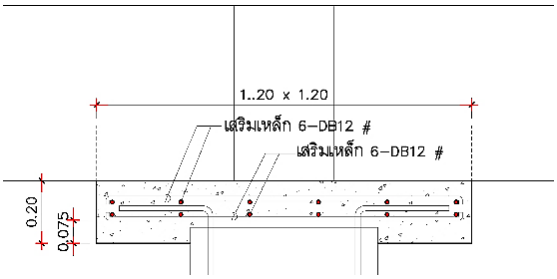
ภาพที่ 8 รูปแบบการพันแผ่น CFRP เพื่อเพิ่มสภาวะโอบรัดสำหรับชิ้นส่วนเสาตอม่อ



ภาพที่ 9 P-M Interaction Diagram ของหน้าตัดเสาที่พันด้วย CFRP เปรียบเทียบกับหน้าตัดเดิม

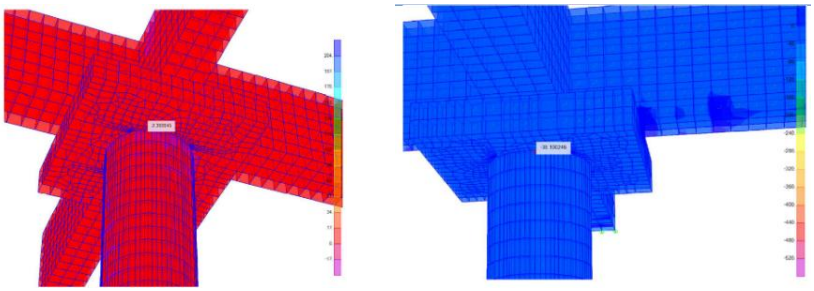
สำหรับแป้นหัวเสาที่ผิวคอนกรีตแตกร่อนอย่างรุนแรงได้รื้อถอนและหล่อใหม่ด้วยขนาดเดิม 1.20 x 1.20 เมตร หนา 0.20 เมตร และเสริมด้วยเหล็กตะแกรงด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มม. 6 เส้น (6-DB12) จำนวน 2 ชั้น ดังแสดงในภาพที่ 10 เพื่อคงหน้าที่กระจายน้ำหนักบรรทุกจากคานลงสู่เสาและลดการกระจุกตัวของความเค้นบริเวณขอบคานกับพื้นที่หน้าตัดเสา

จากการสำรวจซึ่งพบว่าแป้นหัวเสามีอัตราการเสื่อมสภาพระดับรุนแรงสูงถึง 32.5% และข้อจำกัดในการรื้อถอนแป้นหัวเสาออกโดยไม่หล่อสร้างใหม่ภายใต้การทำงานในพื้นที่แคบ การศึกษาจึงได้จำลองและวิเคราะห์พฤติกรรมด้วย FEM เพื่อประเมินพฤติกรรมเชิงกลของแป้นหัวเสาในการกระจายแรงและลดการกระจุกตัวของความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างเสาตอม่อและคาน โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีมีแป้นหัวเสาและไม่มีแป้นหัวเสา



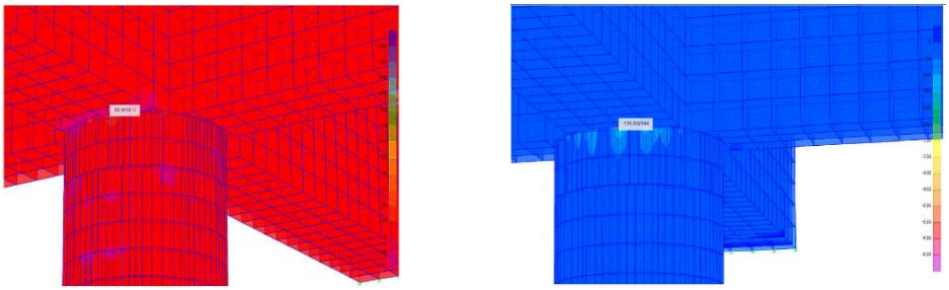
ภาพที่ 10 การฝังเหล็กเสริมในแป้นหัวเสาสำหรับการก่อสร้างใหม่

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 11 พบว่า ในกรณีมีแป้นหัวเสา โครงสร้างสามารถกระจายแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความเค้นดึงสูงสุด (Maximum Tensile Stress) บริเวณจุดเชื่อมต่อเพียง 2.30 ksc ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนเพียง 6.35% ของกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ 36.22 ksc และมีความเค้นอัดสูงสุด (Maximum Compressive Stress) เท่ากับ 38.10 ksc คิดเป็นสัดส่วนเพียง 11.6% ของกำลังอัดคอนกรีตที่ประเมินได้ของแป้นหัวเสา ซึ่งมีค่าเท่ากับ 328 ksc ขณะที่ในกรณีตัดแป้นหัวเสาออกโดยไม่มีการหล่อสร้างใหม่ทดแทน จากผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 12 พบว่า ความเค้นดึงสูงสุดบริเวณรอยต่อคานและหัวเสาจะเพิ่มขึ้นอย่างมากถึง 38.04 ksc หรือมากกว่า 16 เท่า ซึ่งเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ซึ่งนำไปสู่ความเสียหายเนื่องจากแรงดึงบริเวณจุดต่อ ขณะที่ความเค้นอัดสูงสุดปรับตัวเพิ่มขึ้นเป็น 135.03 ksc ผลการวิเคราะห์นี้จึงยืนยันว่าแป้นหัวเสาทำหน้าที่สำคัญในการลดความเค้นกระจุกตัวและสนับสนุนถึงความจำเป็นในการหล่อสร้างแป้นหัวเสาใหม่สำหรับตำแหน่งที่เสื่อมสภาพรุนแรง



(ก) (ข)

ภาพที่ 11 การวิเคราะห์ความเค้นด้วยวิธี FEM กรณีมีแป้นหัวเสา (ก) ความเค้นอัดสูงสุด และ (ข) ความเค้นดึงสูงสุด



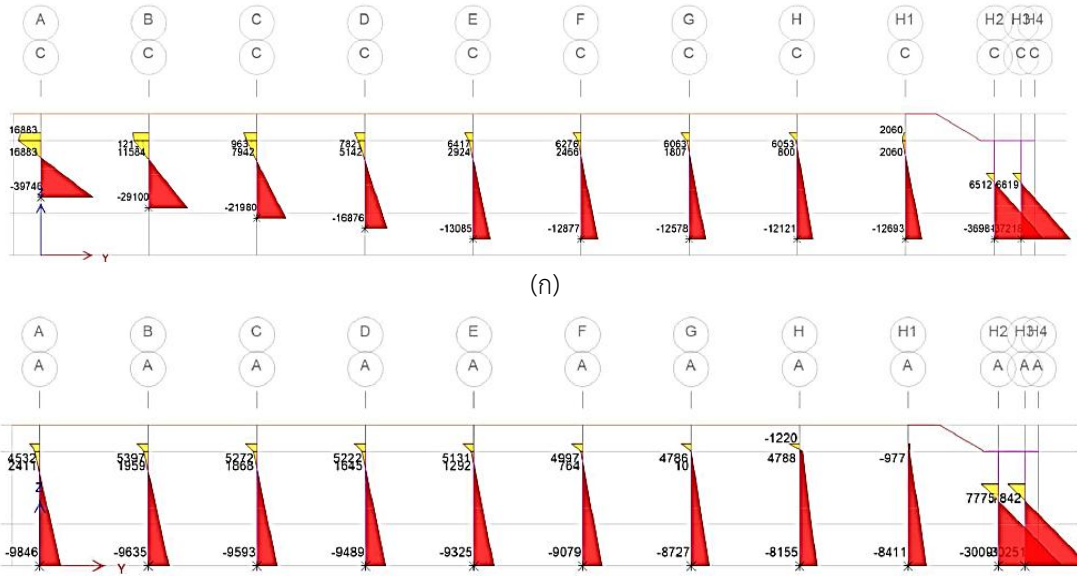
(ก) (ข)

ภาพที่ 12 การวิเคราะห์ความเค้นด้วยวิธี FEM กรณีไม่มีแป้นหัวเสา (ก) ความเค้นอัดสูงสุด และ (ข) ความเค้นดึงสูงสุด

จากการสำรวจซึ่งสังเกตพบความเสียหายระดับรุนแรงของเสาตอม่อกระจุกตัวบริเวณชายฝั่งที่มีการสะสมตัวของทรายชายหาดสูงตามแนวลาดชันดังภาพที่ 13 ขณะที่เสาในพื้นที่ทรายราบเรียบหรือมีความสูงปกติกลับไม่ปรากฏความเสียหายที่ส่งผลต่อเสถียรภาพอย่างเด่นชัด ทำให้เสากลุ่มที่ถูกทรายทับถมเกิดความยาวประสิทธิผลที่สั้นลง ทำให้พฤติกรรมของเสามีกลไกเสมือนเป็นเสาสั้นที่มีสติฟเนสหรือความแข็งเกร็งด้านข้าง (Lateral Stiffness) สูงขึ้น ส่งผลให้เสาบริเวณดังกล่าวรับแรงด้านข้างและเกิดโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงกว่าเสาข้างเคียงเมื่อได้รับแรงกระทำในแนวราบจาก กระแสน้ำคลื่นทะเล และการหดและขยายตัวจากผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยเมื่อพิจารณาสาเหตุจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างโดยพิจารณาปรับความยาวประสิทธิผลของเสาให้สอดคล้องกับระดับการทับถมของทราย พบว่าโมเมนต์ดัดของเสาที่ถูกทรายทับถมในระดับสูงจะมีค่ามากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความยาวประสิทธิผลที่ลดลงทำให้ค่าความแข็งเกร็งด้านข้างเพิ่มขึ้นและรับแรงภายในสูงขึ้น โดยมีค่าโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.23 เท่าจนถึง 4.03 เท่าเมื่อเทียบกับกรณีที่วิเคราะห์ด้วยพื้นทรายราบเรียบ โดยค่าโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นมากที่สุดในเสาตามแนวกริด A ซึ่งมีการทับถมสูงสุดและมีการทับถมน้อยลงจนถึงแนวกริด H โดยเสาในแนวกริด A เกิดโมเมนต์ดัดในเสาที่ถูกทรายทับถมเท่ากับ 39,746 กก.ม. และกรณีพื้นทรายราบเรียบเท่ากับ 9,846 กก.ม. คิดเป็นสัดส่วนสูงถึง 4.03 เท่า โดยผลการวิเคราะห์ไดอะแกรมโมเมนต์ดัดของเสาที่มีการทับถมของทรายที่สูงขึ้นตามสภาพแวดล้อมจริงและกรณีที่พื้นทรายราบเรียบสม่ำเสมอกันในภาพที่ 14 ก และ (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 13 ลักษณะการเสื่อมสภาพรุนแรงของเสาตอม่อด้วยพฤติกรรมเสาสั้นจากการทับถมของทรายชายหาด



(ก)

(ข)

ภาพที่ 14 ไดอะแกรมโมเมนต์ดัดของเสา (ก) วิเคราะห์ผลการทับถมของทราย (ข) วิเคราะห์ด้วยสมมติฐานพื้นทรายราบเรียบ

การซ่อมแซมชิ้นส่วนโครงสร้างแป้นหัวเสาที่เสียหายรุนแรงและพบรอยต่อการเทคอนกรีต (Cold Joint) ให้รื้อถอนและเทใหม่โดยเพิ่มระยะหุ้มคอนกรีตเป็นไม่น้อยกว่า 7.5 ซม. สำหรับแผ่นพื้นสำเร็จรูป Hollow-core ที่เสื่อมสภาพรุนแรงให้เปลี่ยนเป็นระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่ และออกแบบเพิ่มคานย่อยเพื่อปรับการถ่ายน้ำหนักให้เป็นพื้นทางเดียว (One-way Slab) ถ่ายแรงลงสู่คานหลักเดิม ฉีดพ่นสาร Silane เคลือบผิวคอนกรีตทั้งหมดในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อป้องกันน้ำและไอออนคลอไรด์ โดยแนวทางการซ่อมแซมและเสริมกำลังของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ตรวจพบความเสียหายระดับรุนแรง (ระดับ 3) สรุปได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แนวทางการซ่อมแซมและเสริมกำลังชิ้นส่วนโครงสร้างที่เสียหายรุนแรง

ชิ้นส่วน	แนวทางการซ่อมแซมและเสริมกำลังที่ความเสียหายรุนแรง (ระดับ 3)
เสา	สกัดคอนกรีตที่เสื่อมสภาพ ขจัดสนิมบนเหล็กเสริม ทาน้ำยาประสานคอนกรีต หล่อซ่อมด้วย Structural Repair Mortar และเสริมกำลังด้วยการพันแผ่น CFRP จำนวน 6 ชั้น
คาน	สกัดคอนกรีตที่เสียหาย ตัดต่อเปลี่ยนเหล็กเสริมด้านล่างใหม่ ทาน้ำยาประสาน หล่อซ่อมด้วย Structural Repair Mortar และเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP เพื่อฟื้นฟูกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจร
แป้นหัวเสา	รื้อถอนและก่อสร้างใหม่ทั้งหมดด้วยคอนกรีตเทในที่พร้อมการจัดวางเหล็กเสริมใหม่ด้วยเหล็กตะแกรงเพื่อรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนทะลุจากการถ่ายน้ำหนักจากคานสู่หัวเสา
พื้น	ฉีดน้ำยา Epoxy และซ่อมแซมผิวคอนกรีต (กรณีชำรุดเฉพาะจุด) รื้อถอนแผ่นพื้น Hollow core เดิม ดำเนินการติดตั้งคานย่อยและเทหล่อพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กในที่พร้อมฉีดพ่นสารเคมีป้องกันการดูดซึมน้ำและการแทรกซึมของคลอไรด์ (กรณีเสียหายบริเวณกว้าง)

สรุปผล

การประเมินสภาพลานอเนกประสงค์คอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลเมืองพัทยาซึ่งมีอายุกว่า 17 ปี พบความเสียหายรุนแรงกระจุกตัวในบริเวณริมทะเลและโซนน้ำขึ้นน้ำลง โดยแป้นหัวเสาเป็นชิ้นส่วนที่มีสัดส่วนความเสียหายระดับรุนแรงสูงที่สุด รองลงมาคือชิ้นส่วนคาน โดยผลการทดสอบตัวอย่างแท่งคอนกรีตที่เจาะสำรวจพบค่ากำลังอัดที่ยังสูงกว่าค่ากำลังอัดออกแบบเดิมที่ประเมินไว้ ซึ่งแสดงถึงเนื้อคอนกรีตโดยรวมยังคงมีกำลังเพียงพอ ขณะที่ผลการทดสอบคาร์บอเนชั่น ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และกำลังยึดเหนี่ยวของผิวคอนกรีต สนับสนุนการเลือกใช้แนวทางซ่อมแซมและเสริมกำลังเฉพาะบริเวณมากกว่าการรื้อถอนโครงสร้างทั้งหมด การศึกษาใช้การวิเคราะห์ย้อนกลับเพื่อประเมินความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกประกอบกับการวิเคราะห์ด้วย FEM เพื่อประเมินพฤติกรรมและแรงภายในที่เปลี่ยนไปในแป้นหัวเสาและเสาตอม่อ เพื่อประกอบการกำหนดแนวทางการฟื้นฟูสภาพ พบว่าแป้นหัวเสามีส่วนสำคัญในการกระจายแรงและต้องซ่อมแซมด้วยการรื้อและหล่อคอนกรีตใหม่ เสาตอม่อพบการเสียหายรุนแรงในบางตำแหน่ง โดยเฉพาะในเสาที่ถูกทรายทับถมสูง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ความยาวประสิทธิผลของเสาตอม่อลดลงและเกิดพฤติกรรมในลักษณะเสาสั้น ทำให้มีค่าความแข็งเกร็งด้านข้างหรือ lateral stiffness เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดแรงภายในที่เพิ่มขึ้น โดยการวิเคราะห์ผลของการทับถมของทรายที่ไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดโมเมนต์ดัดภายในเสาเพิ่มขึ้นอย่างมากในเสาที่ถูกทรายทับถมสูงและลดลงตามระดับการทับถมของทราย โดยพบว่ามีค่าโมเมนต์ดัดในเสามีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.23 เท่าไปจนถึงสัดส่วนมากที่สุดถึง 4.03 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีผิวทรายราบเรียบ แนวทางการฟื้นฟูสภาพจึงประกอบด้วยการซ่อมคอนกรีตและเหล็กเสริมและเสริมกำลังของเสาด้วยการพัน CFRP และเสริมกำลังคานด้วยการหุ้มแผ่น CFRP บริเวณท้องคาน รวมไปถึงการเปลี่ยนพื้นสำเร็จรูปที่เสียหายมากเป็นพื้นคอนกรีตหล่อในที่ร่วมกับการเสริมคานย่อย พร้อมป้องกันผิวคอนกรีตจากการดูดซึมน้ำและการแทรกซึมของคลอไรด์ด้วยสาร Silane กรอบการประเมินที่ผสานการตรวจสภาพ การทดสอบวัสดุ และการวิเคราะห์โครงสร้างในงานนี้ สามารถประยุกต์ใช้กับโครงสร้างชายฝั่ง

ประเภทอื่นที่มีการสัมผัสคลอไรด์และมีเงื่อนไขหน้างานเฉพาะ เพื่อแยกกลไกความเสียหายและเลือกมาตรการฟื้นฟูให้เหมาะสมกับแต่ละตำแหน่งได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเทศบาลเมืองพัทยา อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี และบริษัท วิกเกอร์ เมเจอร์ จำกัด เป็นอย่างยิ่ง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนการดำเนินงานสำรวจภาคสนาม การทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตลอดจนการประเมินโครงสร้าง ขอขอบคุณ นางสาวศิรดา ศิริวัฒน์, นางสาวธัญลักษณ์ ช่วยสัตว์, นายเอกวีร์ เผือกสีสุข, นายภูมิพันธ์ จันเติบ, นางสาวเจนจิรา อาจดวงดี และนายอดิเทพ เอกตาแสง นิสิตระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และ ดร.ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการเก็บสำรวจข้อมูลภาคสนาม

เอกสารอ้างอิง

1. Tian, Y., Zhang, G., Ye, H., Zeng, Q., Zhang, Z., Tian, Z., Jin, X., Jin, N., Chen, Z., Wang, J. Corrosion of steel rebar in concrete induced by chloride ions under natural environments. Construction and Building Materials. 2023; 369: 130504. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130504
2. Ali, M., Shams, M. A., Bheel, N., Almaliki, A. H., Mahmoud, A. S., Dodo, Y. A., Benjeddou, O. A review on chloride induced corrosion in reinforced concrete structures: Lab and in situ investigation. RSC Advances. 2024; 14(50): 37252–37271. https://doi.org/10.1039/d4ra05506c
3. Bolzoni, F., Brenna, A., Ormellese, M. Recent advances in the use of inhibitors to prevent chloride-induced corrosion in reinforced concrete. Cement and Concrete Research. 2022; 154: 106719. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106719
4. Das, C. S., Zheng, H., Dai, J.-G. A review of chloride-induced steel corrosion in coastal reinforced concrete structures: Influence of micro-climate. Ocean Engineering. 2025; 325: 120794. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120794
5. Marques, P. F., Costa, A. Service life of RC structures: Carbonation induced corrosion. Prescriptive vs. performance-based methodologies. Construction and Building Materials. 2010; 24(3): 258–265. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.039
6. British Standards Institution. BS EN 14630:2006. Products and systems for the protection and repair of concrete structures—Test methods—Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. British Standards Institution; 2006. https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Standard?UPI=000000000030091526
7. ASTM International. ASTM C876-15. Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2015. https://store.astm.org/c0876-15.html
8. Otieno, M., Beushausen, H., Alexander, M. Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete—Part I: Experimental studies under accelerated and natural marine environments. Cement and Concrete Research. 2016; 79: 373-385. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.08.009

9. American Concrete Institute. ACI 440.2R-17: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2017. https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?id=51700867&m=details
10. ASTM International. ASTM D4541-17. Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2017. https://store.astm.org/d4541-17.html
11. Loreto, G., Di Benedetti, M., De Luca, A., Nanni, A. Assessment of reinforced concrete structures in marine environment: A case study. Corrosion Reviews. 2019; 37(1): 57-69. https://doi.org/10.1515/corrrev-2018-0046
12. Bayuaji, R., Darmawan, M. S., Husin, N. A., Anugraha, R. B., Budipriyanto, A., Stewart, M. G. Corrosion damage assessment of a reinforced concrete canal structure of power plant after 20 years of exposure in a marine environment: A case study. Engineering Failure Analysis. 2018; 84: 287-299. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.11.014
13. Bakar, M. B. C., Muhammad Rashid, R. S., Amran, M., Saleh Jaafar, M., Vatin, N. I., Fediuk, R. Flexural strength of concrete beam reinforced with CFRP bars: A review. Materials. 2022; 15(3): 1144. https://doi.org/10.3390/ma15031144
14. Naser, M. Z., Hawileh, R. A., Abdalla, J. A. Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. Engineering Structures. 2019; 198: 109542. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109542
15. Al Nuaimi, N., Sohail, M. G., Hawileh, R., Abdalla, J. A., Douier, K. Durability of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP laminates under harsh climatic conditions. Journal of Composites for Construction. 2021; 25(2): 04021005. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001113
16. Sigit Darmawan, M., Bayuaji, R., Anugraha, R. B., Saputra, D. A., Victoriawan, M. A. Case study of performance of a jetty structure after 25 years of exposure in a marine environment considering earthquake load. Engineering Failure Analysis. 2024; 156: 107831. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107831
17. ASTM International. ASTM C42/C42M-20. Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2020.
18. กระทรวงมหาดไทย. กฎกระทรวงกำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคารและลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร พ.ศ. 2566. ราชกิจจานุเบกษา. 2566; 140(54 ก): 4-20. https://ratchakitcha.soc.go.th/documents/140A054N0000000000400.pdf
19. American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-22: Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. Reston (VA). American Society of Civil Engineers; 2022. https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784415788

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนารูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจด้วยคลื่นสะท้อนความถี่สูงทางทรวงอก โรงพยาบาลกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี

Development of a Care Model for Patients Undergoing Transthoracic Echocardiography at Kumphawapi Hospital, Udon Thani Province

พชรวรินทร์ วรรณศิลป์[1] และ เปรมฤดี บริบาล[2*]
Phatcharawarin Wannasin[1] and Preamruedee Boriban[2*]
[1]โรงพยาบาลกุมภวาปี อำเภอกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี
[2]วิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี อุดรธานี คณะพยาบาลศาสตร์ สถาบันพระบรมราชชนก
[1]Kumphawapi Hospital, Kumphawapi District, Udon Thani Province
[2]Boromarajonani College of Nursing, Udon Thani Faculty of nursing Praboromarajchanok institute
*Corresponding author; e-mail: fadpei@bcnu.ac.th.com

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
12 กันยายน 2569	5 ตุลาคม 2569	8 ตุลาคม 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยและพัฒนานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาสภาพการณ์และปัญหา 2) พัฒนารูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจด้วยคลื่นสะท้อนความถี่สูงทางทรวงอก และ 3) ศึกษาประสิทธิผลของรูปแบบที่พัฒนาขึ้น ดำเนินการโดยประยุกต์ใช้แนวคิดการจัดการตนเอง ประกอบด้วย 3 ระยะ ดังนี้ ระยะที่ 1 ศึกษาสถานการณ์และวิเคราะห์สถานการณ์ของระบบเดิม ระยะที่ 2 พัฒนารูปแบบกิจกรรมพยาบาล ประกอบด้วย การแจ้งเตือนวันนัดหมายและให้ความรู้ผ่านระบบบัญชีทางการของไลน์ สื่อวิดีโอแนะนำการปฏิบัติตัว และการให้ข้อมูลย้อนกลับเชิงบวก เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน ได้ค่า S-CVI เท่ากับ 0.89 และค่าความเชื่อมั่นของแบบประเมินความรู้ เท่ากับ 0.88 ระยะที่ 3 ศึกษาประสิทธิผลโดยใช้ระเบียบวิธีวิจัยแบบกึ่งทดลอง แบ่งกลุ่มตัวอย่างเป็นกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง กลุ่มละ 72 ราย รวม 144 ราย วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติ Independent t-test ค่า Chi-square และ RR พร้อม 95% CI

ผลการวิจัยพบว่า 1) สถานการณ์ของระบบเดิม ได้แก่ ผู้ป่วยขาดความรู้และความเข้าใจในการเตรียมตัว ความวิตกกังวล การลืมนัด ข้อจำกัดด้านการเดินทาง และการขาดระบบติดตามนัดที่มีประสิทธิภาพ 2) รูปแบบการดูแลที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยการให้ความรู้ การใช้ QR code, บัญชีทางการของไลน์ (LINE Official Account: LINE OA) สื่อวิดีโอ และการโทรศัพท์ติดตามยืนยันนัดก่อนตรวจ และ 3) ภายหลังใช้รูปแบบ กลุ่มทดลองมีคะแนนความรู้สูงกว่ากลุ่มควบคุม (17.86±1.42 และ 12.03±2.01 คะแนน ตามลำดับ, p<.001) มีอัตราการมาตรวจตามนัดสูงกว่า (ร้อยละ 93.1 และ 76.4) และมีอัตราการขาดนัดต่ำกว่า (ร้อยละ 6.9 และ 23.6; RR=0.29, 95% CI: 0.11–0.75, p=.005) นอกจากนี้ กลุ่มทดลองมีคะแนนความพึงพอใจโดยรวมสูงกว่ากลุ่มควบคุม (4.68±0.31 และ 3.82±0.47 คะแนน, p<.001)

คำสำคัญ: คลื่นสะท้อนความถี่สูงทางทรวงอก, การจัดการตนเอง, บัญชีทางการของไลน์

Abstract

This research and development study aimed to: (1) examine the existing care situation and identify problems; (2) develop a care model for the care of patients undergoing transthoracic echocardiography (TTE), and (3) evaluate the effectiveness of the developed model. The study was guided by the self-management concept and conducted in three phases. Phase 1 involved an assessment and analysis of the existing care system and related problems. Phase 2 involved the development of a nursing care model comprising appointment reminders and health education delivered through LINE Official Account (LINE OA), instructional videos on appropriate preparation and self-care, and positive feedback. The developed instruments were evaluated for content validity by three experts, yielding an S-CVI of 0.89, while the knowledge assessment demonstrated a reliability coefficient of 0.88. Phase 3 evaluated the effectiveness of the developed model using a quasi-experimental design. A total of 144 patients were allocated to a control group (n=72) and an intervention group (n=72). Data were analyzed using the independent t-test, chi-square test, and relative risk (RR) with a 95% confidence interval (CI).

The results revealed that: (1) problems in the existing care system included inadequate patient knowledge and understanding of examination preparation, anxiety, forgotten appointments, transportation barriers, and the lack of an effective appointment follow-up system; (2) the developed care model incorporated patient education, QR codes, LINE OA, instructional videos, positive feedback, and telephone calls to confirm appointments before the examination; and (3) following implementation, the intervention group had a significantly higher mean knowledge score than the control group (17.86 ± 1.42 vs. 12.03 ± 2.01, respectively; $p < .001$). The appointment attendance rate was higher in the intervention group than in the control group (93.1% vs. 76.4%, respectively), whereas the non-attendance rate was lower (6.9% vs. 23.6%, respectively; RR = 0.29, 95% CI: 0.11–0.75, $p = .005$). In addition, the intervention group had a significantly higher mean overall satisfaction score than the control group (4.68 ± 0.31 vs. 3.82 ± 0.47, respectively; $p < .001$).

Keywords: Transthoracic Echocardiography, Self-Management, LINE Official Account

บทนำ

โรคหัวใจและหลอดเลือดเป็นปัญหาสาธารณสุขที่สำคัญและเป็นสาเหตุของการเจ็บป่วย การเสียชีวิต และการสูญเสียปีสุขภาวะของประชากรทั่วโลก โดยเฉพาะในกลุ่มผู้สูงอายุและผู้ที่มีโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง การวินิจฉัยความผิดปกติของหัวใจอย่างถูกต้องและรวดเร็วจึงมีความสำคัญต่อการวางแผนรักษา การติดตามผล และการป้องกันภาวะแทรกซ้อน การตรวจหัวใจด้วยคลื่นเสียงสะท้อนความถี่สูงผ่านทางทรวงอก (transthoracic echocardiography: TTE) เป็นเครื่องมือวินิจฉัยทางระบบหัวใจและหลอดเลือดที่มีบทบาทสำคัญ เนื่องจากสามารถประเมินโครงสร้าง ขนาด และการทำงานของห้องหัวใจ การบีบตัวของกล้ามเนื้อหัวใจ ลิ้นหัวใจ ตลอดจนการไหลเวียนของเลือดภายในหัวใจได้อย่างเป็นระบบ [1, 2] อีกทั้งเป็นการตรวจแบบไม่รุกล้ำ (non-invasive) ไม่ใช้รังสี สามารถตรวจซ้ำได้ และให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการวินิจฉัย การประเมินความรุนแรงของโรค การกำหนดแนวทางรักษา และการติดตามการเปลี่ยนแปลงของโรค [1] ดังนั้น คุณภาพของระบบบริการ TTE

ตั้งแต่การนัดหมาย การเตรียมผู้ป่วย การเข้ารับการตรวจ ตลอดจนการรายงานและสื่อสารผลการตรวจ จึงเป็นองค์ประกอบสำคัญของคุณภาพการดูแลผู้ป่วยโรคหัวใจและหลอดเลือด [2, 3]

ประสิทธิผลของบริการตรวจวินิจฉัยไม่ได้ขึ้นอยู่กับความพร้อมของเครื่องมือและบุคลากรเท่านั้น แต่ยังเกี่ยวข้องกับความสามารถของผู้ป่วยในการเข้าถึงและเข้ารับบริการตามกำหนด การไม่มาตามนัด (loss to follow-up) เป็นปัญหาที่พบได้ในระบบบริการผู้ป่วยนอกและบริการตรวจวินิจฉัย ส่งผลให้ผู้ป่วยอาจได้รับการวินิจฉัยและการรักษาล่าช้า ขณะเดียวกันยังทำให้ทรัพยากรและช่วงเวลาการให้บริการที่จัดเตรียมไว้ไม่ถูกใช้เต็มประสิทธิภาพ [4, 5] สาเหตุของการขาดนัดมีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องทั้งปัจจัยด้านผู้ป่วยและระบบบริการ เช่น การลืมวันนัด ความเข้าใจเกี่ยวกับความจำเป็นของการตรวจ การเดินทาง ภาระค่าใช้จ่าย การสื่อสารข้อมูลนัดหมาย และกระบวนการจัดการนัดหมายของสถานพยาบาล หลักฐานจากการทบทวนอย่างเป็นระบบและการวิเคราะห์เชิงอภิมานพบว่า ระบบเตือนนัดผ่านเทคโนโลยีดิจิทัลสามารถเพิ่มอัตราการมาตามนัดและลดการขาดนัดได้ โดยผู้ที่ได้รับการแจ้งเตือนมีโอกาสมาตามนัดสูงกว่าผู้ที่ไม่ได้รับการแจ้งเตือน และการใช้การแจ้งเตือนหลายรูปแบบร่วมกับการให้ข้อมูลเพิ่มเติมก่อนวันนัดอาจมีประสิทธิผลมากกว่าการแจ้งเพียงวัน เวลา และสถานที่ [4, 5]

โรงพยาบาลกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี เป็นโรงพยาบาลที่ให้บริการตรวจ TTE แก่ผู้ป่วยโรคหัวใจและหลอดเลือดในพื้นที่รับผิดชอบและเครือข่ายบริการ โดยเปิดให้บริการห้องตรวจ Echocardiography ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2563 ในระยะแรกพบปัญหาระยะเวลารอคอยประมาณ 3–4 เดือน ต่อมาในปี พ.ศ. 2564–2565 ได้พัฒนาระบบบริการโดยประสานแพทย์ผู้เชี่ยวชาญจากโรงพยาบาลอุดรธานีมาร่วมให้บริการ ส่งผลให้สามารถลดระยะเวลารอคอยเหลือประมาณ 30 วัน และปัจจุบันมีอายุรแพทย์โรคหัวใจให้บริการตรวจวินิจฉัยสัปดาห์ละ 1 ครั้ง ทำให้ระยะเวลารอคอยลดลงเหลือประมาณ 7–14 วัน อย่างไรก็ตาม แม้ศักยภาพในการให้บริการจะเพิ่มขึ้น แต่ปัญหาการไม่มาตรวจตามนัดยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากข้อมูลบริการของโรงพยาบาลกุมภวาปี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2566–2568 พบว่ามีผู้ป่วยเข้ารับบริการตรวจ TTE จำนวน 100, 123 และ 144 ราย ตามลำดับ ขณะที่อัตราการไม่มาตรวจตามนัดคิดเป็นร้อยละ 21.26, 22.48 และ 30.09 ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นว่าความต้องการรับบริการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ระบบการดูแลและการบริหารจัดการนัดหมายเดิมยังไม่สามารถทำให้ผู้ป่วยเข้าถึงบริการตามแผนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังไม่มีการศึกษาการบูรณาการ LINE OA กับการติดตามในบริการตรวจ TTE ในบริบทของโรงพยาบาลกุมภวาปี

จากการวิเคราะห์สถานการณ์การให้บริการพบว่า สาเหตุสำคัญของการไม่มาตามนัด ได้แก่ ผู้ป่วยมีความวิตกกังวล ไม่เข้าใจขั้นตอนการตรวจ เข้าใจว่าหากไม่มีอาการผิดปกติไม่จำเป็นต้องมาตรวจ กังวลเกี่ยวกับผลกระทบของเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจ ลืมวันนัด ไม่มีผู้ดูแลพามารับบริการ รวมถึงข้อจำกัดด้านการเดินทางและค่าใช้จ่าย ขณะเดียวกันระบบเดิมยังมีข้อจำกัดด้านการติดตาม การเตือนนัด การให้ข้อมูลเตรียมความพร้อมก่อนตรวจ และการประสานงานระหว่างผู้ป่วย ผู้ดูแล และบุคลากรสุขภาพ ปัญหาเหล่านี้อาจนำไปสู่การสูญเสียโอกาสในการใช้ทรัพยากรบริการ การเพิ่มภาระในการจัดตารางนัดใหม่ และความล่าช้าในการวินิจฉัย การวางแผนรักษา หรือการประเมินความพร้อมก่อนหัตถการสำคัญ หลักฐานจากการทบทวนอย่างเป็นระบบพบว่าการใช้ข้อความหรือโทรศัพท์เตือนก่อนวันนัดสามารถลดการไม่มาตามนัดได้ [6] และหลักฐานร่วมสมัยยังพบว่าการใช้มาตรการด้านพฤติกรรมร่วมกับการเตือนนัดสามารถช่วยลดการขาดนัดในระบบบริการสุขภาพได้ [7]

การศึกษาครั้งนี้ประยุกต์ใช้แนวคิดการจัดการตนเอง (Self-Management) ของ Kanfer และ Gaelick-Buys [14] เป็นกรอบในการพัฒนารูปแบบการดูแล โดยแนวคิดดังกล่าวมุ่งส่งเสริมให้บุคคลมีบทบาทในการกำกับและปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของตนเองผ่านกระบวนการสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ การติดตามตนเอง (Self-monitoring) การประเมินตนเอง (Self-evaluation) และการเสริมแรงตนเอง (Self-reinforcement) [12] ด้วยเหตุนี้ ห้องตรวจคลื่นไฟฟ้าหัวใจและห้องตรวจ Echocardiography กลุ่มงานตรวจรักษาพิเศษ โรงพยาบาลกุมภวาปี จึงได้พัฒนากระบวนการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจ TTE โดยเชื่อมโยงการจัดการนัดหมายกับการให้ความรู้และการติดตามผู้ป่วยก่อนเข้ารับบริการ ประกอบด้วยการจัดทำ QR

code สำหรับเข้าถึงข้อมูล การใช้ LINE OA เป็นช่องทางสื่อสารและให้ความรู้เกี่ยวกับการตรวจและการเตรียมตัว ตลอดจนการโทรศัพท์ติดตามและยืนยันนัดก่อนวันตรวจ 3 วัน เพื่อให้ผู้ป่วยและผู้ดูแลได้รับข้อมูลที่ถูกต้อง ลดความวิตกกังวลและความเข้าใจคลาดเคลื่อน สามารถเตรียมตัวและวางแผนการเดินทางได้เหมาะสม รวมทั้งเปิดโอกาสให้ผู้ป่วยแจ้งปัญหาหรือความจำเป็นในการเปลี่ยนแปลงนัดล่วงหน้า แนวทางดังกล่าวเป็นการผสมผสานการให้ข้อมูลกับระบบเตือนนัด ซึ่งมีหลักฐานสนับสนุนว่าสามารถช่วยเพิ่มการเข้ารับบริการตามนัดได้อย่างมีประสิทธิผล และการใช้การแจ้งเตือนหลายช่องทางหรือมากกว่าหนึ่งครั้งอาจช่วยเพิ่มประสิทธิผลของระบบได้ [6, 7]

การจัดให้มีช่องทางสื่อสารหรือระบบเตือนนัดเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการแก้ปัญหา เนื่องจากการเข้ารับบริการตรวจ TTE เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องตั้งแต่การส่งตรวจ การนัดหมาย การเตรียมความพร้อมของผู้ป่วยและผู้ดูแล การติดตามก่อนตรวจ การเข้ารับบริการ จนถึงการประเมินผลลัพธ์ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องพัฒนาเป็น “รูปแบบการดูแล” ที่มีองค์ประกอบและขั้นตอนชัดเจน สามารถนำไปปฏิบัติได้อย่างเป็นระบบ และประเมินผลได้ทั้งด้านกระบวนการและผลลัพธ์ของผู้รับบริการ การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งพัฒนาและประเมินผลรูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจด้วยคลื่นเสียงสะท้อนความถี่สูงผ่านทางทรวงอก โรงพยาบาลกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี โดยประยุกต์ใช้การให้ความรู้ผ่าน QR code และ LINE OA ร่วมกับการติดตามและยืนยันนัดทางโทรศัพท์ก่อนตรวจ เพื่อเพิ่มความรู้และความพร้อมของผู้ป่วย ลดการขาดนัด และเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการให้บริการ อันจะนำไปสู่ระบบบริการตรวจหัวใจที่มีคุณภาพ มีความต่อเนื่อง ใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า และตอบสนองต่อความต้องการของผู้ป่วยได้อย่างเหมาะสม

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาพการณ์ ปัญหาและความต้องการของผู้ป่วยและบุคลากรทางการแพทย์ในการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจด้วยคลื่นสะท้อนความถี่สูงทางทรวงอก
2. เพื่อพัฒนารูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจด้วยคลื่นสะท้อนความถี่สูงทางทรวงอก โรงพยาบาลกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี
3. เพื่อศึกษาประสิทธิผลของรูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจด้วยคลื่นสะท้อนความถี่สูงทางทรวงอก โรงพยาบาลกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี

วิธีดำเนินการวิจัย

1. รูปแบบการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและศึกษาประสิทธิผลของรูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจหัวใจด้วยคลื่นเสียงสะท้อนความถี่สูงผ่านทางทรวงอก (Transthoracic Echocardiography: TTE) โรงพยาบาลกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี ดำเนินการวิจัย 3 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาสถานการณ์ ปัญหา และความต้องการ ศึกษาสถานการณ์การให้บริการ ปัญหา และความต้องการของผู้ป่วย ผู้ดูแล และบุคลากรทางการแพทย์ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจ TTE โดยทบทวนเอกสาร ข้อมูลการให้บริการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ร่วมกับการเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพ จากนั้นวิเคราะห์เนื้อหา จัดหมวดหมู่ และสังเคราะห์ประเด็นสำคัญเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนารูปแบบการดูแล

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนารูปแบบการดูแล นำผลจากการศึกษาสถานการณ์ในขั้นตอนที่ 1 ร่วมกับการทบทวนแนวคิด ทฤษฎี และหลักฐานเชิงประจักษ์ที่เกี่ยวข้อง มาวิเคราะห์และสังเคราะห์เพื่อยกร่างรูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจ TTE ซึ่งประกอบด้วยการให้ความรู้และคำแนะนำ การใช้ QR code และ LINE OA การใช้สื่อวิดีโอ การแจ้งเตือนวันนัด และ

การติดตามยืนยันนัดทางโทรศัพท์ก่อนวันตรวจ จากนั้นนำร่างรูปแบบให้ผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่านตรวจสอบความเหมาะสม ความเป็นไปได้ และประโยชน์ต่อผู้รับบริการ ก่อนปรับปรุงเป็นรูปแบบฉบับสมบูรณ์สำหรับนำไปทดลองใช้

ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาประสิทธิผลของรูปแบบ โดยใช้รูแปบบการวิจัยกึ่งทดลอง (Quasi-experimental research) แบบสองกลุ่มทดสอบก่อนและหลังการทดลอง (Two Group Pretest-posttest Design) นำรูปแบบที่พัฒนาขึ้นไปทดลองใช้และเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างกลุ่มที่ได้รับการดูแลตามรูปแบบเดิม (กลุ่มควบคุม) และกลุ่มที่ได้รับการดูแลตามรูปแบบที่พัฒนาขึ้น (กลุ่มทดลอง) โดยประเมินผลลัพธ์ด้านความรู้ การปฏิบัติตัวก่อนเข้ารับการตรวจ การมาตรวจตามนัด/การขาดนัด และความพึงพอใจของผู้รับบริการและบุคลากร

เนื่องจากกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลองเข้ารับบริการตรวจหัวใจด้วยคลื่นเสียงสะท้อนความถี่สูงผ่านทางทรวงอกในหน่วยบริการเดียวกัน ผู้วิจัยจึงกำหนดช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลของทั้งสองกลุ่มให้แตกต่างกันเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสิ่งทดลอง (contamination) โดยเก็บข้อมูลกลุ่มควบคุมที่ได้รับการดูแลตามระบบปกติให้ครบถ้วนก่อน หลังจากนั้นจึงดำเนินการเตรียมความพร้อมของบุคลากรและระบบบริการ และเริ่มใช้รูปแบบการดูแลที่พัฒนาขึ้นกับกลุ่มทดลองในช่วงเวลาถัดมา ทั้งนี้ ในระหว่างการเก็บข้อมูลกลุ่มควบคุมยังไม่มีการเผยแพร่ QR code, LINE OA สื่อวิดีโอ หรือกิจกรรมการติดตามยืนยันนัดตามรูปแบบใหม่แก่ผู้รับบริการ และกำหนดแนวทางการปฏิบัติงานของบุคลากรอย่างชัดเจน เพื่อป้องกันการนำองค์ประกอบของรูปแบบไปใช้กับกลุ่มควบคุมก่อนเริ่มระยะทดลอง

2. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร คือ ผู้ป่วยที่ได้รับการนัดหมายเข้ารับการตรวจหัวใจด้วยคลื่นเสียงสะท้อนความถี่สูงผ่านทางทรวงอก ณ ห้องตรวจ Echocardiography กลุ่มงานตรวจรักษาพิเศษ โรงพยาบาลกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี รวมถึงผู้ดูแลผู้ป่วยและพยาบาลวิชาชีพที่ปฏิบัติงานในกลุ่มงานตรวจรักษาพิเศษ

กลุ่มตัวอย่างผู้ป่วยกำหนดขนาดตัวอย่างโดยใช้โปรแกรม Stata โดยอ้างอิงข้อมูลจากการศึกษานำร่อง พบว่ารูปแบบการดูแลเดิมมีอัตราการขาดนัดร้อยละ 30 และคาดว่ารูปแบบที่พัฒนาขึ้นจะสามารถลดอัตราการขาดนัดเหลือร้อยละ 10 กำหนดการทดสอบแบบสองทาง (two-sided test) ระดับนัยสำคัญทางสถิติ .05 อำนาจการทดสอบ (power) .80 และอัตราส่วนระหว่างกลุ่ม 1:1 ได้กลุ่มตัวอย่างกลุ่มละ 65 คน เพื่อป้องกันการสูญหาย (Drop out) ร้อยละ 10 จึงได้กลุ่มตัวอย่างกลุ่มละ 72 ราย รวมทั้งสิ้น 144 ราย แบ่งเป็นกลุ่มควบคุมที่ได้รับการดูแลตามรูปแบบเดิม 72 ราย และกลุ่มทดลองที่ได้รับการดูแลตามรูปแบบที่พัฒนาขึ้น 72 ราย

เกณฑ์การคัดเข้า ได้แก่ 1) เป็นผู้ป่วยที่ได้รับการนัดหมายตรวจ TTE ณ โรงพยาบาลกุมภวาปี 2) มีระดับความรู้สึกตัวดี สามารถสื่อสารภาษาไทยได้ 3) สามารถอ่านและเขียนภาษาไทยได้ และ 4) ยินยอมเข้าร่วมการวิจัย เกณฑ์การคัดออก ได้แก่ ผู้ที่มีข้อจำกัดด้านการสื่อสาร หรือมีการเปลี่ยนสถานพยาบาลสำหรับเข้ารับการตรวจ TTE ส่วนเกณฑ์การยุติการเข้าร่วมการวิจัย ได้แก่ ผู้เข้าร่วมขอถอนตัว เกิดภาวะวิกฤต หรือเสียชีวิตระหว่างการศึกษา

3. เครื่องมือในการวิจัย เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง คือ รูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจ TTE โรงพยาบาลกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นจากผลการศึกษาสถานการณ์ร่วมกับการทบทวนหลักฐานเชิงประจักษ์ ประกอบด้วย 1) แนวทางการดูแลและเตรียมความพร้อมผู้ป่วยก่อนเข้ารับการตรวจ 2) QR code และ LINE OA สำหรับให้ความรู้และสื่อสารข้อมูลการนัดหมาย 3) ระบบแจ้งเตือนและยืนยันวันนัด 4) การโทรศัพท์ติดตามก่อนวันตรวจ 3 วัน และ 5) สื่อวิดีโอให้ความรู้เกี่ยวกับการตรวจ TTE และการปฏิบัติตัวก่อนและหลังการตรวจ

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ประกอบด้วย 1) แบบบันทึกข้อมูลผู้ป่วย ครอบคลุมข้อมูลส่วนบุคคล ได้แก่ เพศ อายุ น้ำหนัก ส่วนสูง ดัชนีมวลกาย โรคประจำตัว ระยะทางและวิธีการเดินทาง การใช้สื่อสังคมออนไลน์ การวินิจฉัย ข้อบ่งชี้ในการตรวจ TTE และค่า Left Ventricular Ejection Fraction (LVEF) รวมทั้งข้อมูลการปฏิบัติตัวในวันนัดและการมาตรวจตามนัด 2) แบบบันทึกข้อมูลผู้ดูแล ประกอบด้วยข้อมูลส่วนบุคคล ระดับการศึกษา ความสัมพันธ์กับผู้ป่วย ระยะเวลาในการดูแล และประสบการณ์ได้รับความรู้เกี่ยวกับการตรวจ TTE 3) แบบประเมินความรู้เกี่ยวกับการตรวจ TTE และการปฏิบัติตัวก่อนและหลังการตรวจ สำหรับผู้ป่วยและผู้ดูแล 4) แบบประเมินความพึงพอใจของผู้ป่วยต่อรูปแบบการดูแล และ 5) แบบประเมินความพึงพอใจของพยาบาลต่อการใช้รูปแบบการดูแล

4. การตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือ

รูปแบบการดูแลและเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลได้รับการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (content validity) โดยผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 3 ท่าน ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาความสอดคล้องของเนื้อหากับวัตถุประสงค์ ความครอบคลุม ความเหมาะสม ความชัดเจนของข้อความและภาษาที่ใช้ จากนั้นผู้วิจัยนำข้อเสนอแนะมาปรับปรุงแก้ไขก่อนนำไปใช้จริง ผลการตรวจสอบพบว่าค่าดัชนีความตรงเชิงเนื้อหาของเครื่องมือทั้งฉบับ S-CVI (Scale-level Content Validity Index) เท่ากับ 0.89

แบบประเมินความรู้เกี่ยวกับการตรวจ TTE และการปฏิบัติตัวก่อนเข้ารับการตรวจ นำไปทดลองใช้กับกลุ่มที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่างก่อนนำไปใช้จริง และตรวจสอบความเชื่อมั่นของเครื่องมือ KR-20 เท่ากับ 0.88

แบบประเมินความพึงพอใจของผู้ป่วยและแบบประเมินความพึงพอใจของพยาบาลที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น พบว่าแบบประเมินความพึงพอใจของผู้ป่วยมีค่า S-CVI/Ave เท่ากับ 0.92 และแบบประเมินความพึงพอใจของพยาบาลมีค่า S-CVI/Ave เท่ากับ 0.94

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลภายหลังได้รับการรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์จากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ โรงพยาบาลกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี โดยดำเนินการตามขั้นตอนของการวิจัยและพัฒนา 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาสถานการณ์ ปัญหา และความต้องการ ผู้วิจัยทบทวนข้อมูลจากเวชระเบียน สถิติการให้บริการตรวจหัวใจด้วยคลื่นเสียงสะท้อนความถี่สูงผ่านทางทรวงอก ข้อมูลการนัดหมายและการขาดนัด ตลอดจนเอกสาร งานวิจัย และแนวทางที่เกี่ยวข้องกับการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจ TTE จากนั้นเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพจากผู้ป่วย ผู้ดูแล และบุคลากรทางการแพทย์ที่เกี่ยวข้อง โดยชี้แจงวัตถุประสงค์ ขั้นตอนการวิจัย สิทธิของผู้เข้าร่วม และการรักษาความลับก่อนเก็บข้อมูล ข้อมูลที่ได้จากการทบทวนเอกสารและข้อมูลเชิงคุณภาพนำมาวิเคราะห์ จัดหมวดหมู่ และสังเคราะห์เป็นประเด็นปัญหาและความต้องการ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนารูปแบบการดูแล

ขั้นตอนที่ 2 พัฒนารูปแบบการดูแล ผู้วิจัยนำผลจากขั้นตอนที่ 1 ร่วมกับผลการทบทวนแนวคิด ทฤษฎี และหลักฐานเชิงประจักษ์ที่เกี่ยวข้อง มายกร่างรูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจ TTE โดยรูปแบบประกอบด้วยการให้ความรู้ การเตรียมความพร้อมก่อนตรวจ การใช้ QR code และ LINE OA การแจ้งเตือนวันนัด การโทรติดตามก่อนวันตรวจ 3 วัน และสื่อวิดีโอให้ความรู้ จากนั้นนำร่างรูปแบบและเครื่องมือที่เกี่ยวข้องให้ผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่านตรวจสอบความเหมาะสม ความเป็นไปได้ และความตรงเชิงเนื้อหา ก่อนปรับปรุงตามข้อเสนอแนะและจัดทำเป็นรูปแบบฉบับสมบูรณ์สำหรับนำไปทดลองใช้

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาประสิทธิผลของรูปแบบการดูแล ผู้วิจัยคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างตามเกณฑ์ที่กำหนด อธิบายรายละเอียดการวิจัยและขอความยินยอมเข้าร่วมการวิจัยก่อนดำเนินการเก็บข้อมูล จากนั้นแบ่งผู้ป่วยเป็นกลุ่มควบคุมและ

กลุ่มทดลอง กลุ่มละ 72 ราย รวม 144 ราย กลุ่มควบคุมได้รับการดูแลตามระบบเดิมของโรงพยาบาล ส่วนกลุ่มทดลองได้รับการดูแลตามรูปแบบที่พัฒนาขึ้น

ก่อนดำเนินการทดลอง ผู้วิจัยเก็บข้อมูลพื้นฐานของผู้ป่วย ได้แก่ เพศ อายุ น้ำหนัก ส่วนสูง ดัชนีมวลกาย โรคประจำตัว ระยะทางและวิธีการเดินทาง การใช้สื่อสังคมออนไลน์ การวินิจฉัยโรค ข้อบ่งชี้ในการตรวจ TTE และค่า LVEF รวมทั้งประเมินความรู้ของผู้ป่วยและผู้ดูแลเกี่ยวกับการตรวจและการปฏิบัติตัวก่อนเข้ารับการตรวจ สำหรับกลุ่มทดลอง ผู้วิจัยให้ความรู้ผ่าน LINE OA, QR code และวิดีโอ ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเตรียมตัวก่อนและหลังตรวจ พร้อมแจ้งวันนัดอย่างชัดเจน และโทรศัพท์ติดตามเพื่อยืนยันนัดก่อนวันตรวจ 3 วัน ขณะที่กลุ่มควบคุมได้รับการนัดหมายและคำแนะนำตามแนวทางปกติของหน่วยงาน

เมื่อถึงวันนัด ผู้วิจัยตรวจสอบการมาตามนัด การปฏิบัติตัวก่อนเข้ารับการตรวจ ได้แก่ การรับประทานอาหารและยาประจำตัว การนำยาเดิมมาด้วย การมีญาติหรือผู้ดูแลมาร่วม และการแจ้งเลื่อนนัดในกรณีไม่สามารถมาตามวันนัด พร้อมบันทึกผลการมาตรวจหรือการขาดนัด หลังเสร็จสิ้นการตรวจ ผู้วิจัยประเมินความรู้หลังได้รับการดูแลและความพึงพอใจของผู้ป่วยหรือผู้ดูแลต่อรูปแบบการบริการ รวมทั้งประเมินความพึงพอใจของพยาบาลผู้ปฏิบัติงานต่อการใช้รูปแบบดังกล่าว

ข้อมูลทุกชุดได้รับการตรวจสอบความครบถ้วนก่อนบันทึกลงฐานข้อมูล ผู้วิจัยกำหนดรหัสแทนชื่อผู้เข้าร่วมวิจัย ไม่บันทึกข้อมูลที่สามารถระบุตัวบุคคลในฐานข้อมูลวิเคราะห์ และรายงานผลในภาพรวม ผู้เข้าร่วมมีสิทธิถอนตัวจากการวิจัยได้ทุกเวลาโดยไม่ส่งผลต่อสิทธิในการรักษา ข้อมูลวิจัยได้รับการเก็บรักษาตามระยะเวลาที่กำหนดโดยหน่วยงาน และทำลายภายหลังสิ้นสุดระยะเวลาการเก็บรักษาตามหลักจริยธรรมการวิจัย

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ การแจกแจงความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ใช้วิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง

2. สถิติเชิงอนุมาน ใช้สถิติ Independent t-test ค่า Chi-square และ RR พร้อม 95% CI เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยก่อนและหลังการใช้รูปแบบการดูแล โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

จริยธรรมวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตระหนักถึงหลักความปลอดภัย การยอมรับในความเป็นบุคคลของผู้ให้ข้อมูล เพื่อขออนุญาตในการเก็บข้อมูลผู้วิจัยได้อธิบายถึง วัตถุประสงค์ของการศึกษาและขอความยินยอมจากกลุ่มตัวอย่างเป็นลายลักษณ์อักษรผ่านแบบฟอร์มให้ความยินยอม (Informed consent form) และกลุ่มตัวอย่างสามารถแจ้งยุติก่อนสิ้นสุดการศึกษาได้ตลอดเวลาและข้อมูลทุกอย่างจะถูกปิดเป็นความลับ ผลการวิจัยจะถูกนำเสนอในภาพรวมเพื่อใช้ประโยชน์สำหรับการศึกษา หากมีข้อสงสัยสามารถติดต่อผู้วิจัยได้ตลอดเวลา ทั้งนี้ได้เสนอขอรับรองจริยธรรมโครงการวิจัยจากโรงพยาบาลกุมภวาปี เลขที่ 25/2568 ลงวันที่ 2 พฤษภาคม 2568

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การวิจัยเรื่องการพัฒนารูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจหัวใจด้วยคลื่นเสียงสะท้อนความถี่สูงผ่านทางทรวงอก โรงพยาบาลกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี เป็นการวิจัยและพัฒนา แบ่งการดำเนินการเป็น 3 ระยะ ผลการวิจัยนำเสนอตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย ดังนี้

1. ผลการศึกษาสถานการณ์ ปัญหา และความต้องการในการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจ TTE

ผลการศึกษาข้อมูลบริการและการวิเคราะห์สถานการณ์ของห้องตรวจ Echocardiography กลุ่มงานตรวจรักษาพิเศษ โรงพยาบาลกุมภวาปี พบว่า จำนวนผู้ป่วยที่เข้ารับบริการตรวจหัวใจด้วยคลื่นเสียงสะท้อนความถี่สูงผ่านทางทรวงอก (Transthoracic Echocardiography: TTE) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปีงบประมาณ พ.ศ. 2566–2568 มีผู้รับบริการจำนวน 100, 123 และ 144 ราย ตามลำดับ ขณะที่อัตราการไม่มาตรวจตามนัดเท่ากับร้อยละ 21.00, 22.00 และ 30.00 ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นว่าแม้ศักยภาพและความต้องการใช้บริการตรวจ TTE เพิ่มขึ้น แต่การไม่มาตรวจตามนัดยังเป็นปัญหาสำคัญของระบบบริการ

จากการวิเคราะห์ช่องว่างของระบบบริการ (Gap Analysis) พบประเด็นปัญหาสำคัญ 4 ด้าน ได้แก่ 1) **ด้านผู้ป่วยและผู้ดูแล** ผู้ป่วยมีความวิตกกังวลเกี่ยวกับการตรวจ ขาดความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ ขั้นตอน และการเตรียมตัวก่อนตรวจ รวมถึงมีความเข้าใจคลาดเคลื่อนว่าหากไม่มีอาการผิดปกติไม่จำเป็นต้องมาตรวจ 2) **ด้านการนัดหมาย** พบการลืมวันนัดและไม่มีระบบแจ้งเตือนก่อนถึงวันตรวจอย่างเป็นระบบ 3) **ด้านการเข้าถึงบริการ** ผู้ป่วยบางรายมีข้อจำกัดด้านการเดินทาง ไม่มีญาติหรือผู้ดูแลพามาโรงพยาบาล และมีภาระค่าใช้จ่ายในการเดินทาง และ 4) **ด้านระบบบริการและการสื่อสาร** ระบบเดิมขาดช่องทางการสื่อสารสองทางที่สะดวกและรวดเร็วระหว่างผู้ป่วย ผู้ดูแล และเจ้าหน้าที่ ทำให้ไม่สามารถยืนยันหรือปรับเปลี่ยนวันนัดล่วงหน้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดช่องว่างของตารางตรวจและการใช้ทรัพยากรไม่เต็มศักยภาพ ผลการศึกษาความต้องการจึงสะท้อนถึงความจำเป็นในการพัฒนารูปแบบที่เชื่อมโยงการให้ความรู้ การเตรียมความพร้อม การสื่อสาร และการติดตามนัดเข้าด้วยกัน โดยควรมีสื่อที่ผู้ป่วยและผู้ดูแลสามารถเข้าถึงได้ง่าย มีช่องทางสอบถามข้อมูล และมีระบบแจ้งเตือนและยืนยันนัดก่อนวันตรวจ

2. ผลการพัฒนารูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจ TTE

ผู้วิจัยนำผลการศึกษาสถานการณ์และความต้องการในระยะที่ 1 ร่วมกับการทบทวนแนวคิดการจัดการตนเอง (Self-Management) และหลักฐานที่เกี่ยวข้อง มาสังเคราะห์และพัฒนารูปแบบการดูแล โดยมุ่งให้ผู้ป่วยและผู้ดูแลมีความรู้ สามารถเตรียมตัวได้ถูกต้อง มีช่องทางสื่อสารกับหน่วยบริการ และได้รับการติดตามก่อนถึงวันนัด

รูปแบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 5 องค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ 1) การให้ความรู้เกี่ยวกับการตรวจ TTE และการปฏิบัติตัวก่อนและหลังตรวจ 2) การจัดทำ QR code เพื่อให้ผู้ป่วยและผู้ดูแลเข้าถึงข้อมูลและสื่อความรู้ 3) การใช้ LINE OA เป็นช่องทางให้ความรู้ สื่อสาร และแจ้งเตือนการนัดหมาย 4) การใช้สื่อวิดีโออธิบายขั้นตอนการตรวจและการเตรียมตัว และ 5) การโทรศัพท์ติดตามและยืนยันนัดก่อนวันตรวจ 3 วัน รวมถึงเปิดโอกาสให้ผู้ป่วยแจ้งปัญหาและเลื่อนนัดล่วงหน้าเมื่อไม่สามารถมาตรวจตามกำหนดได้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของรูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจ TTE ที่พัฒนาขึ้น

องค์ประกอบ	กิจกรรมสำคัญ	ผลลัพธ์ที่คาดหวัง
1. การให้ความรู้	ให้ความรู้เกี่ยวกับ TTE ขั้นตอนและการปฏิบัติตัว	ความรู้และความเข้าใจเพิ่มขึ้น
2. QR code	เชื่อมโยงสื่อและข้อมูลสำหรับผู้ป่วย/ผู้ดูแล	เข้าถึงข้อมูลได้สะดวก
3. LINE OA	ให้ข้อมูล ติดต่อสื่อสาร และแจ้งเตือนนัด	ลดการลืมนัด เพิ่มการสื่อสาร
4. วิดีโอให้ความรู้	แสดงขั้นตอนและการเตรียมตัวอย่างเป็นรูปธรรม	ลดความวิตกกังวลและเพิ่มความพร้อม
5. โทรศัพท์ก่อนนัด 3 วัน	ยืนยันนัด ประเมินปัญหา และจัดการกรณีไม่สามารถมาตรวจ	ลดการไม่มาตามนัดและเพิ่มประสิทธิภาพคิวตรวจ

ผลการตรวจสอบรูปแบบโดยผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน พบว่ารูปแบบและเครื่องมือมีความครอบคลุมและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ โดยมีค่าดัชนีความตรงเชิงเนื้อหาS-CVI (Scale-level Content Validity Index) เท่ากับ 0.89 ส่วนแบบประเมินความรู้มีค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.88 แสดงว่าเครื่องมือมีคุณภาพในระดับที่สามารถนำไปใช้ในการศึกษาประสิทธิผลได้

3. ผลการศึกษาประสิทธิผลของรูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจ TTE

การประเมินประสิทธิผลดำเนินการในผู้ป่วยจำนวน 144 ราย แบ่งเป็นกลุ่มควบคุมที่ได้รับการดูแลตามระบบเดิม จำนวน 72 ราย และกลุ่มทดลองที่ได้รับการดูแลตามรูปแบบที่พัฒนาขึ้น จำนวน 72 ราย โดยประเมินผลด้านความรู้ การปฏิบัติตัวในวันตรวจ การมาตรวจตามนัด และความพึงพอใจ

3.1 ลักษณะทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มควบคุมมีอายุเฉลี่ย 63.18 ปี (SD=10.42) และกลุ่มทดลองมีอายุเฉลี่ย 62.61 ปี (SD=10.08) ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง คิดเป็นร้อยละ 55.6 และ 52.8 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐาน ได้แก่ อายุ เพศ ดัชนีมวลกาย โรคประจำตัว ระยะทางจากบ้านถึงโรงพยาบาล การมีผู้ดูแล และการใช้ LINE พบว่าทั้งสองกลุ่มไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>.05) แสดงว่ากลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลองมีลักษณะพื้นฐานใกล้เคียงกันก่อนการทดลอง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบลักษณะทั่วไปของกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง

ลักษณะทั่วไป	กลุ่มควบคุม (n=72)	กลุ่มทดลอง (n=72)	ค่าสถิติ	p-value
อายุ (ปี), Mean±SD	63.18±10.42	62.61±10.08	t=0.33	.739
BMI (kg/m²), Mean±SD	24.83±3.91	24.51±3.76	t=0.50	.617
เพศ, n (%)			χ^2=0.11	.738
ชาย	32 (44.4)	34 (47.2)		
หญิง	40 (55.6)	38 (52.8)		
มีโรคประจำตัว, n (%)	59 (81.9)	57 (79.2)	χ^2=0.18	.675
ระยะทางจากบ้านถึง รพ.			χ^2=0.31	.857
≤10 กิโลเมตร	22 (30.6)	24 (33.3)		
11–30 กิโลเมตร	31 (43.1)	29 (40.3)		
>30 กิโลเมตร	19 (26.4)	19 (26.4)		
มีญาติ/ผู้ดูแล, n (%)	60 (83.3)	62 (86.1)	χ^2=0.21	.646
ใช้ LINE, n (%)	52 (72.2)	55 (76.4)	χ^2=0.33	.568

3.2 ความรู้เกี่ยวกับการตรวจและการปฏิบัติตัว

ก่อนการทดลอง กลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลองมีคะแนนความรู้เฉลี่ย 11.08±2.14 และ 11.21±2.07 คะแนน ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p=.712) ภายหลังการทดลอง กลุ่มทดลองมีคะแนนความรู้เฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 17.86±1.42 คะแนน สูงกว่ากลุ่มควบคุมซึ่งมีคะแนนเฉลี่ย 12.03±2.01 คะแนนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<.001) ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบคะแนนความรู้เกี่ยวกับการตรวจ TTE ระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง

คะแนนความรู้	กลุ่มควบคุม (n=72) Mean±SD	กลุ่มทดลอง (n=72) Mean±SD	t	p-value
ก่อนการทดลอง	11.08±2.14	11.21±2.07	-0.37	.712
หลังการทดลอง	12.03±2.01	17.86±1.42	-20.10	<.001
การเปลี่ยนแปลงของคะแนน	0.95±1.58	6.65±1.89	-19.64	<.001

เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่ม กลุ่มทดลองมีคะแนนความรู้หลังได้รับรูปแบบสูงกว่าก่อนทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<.001) สะท้อนว่าการให้ความรู้ผ่าน QR code, LINE OA และสื่อวิดีโอ ร่วมกับการติดตามก่อนวันนัด ช่วยเพิ่มความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการตรวจ TTE

3.3 การปฏิบัติตัวและการมาตรวจตามนัด

กลุ่มทดลองมีสัดส่วนการปฏิบัติตัวอย่างถูกต้องสูงกว่ากลุ่มควบคุมในหลายด้าน ได้แก่ การรับประทานอาหารตามคำแนะนำ การรับประทานยาประจำตัว การนำยาเดิมมาด้วย และการแจ้งล่วงหน้าเมื่อไม่สามารถมาตรวจตามนัด ผลลัพธ์สำคัญของการศึกษาคือการมาตรวจตามนัด พบว่ากลุ่มทดลองมาตรวจตามนัด 67 ราย (93.1%) และไม่มาตรวจตามนัด 5 ราย (6.9%) ขณะที่กลุ่มควบคุมมาตรวจตามนัด 55 ราย (76.4%) และไม่มาตรวจตามนัด 17 ราย (23.6%) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มพบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p=.005) ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบการปฏิบัติตัวและการมาตรวจตามนัดระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง

ผลลัพธ์	กลุ่มควบคุม n (%)	กลุ่มทดลอง n (%)	χ^2	p-value
รับประทานอาหารตามคำแนะนำ	57 (79.2)	68 (94.4)	7.36	.007
รับประทานยาประจำตัวตามคำแนะนำ	59 (81.9)	69 (95.8)	7.05	.008
นำยาเดิมมาด้วย	48 (66.7)	64 (88.9)	10.29	.001
มีญาติ/ผู้ดูแลมาด้วย	54 (75.0)	61 (84.7)	2.12	.145
แจ้งล่วงหน้าเมื่อไม่สามารถมาตามนัด	38 (52.8)	59 (81.9)	13.94	<.001
มาตรวจตามนัด	55 (76.4)	67 (93.1)	7.78	.005
ไม่มาตรวจตามนัด	17 (23.6)	5 (6.9)		

เมื่อพิจารณาอัตราการไม่มาตรวจตามนัด พบว่ากลุ่มทดลองมีอัตราร้อยละ 6.9 ซึ่งต่ำกว่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ที่ร้อยละ 10 และต่ำกว่ากลุ่มควบคุมซึ่งมีอัตราร้อยละ 23.6

3.4 ความพึงพอใจต่อรูปแบบการดูแล

ผู้ป่วยในกลุ่มทดลองมีความพึงพอใจต่อรูปแบบการดูแลโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด (Mean=4.68, SD=0.31) โดยด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดคือ ระบบแจ้งเตือนและติดตามนัด (Mean=4.76, SD=0.32) รองลงมาคือ ความชัดเจนของสื่อวิดีโอ (Mean=4.72, SD=0.35)และความสะดวกในการใช้ LINE OA (Mean=4.69, SD=0.37) ตามลำดับดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความพึงพอใจของผู้ป่วยและผู้ดูแลต่อรูปแบบการดูแลที่พัฒนาขึ้น (n=72)

ด้านที่ประเมิน	Mean	SD	ระดับ
การให้ข้อมูลและคำแนะนำ	4.65	0.38	มากที่สุด
ความสะดวกในการใช้ LINE OA	4.69	0.37	มากที่สุด
ความชัดเจนของสื่อวิดีโอ	4.72	0.35	มากที่สุด
ระบบแจ้งเตือนและติดตามนัด	4.76	0.32	มากที่สุด
ความสะดวกของกระบวนการรับบริการ	4.61	0.41	มากที่สุด
ความพึงพอใจโดยรวม	**4.68**	**0.31**	**มากที่สุด**

โดยสรุป ผลการประเมินประสิทธิผลของรูปแบบแสดงให้เห็นว่า กลุ่มทดลองมีความรู้เกี่ยวกับการตรวจ TTE และการเตรียมตัวสูงขึ้น มีสัดส่วนการปฏิบัติตัวที่เหมาะสมมากขึ้น และมีอัตราการไม่มาตรวจตามนัดต่ำกว่ากลุ่มควบคุม นอกจากนี้ ผู้ป่วยและผู้ดูแลมีความพึงพอใจต่อรูปแบบที่พัฒนาขึ้นในระดับมากที่สุด

อภิปรายผล

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยและพัฒนาเพื่อพัฒนารูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจหัวใจด้วยคลื่นเสียงสะท้อนความถี่สูงผ่านทางทรวงอก (Transthoracic Echocardiography: TTE) โรงพยาบาลกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี โดยผลการวิจัยสะท้อนให้เห็นว่า การพัฒนารูปแบบที่เริ่มจากการวิเคราะห์ปัญหาและความต้องการของผู้รับบริการและบุคลากร แล้วนำเทคโนโลยีการสื่อสารมาผสมผสานกับการให้ความรู้ การเตรียมความพร้อม และการติดตามนัดอย่างเป็นระบบ สามารถส่งเสริมความรู้และการปฏิบัติตัวของผู้ป่วย เพิ่มการมาตรวจตามนัด และสร้างความพึงพอใจต่อบริการได้ ผลการศึกษาสามารถอภิปรายตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยได้ดังนี้

1. สถานการณ์ ปัญหา และความต้องการในการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจ TTE

ผลการศึกษาระยะที่ 1 พบว่า ปัญหาการไม่มาตรวจตามนัดของผู้ป่วยไม่ได้เกิดจากปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง แต่เกี่ยวข้องกับทั้งปัจจัยส่วนบุคคลและระบบบริการ ได้แก่ ความวิตกกังวล การขาดความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการตรวจและการเตรียมตัว ความเข้าใจคลาดเคลื่อนเกี่ยวกับความจำเป็นของการตรวจ การลืมวันนัด ข้อจำกัดด้านการเดินทางและค่าใช้จ่าย ตลอดจนการขาดช่องทางสื่อสารและระบบแจ้งเตือนที่มีประสิทธิภาพ โดยข้อมูลของโรงพยาบาลกุมภวาปีในปี พ.ศ. 2566–2568 พบอัตราการไม่มาตรวจตามนัดร้อยละ 21.0, 22.0 และ 30.0 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มศักยภาพในการตรวจหรือการลดระยะเวลารอคอยเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ หากยังไม่มีระบบสนับสนุนให้ผู้ป่วยสามารถเข้าถึงบริการตามวันนัดได้อย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับ McLean และคณะ [4] ซึ่งจากการทบทวนอย่างเป็นระบบพบว่า การไม่มาตามนัดเป็นปัญหาที่มีหลายปัจจัยเกี่ยวข้อง และระบบเตือนนัดสามารถเพิ่มการมาตามนัดได้ในบริการสุขภาพหลายประเภท นอกจากนี้ ระบบที่ให้ข้อมูลเพิ่มเติมนอกเหนือจากวัน เวลา และสถานที่นัด หรือ “reminder plus” อาจมีประสิทธิผลมากกว่าการเตือนนัดเพียงอย่างเดียวในบางบริบท โดยเฉพาะเมื่อผู้ป่วยต้องมีการเตรียมตัวหรือมีความไม่แน่ใจเกี่ยวกับการรับบริการ ดังนั้น ผลการวิเคราะห์สถานการณ์ของการศึกษาครั้งนี้จึงสนับสนุนแนวคิดว่า การแก้ปัญหาการไม่มาตรวจ TTE ควรดำเนินการแบบหลายองค์ประกอบ ทั้งการให้ข้อมูล การเตรียมความพร้อม การแจ้งเตือน และการเปิดช่องทางให้ผู้ป่วยสามารถสื่อสารกลับมายังหน่วยบริการได้

2. การพัฒนารูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจ TTE

ผลการวิจัยระยะที่ 2 ได้รูปแบบการดูแลที่ประกอบด้วยการให้ความรู้เกี่ยวกับการตรวจและการปฏิบัติตัว การใช้ QR code เพื่อเข้าถึงข้อมูล การใช้ LINE OA เป็นช่องทางการสื่อสารและแจ้งเตือน การใช้สื่อวิดีโอ และการโทรศัพท์ติดตามเพื่อ

ยืนยันนัดก่อนวันตรวจ 3 วัน จุดสำคัญของรูปแบบจึงไม่ใช่การใช้เทคโนโลยีเพียงอย่างเดียว แต่เป็นการเชื่อมโยงเทคโนโลยีเข้ากับกระบวนการพยาบาลและการติดตามผู้ป่วย ทำให้ผู้ป่วยได้รับข้อมูลตั้งแต่ก่อนเข้ารับบริการ สามารถทบทวนข้อมูลได้ด้วยตนเอง และมีช่องทางติดต่อกับหน่วยบริการเมื่อเกิดปัญหา แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับหลักฐานเกี่ยวกับระบบเตือนนัด โดย Hasvold และ Wootton [9] ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้โทรศัพท์ SMS และระบบโทรศัพท์อัตโนมัติ พบว่าเกือบทุกการศึกษารายงานผลในทิศทางที่ช่วยลดการไม่มาตามนัด และการโทรศัพท์โดยบุคลากรมีแนวโน้มให้ผลดีกว่าการเตือนอัตโนมัติ การผสมผสาน LINE OA กับการโทรศัพท์ของรูปแบบในการศึกษาครั้งนี้จึงมีข้อได้เปรียบ เนื่องจาก LINE OA ทำหน้าที่เป็นช่องทางการให้ข้อมูลและแจ้งเตือนที่ผู้ป่วยสามารถเข้าถึงซ้ำได้ ขณะที่การโทรศัพท์ก่อนตรวจทำให้เกิดการสื่อสารโดยตรง สามารถยืนยันการมาตรวจ ค้นหาปัญหา และช่วยจัดการอุปสรรคเฉพาะรายก่อนถึงวันนัด นอกจากนี้รูปแบบและสื่อที่พัฒนาขึ้นมีค่าดัชนีความตรงเชิงเนื้อหาเท่ากับ 0.89 และแบบประเมินความรู้มีค่าความเชื่อมั่น 0.88 สะท้อนว่าเครื่องมือมีความสอดคล้องกับเนื้อหาและมีความสม่ำเสมอในการวัดในระดับที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม คุณค่าที่สำคัญของรูปแบบไม่ได้อยู่ที่คุณภาพของเครื่องมือเพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากการพัฒนาบนพื้นฐานของปัญหาจริงในหน่วยบริการ และนำปัญหาที่ค้นพบในระยะที่ 1 มาออกแบบองค์ประกอบของรูปแบบโดยตรง จึงทำให้รูปแบบมีความสอดคล้องกับบริบทของผู้ป่วยและระบบบริการของโรงพยาบาลกุมภวาปี

3. ผลของรูปแบบต่อความรู้เกี่ยวกับการตรวจและการปฏิบัติตัว

ผลการศึกษาระยะที่ 3 พบว่า ก่อนการทดลองกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลองมีคะแนนความรู้ไม่แตกต่างกัน แต่ภายหลังได้รับรูปแบบ กลุ่มทดลองมีคะแนนความรู้เกี่ยวกับการตรวจ TTE และการปฏิบัติตัวสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<.001$) รวมทั้งมีคะแนนการเปลี่ยนแปลงของความรู้สูงกว่ากลุ่มควบคุม แสดงให้เห็นว่าการจัดการความรู้ผ่านหลายช่องทางสามารถส่งเสริมความเข้าใจของผู้ป่วยได้ ผลดังกล่าวอาจอธิบายได้จากรูปแบบที่ไม่ได้ให้ข้อมูลเพียงครั้งเดียวในวันที่นัด แต่เปิดโอกาสให้ผู้ป่วยและผู้ดูแลสามารถเข้าถึงและทบทวนข้อมูลผ่าน QR code, LINE OA และวิดีโอได้ตามความต้องการ ประกอบกับการติดตามทางโทรศัพท์ก่อนตรวจช่วยให้สามารถทบทวนข้อมูลและแก้ไขความเข้าใจคลาดเคลื่อนได้อีกครั้ง การใช้เทคโนโลยีจึงทำหน้าที่สนับสนุนการจัดการตนเอง โดยช่วยให้ผู้ป่วยมีข้อมูลที่จำเป็นต่อการเตรียมตัวและการตัดสินใจเข้ารับบริการ ทั้งนี้ หลักฐานเกี่ยวกับเทคโนโลยีสนับสนุนการจัดการตนเองในผู้ป่วยโรคเรื้อรังยังชี้ให้เห็นว่า mHealth, SMS และเครื่องมือดิจิทัลสามารถสนับสนุนพฤติกรรมการจัดการสุขภาพของผู้ป่วยได้ [9]

การเพิ่มขึ้นของความรู้ยังสอดคล้องกับผลด้านพฤติกรรม โดยกลุ่มทดลองมีคะแนนการปฏิบัติตัวโดยรวม การเตรียมตัวก่อนตรวจ การจัดการนัดหมาย และการสื่อสารกับหน่วยบริการสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<.001$) แสดงให้เห็นว่าความรู้ที่ได้รับสามารถเชื่อมโยงไปสู่การปฏิบัติจริง ไม่ได้จำกัดอยู่เพียงผลลัพธ์ด้านความรู้เท่านั้น ทั้งนี้ การเตรียมผู้ป่วยก่อนตรวจที่ชัดเจนและสามารถเข้าถึงข้อมูลซ้ำได้อาจช่วยลดความไม่แน่นอน ทำให้ผู้ป่วยสามารถวางแผนการเดินทาง การรับประทานยา การนำข้อมูลหรือยาเดิม และการประสานผู้ดูแลได้เหมาะสมยิ่งขึ้น

4. ผลของรูปแบบต่อการไม่มาตรวจตามนัด

ผลลัพธ์ที่สำคัญของการศึกษาครั้งนี้คือ กลุ่มทดลองมีอัตราการไม่มาตรวจตามนัดร้อยละ 6.9 ต่ำกว่ากลุ่มควบคุมที่มีอัตราร้อยละ 23.6 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p=.005$) โดยกลุ่มทดลองมีความเสี่ยงต่อการไม่มาตรวจตามนัดเป็น 0.29 เท่าของกลุ่มควบคุม (RR=0.29, 95% CI: 0.11–0.75) หรือคิดเป็นการลดความเสี่ยงสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 70.6 ผลดังกล่าวมีความสำคัญทั้งในเชิงสถิติและเชิงระบบบริการ เนื่องจากแสดงให้เห็นว่ารูปแบบที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการลดปัญหาการสูญเสียช่องเวลาตรวจและเพิ่มโอกาสที่ผู้ป่วยจะได้รับการตรวจตามแผนการรักษา ผลการศึกษาสอดคล้องกับ Robotham และคณะ [5] ซึ่งทำการทบทวนอย่างเป็นระบบและการวิเคราะห์อภิมาน พบว่าผู้ป่วยที่ได้รับการแจ้งเตือนแบบข้อความอิเล็กทรอนิกส์มีโอกาสมาตามนัดมากกว่าผู้ที่ไม่ได้รับการแจ้งเตือน และมีโอกาสไม่มาตามนัดลดลง โดยการแจ้งเตือนมากกว่า

หนึ่งครั้งอาจเพิ่มประสิทธิผลได้ นอกจากนี้ Boksmati และคณะ [10] วิเคราะห์อภิมานเกี่ยวกับ SMS reminder พบว่าการแจ้งเตือนช่วยเพิ่มการมาตามนัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยการศึกษาแบบสุ่มมีกลุ่มควบคุมให้ pooled odds ratio เท่ากับ 1.62 (95% CI: 1.35–1.94) ขณะที่ Guy และคณะ [11] รายงานจากการทบทวนอย่างเป็นระบบและการวิเคราะห์อภิมานว่า ในการทดลองแบบสุ่ม SMS reminder เพิ่มการมาตามนัดประมาณ 1.48 เท่า (95% CI: 1.23–1.72)

ขนาดผลที่พบในการศึกษาครั้งนี้อาจสูงกว่าการใช้ระบบแจ้งเตือนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากรูปแบบเป็นมาตรการหลายองค์ประกอบ ได้แก่ การให้ความรู้ การใช้สื่อวิดีโอ การแจ้งเตือนผ่าน LINE OA และการโทรศัพท์ยืนยันนัดก่อนตรวจ 3 วัน ทำให้สามารถจัดการสาเหตุของการไม่มาตามนัดได้หลายด้านพร้อมกัน ทั้งการลืมนัด การขาดความรู้ ความวิตกกังวล และการไม่สามารถแจ้งเปลี่ยนแปลงนัดล่วงหน้า สอดคล้องกับ McLean และคณะ [8] ที่เสนอว่าระบบ “reminder plus” ซึ่งเพิ่มเติมข้อมูลที่ช่วยให้ผู้ป่วยสามารถเข้ารับบริการได้ อาจมีประโยชน์มากกว่าการแจ้งวันและเวลานัดเพียงอย่างเดียว

อย่างไรก็ตาม การตีความ RR=0.29 ควรพิจารณาช่วงความเชื่อมั่น 95% ร่วมด้วย แม้ช่วงความเชื่อมั่น 0.11–0.75 ไม่คร่อม 1 และสนับสนุนผลเชิงป้องกันของรูปแบบ แต่ช่วงดังกล่าวยังค่อนข้างกว้าง ซึ่งอาจสัมพันธ์กับจำนวนเหตุการณ์ไม่มาตามนัดที่มีเพียง 22 เหตุการณ์จากผู้ป่วยทั้งหมด 144 ราย ดังนั้น การศึกษาในกลุ่มตัวอย่างที่ใหญ่ขึ้นและหลายโรงพยาบาลจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประมาณขนาดผลของรูปแบบ

5. ผลของรูปแบบต่อความพึงพอใจของผู้รับบริการ

ผลการศึกษาพบว่า กลุ่มทดลองมีคะแนนความพึงพอใจโดยรวมในระดับมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.68 S.D.= 0.31 และผู้ที่ได้รับรูปแบบมีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด โดยเฉพาะด้านระบบแจ้งเตือนและติดตามนัด ความชัดเจนของสื่อและการติดต่อสื่อสาร ผลดังกล่าวอาจเนื่องมาจากรูปแบบช่วยลดความไม่แน่นอนของผู้ป่วยก่อนเข้ารับบริการ ทำให้ทราบว่าจะต้องเตรียมตัวอย่างไร มารับบริการเมื่อใด และสามารถติดต่อกับหน่วยบริการได้เมื่อมีข้อสงสัยหรือมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงนัด ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดจากการทบทวนของ McLean และคณะ [4] ที่ชี้ว่าระบบเตือนนัดที่มีประสิทธิภาพควรทำหน้าที่มากกว่าการเตือนความจำ โดยควรสนับสนุนการยกเลิก การเลื่อนนัด และการจัดสรรช่องบริการใหม่อย่างเหมาะสม รวมทั้งต้องออกแบบให้สอดคล้องกับบริบทของบริการ นอกจากนี้ Hasvold และ Wootton [8] พบว่าการติดต่อเตือนนัดโดยโทรศัพท์และระบบอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปมีผลเชิงบวกต่อการมาตามนัด การที่การศึกษาครั้งนี้ผสมผสานการสื่อสารแบบดิจิทัลกับการติดต่อจากบุคลากรจึงอาจเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผู้ป่วยรู้สึกได้รับการดูแลอย่างต่อเนื่องและมีความพึงพอใจต่อบริการสูงขึ้น

ในมิติทางคลินิก การตรวจหัวใจด้วยคลื่นเสียงสะท้อนความถี่สูงผ่านทางทรวงอก (TTE) เป็นการตรวจเฉพาะทางที่คุณภาพของการตรวจไม่ได้ขึ้นอยู่กับการมาตรวจตามนัดเพียงอย่างเดียว แต่ยังเกี่ยวข้องกับความพร้อมและความร่วมมือของผู้ป่วย ตลอดจนเทคนิคการตรวจและการจัดท่าที่เหมาะสม แนวทางของ American Society of Echocardiography ระบุว่าการตรวจ TTE ที่มีคุณภาพต้องอาศัยการได้มาซึ่งภาพอย่างเป็นระบบและการปรับเทคนิคให้เหมาะสมกับผู้ป่วย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เพียงพอสำหรับการแปลผลและการตัดสินใจทางคลินิก การที่รูปแบบการดูแลครั้งนี้ช่วยเพิ่มความรู้และการปฏิบัติตัวของผู้ป่วยก่อนเข้ารับการตรวจ อาจมีส่วนสนับสนุนให้ผู้ป่วยมีความพร้อม เข้าใจกระบวนการตรวจ และให้ความร่วมมือระหว่างการตรวจได้ดีขึ้น ซึ่งในทางทฤษฎีอาจเอื้อต่อความสำเร็จและประสิทธิภาพของกระบวนการตรวจ TTE

สรุปผล

รูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจ TTE ที่พัฒนาขึ้นมีจุดเด่นที่การเชื่อมโยง “การให้ความรู้–การเตรียมความพร้อม–การสื่อสาร–การแจ้งเตือน–การติดตามยืนยันนัด” เข้าเป็นกระบวนการเดียวกัน มากกว่าการนำเทคโนโลยีมาใช้เป็นเครื่องมือแจ้งเตือนเพียงอย่างเดียว ผลลัพธ์ที่พบทั้งด้านความรู้ การปฏิบัติตัว การมาตรวจตามนัด และความพึงพอใจจึง

สนับสนุนการนำรูปแบบดังกล่าวไปใช้ในระบบบริการตรวจ TTE ของโรงพยาบาลกุมภวาปี และอาจเป็นต้นแบบสำหรับหน่วยบริการที่มีปัญหาการไม่มาตามนัดในลักษณะใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ การขยายผลไปยังบริบทอื่นควรคำนึงถึงความพร้อมด้านบุคลากร การเข้าถึงเทคโนโลยีของผู้ป่วย และระบบการจัดการนัดหมายของแต่ละหน่วยบริการ

ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะจากการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ดำเนินการในโรงพยาบาลกุมภวาปีเพียงแห่งเดียว จึงควรใช้ความระมัดระวังในการอ้างอิงผลไปยังสถานพยาบาลที่มีบริบทแตกต่างกัน อีกทั้งรูปแบบการดูแลมีการใช้ LINE OA และสื่อดิจิทัล ซึ่งอาจมีข้อจำกัดในผู้ป่วยสูงอายุหรือผู้ที่มีทักษะด้านเทคโนโลยีต่ำ อย่างไรก็ตาม รูปแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มความรู้และการปฏิบัติตัว รวมทั้งลดการไม่มาตรวจตามนัดได้ จึงควรนำไปประยุกต์ใช้ในระบบบริการตรวจ TTE อย่างต่อเนื่อง และศึกษาประสิทธิผลในหลายสถานพยาบาลและติดตามผลในระยะยาว เพื่อยืนยันประสิทธิผลและความยั่งยืนของรูปแบบ

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. ควรนำรูปแบบการดูแลที่พัฒนาขึ้นไปใช้เป็นแนวทางในการเตรียมความพร้อมและติดตามผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจ TTE โดยบูรณาการการให้ความรู้ สื่อวิดีโอ LINE OA และการโทรศัพท์ยืนยันนัดเข้ากับระบบบริการตามปกติ
2. ควรพัฒนาระบบแจ้งเตือนและติดตามนัดให้เชื่อมโยงกับกระบวนการนัดหมายของโรงพยาบาล เพื่อให้ผู้ป่วยสามารถรับข้อมูล ยืนยันนัด หรือแจ้งเลื่อนนัดได้อย่างสะดวก ช่วยลดอัตราการไม่มาตรวจตามนัดและเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารคิวตรวจ
3. ควรประเมินความพร้อมด้านการใช้เทคโนโลยีของผู้ป่วยเป็นรายบุคคล และจัดช่องทางการสื่อสารทางเลือกสำหรับผู้สูงอายุหรือผู้ที่ไม่สามารถใช้ LINE OA ได้ เพื่อให้ผู้ป่วยทุกกลุ่มสามารถเข้าถึงรูปแบบการดูแลได้อย่างเหมาะสมและเท่าเทียม

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรศึกษาประสิทธิผลของรูปแบบในโรงพยาบาลหลายแห่งและเพิ่มขนาดกลุ่มตัวอย่าง เพื่อประเมินความสามารถในการนำรูปแบบไปใช้ในบริบทที่แตกต่างกันและเพิ่มความสามารถในการอ้างอิงผลการวิจัย
2. ควรศึกษาผลลัพธ์ในระยะยาวและด้านเศรษฐศาสตร์สุขภาพ เช่น อัตราการไม่มาตรวจตามนัด ระยะเวลารอคอย ต้นทุนการติดตามผู้ป่วย ภาระงานของบุคลากร และความคุ้มค่าของการใช้ LINE OA เพื่อประเมินความยั่งยืนของรูปแบบในระบบบริการ

เอกสารอ้างอิง

1. Mitchell C, Rahko PS, Blauwet LA, Canaday B, Finstuen JA, Foster MC, Horton K, Ogunyankin KO, Palma RA, Velazquez EJ. Guidelines for performing a comprehensive transthoracic echocardiographic examination in adults: recommendations from the American Society of Echocardiography. J Am Soc Echocardiogr. 2019; 32(1): 1-64. doi:10.1016/j.echo.2018.06.004
2. Galderisi M, Cosyns B, Edvardsen T, Cardim N, Delgado V, Di Salvo G, Donal E, Sade LE, Ernande L, Garbi M, Grapsa J, Hagendorff A, Kamp O, Magne J, Santoro C, Stefanidis A, Lancellotti P, Popescu B, Habib G. Standardization of adult transthoracic echocardiography reporting in agreement with recent chamber quantification, diastolic function, and heart valve disease recommendations: an expert consensus document of the European Association of Cardiovascular Imaging. Eur Heart J Cardiovasc Imaging. 2017; 18(12): 1301-1310. doi:10.1093/ehjci/jex244
3. Taub CC, Stainback RF, Abraham T, Forsha D, Garcia-Sayan E, Hill JC, Hung J, Mitchell C, Rigolin VH, Sachdev V, Sengupta PP, Sorrell VL, Strom J. Guidelines for the standardization of adult echocardiography reporting: recommendations from the American Society of Echocardiography. J Am Soc Echocardiogr. 2025; 38(9): 735-774. doi:10.1016/j.echo.2025.06.001
4. McLean S, Booth A, Gee M, Salway S, Cobb M, Bhanbhro S, Nancarrow S. Appointment reminder systems are effective but not optimal: results of a systematic review and evidence synthesis employing realist principles. Patient Prefer Adherence. 2016; 10: 479-499. doi:10.2147/PPA.S93046
5. Robotham D, Satkunanathan S, Reynolds J, Stahl D, Wykes T. Using digital notifications to improve attendance in clinic: systematic review and meta-analysis. BMJ Open. 2016; 6(10): e012116. doi:10.1136/bmjopen-2016-012116
6. Gurol-Urganci I, de Jongh T, Vodopivec-Jamsek V, Atun R, Car J. Mobile phone messaging reminders for attendance at healthcare appointments. Cochrane Database Syst Rev. 2013; (12): CD007458. doi:10.1002/14651858.CD007458.pub3
7. Werner K, Alsuhaibani SA, Alsukait RF, Alshehri R, Herbst CH, Alhajji M, Lin TK. Behavioural economic interventions to reduce health care appointment non-attendance: a systematic review and meta-analysis. BMC Health Serv Res. 2023; 23: 1136. doi:10.1186/s12913-023-10059-9
8. Hasvold PE, Wootton R. Use of telephone and SMS reminders to improve attendance at hospital appointments: a systematic review. J Telemed Telecare. 2011; 17(7): 358-364. doi:10.1258/jtt.2011.110707
9. Polsook R, Supametaporn P, Suktrakul S, Wuttisittikulkij L. Self-management technology of medication adherence in patient chronic disease: a systematic review and meta-analysis. Worldviews Evid Based Nurs. 2026; 23(2): e70137. doi:10.1111/wvn.70137

10. Boksmati N, Butler-Henderson K, Anderson K, Sahama T. The effectiveness of SMS reminders on appointment attendance: a meta-analysis. J Med Syst. 2016; 40(4): 90. doi:10.1007/s10916-016-0452-2
11. Guy R, Hocking J, Wand H, Stott S, Ali H, Kaldor J. How effective are short message service reminders at increasing clinic attendance? A meta-analysis and systematic review. Health Serv Res. 2012; 47(2): 614-632. doi:10.1111/j.1475-6773.2011.01342.x
12. Kanfer FH, Gaelick-Buys L. Self-management methods. In: Kanfer FH, Goldstein AP, editors. Helping people change: a textbook of methods. 4th ed. New York: Pergamon Press; 1991. p.305-360.

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาและประเมินผลแนวปฏิบัติการพยาบาลสำหรับผู้ป่วยที่ได้รับออกซิเจนอัตราการไหลสูงในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย โรงพยาบาลกุมภวาปี

Development and Evaluation of a Clinical Nursing Practice Guideline for Patients Receiving High-Flow Nasal Cannula Oxygen Therapy in the Male Medical Ward of Kumphawapi Hospital

วิภารัตน์ สามหมอ[1] และ เบญจวรรณ กิจควรดี[2*]
Wiparat Sammo[1] and Benjawan Kitkhuandee[2*]
[1]โรงพยาบาลกุมภวาปี อำเภอกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี
[2]วิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี อุดรธานี คณะพยาบาลศาสตร์ สถาบันพระบรมราชชนก
[1]Kumphawapi Hospital, Kumphawapi District, Udon Thani Province
[2]Boromarajonani College of Nursing, Udon Thani Faculty of nursing Praboromarajchanok institute
*Corresponding author; email: benjawan-kit@bcnu.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
12 กันยายน 2569	19 ตุลาคม 2569	19 ตุลาคม 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยและพัฒนานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวปฏิบัติการพยาบาลในการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับออกซิเจนอัตราการไหลสูงในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย และประเมินผลหลังการนำแนวปฏิบัติไปใช้ ระหว่างเดือนตุลาคม พ.ศ. 2568 ถึงมีนาคม พ.ศ. 2569 ในกลุ่มตัวอย่าง 45 ราย เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วยแนวปฏิบัติการพยาบาลที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น โดยให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน พบว่าทุกข้อคำถามมีค่าดัชนีความสอดคล้องอยู่ระหว่าง 0.67-1.00 ทำการศึกษาเป็น 3 ระยะ ได้แก่ 1) ศึกษาสถานการณ์ 2) พัฒนาแนวปฏิบัติการพยาบาลโดยใช้ DORAWS HFNC Safety Bundle และ 3) ศึกษาผลของการใช้แนวปฏิบัติการพยาบาลภายใต้กรอบ Evidence-Based Practice และ Clinical Context จากนั้นจัดกลุ่มองค์ประกอบสำคัญเป็น 6 ด้าน ได้แก่ Device Preparation, Oxygen Optimization, ROX Assessment, Airway Care, Weaning และ Safety Prevention วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา และเปรียบเทียบผลการนำแนวปฏิบัติไปใช้ด้วยสถิติ Paired t-test และ Friedman test ที่ระดับนัยสำคัญ .05

ผลการวิจัยพบว่าหลังการใช้แนวปฏิบัติ ผู้ป่วยมีค่า SpO_2 เพิ่มขึ้นจาก 88.49 ± 2.55% เป็น 96.93 ± 1.71% ($p < .001$), อัตราการหายใจลดลงจาก 27.33 ± 1.54 เป็น 19.47 ± 2.35 ครั้ง/นาที ($p < .001$) และ P/F ratio เพิ่มขึ้นจาก 229.80 ± 38.88 เป็น 403.00 ± 42.16 ($p < .001$) ค่า ROX Index เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .001$) อาการเหนื่อยและการใช้กล้ามเนื้อช่วยหายใจลดลงต่อเนื่อง พบภาวะ HFNC failure ร้อยละ 4.44 (2 ราย) ในกลุ่มผู้ป่วยหลังถอดท่อช่วยหายใจ 8 ราย ไม่พบการใส่ท่อช่วยหายใจซ้ำ ภาวะแทรกซ้อนส่วนใหญ่ไม่รุนแรง ได้แก่ การระคายเคืองจมูก (13.33%) และแผลกดทับ (8.89%) พยาบาลวิชาชีพมีความพึงพอใจต่อแนวปฏิบัติในระดับมากที่สุด (4.79, S.D.=0.41)

คำสำคัญ: แนวปฏิบัติการพยาบาล, ออกซิเจนอัตราการไหลสูงทางจมูก, ภาวะการหายใจล้มเหลวเฉียบพลัน, ดัชนี ROX

Abstract

This research and development study aimed to develop a nursing practice guideline for patients receiving high-flow nasal cannula (HFNC) oxygen therapy in the male medical ward and to evaluate the outcomes following its implementation. The study was conducted from October 2025 to March 2026 and included 45 participants. The research instrument was a researcher-developed nursing practice guideline, which was reviewed by three experts. The Index of Item-Objective Congruence (IOC) values ranged from 0.67 to 1.00. The study comprised three phases: (1) situational analysis, (2) development of the nursing practice guideline using the DORAWS HFNC Safety Bundle, and (3) evaluation of the guideline within the framework of evidence-based practice and clinical context. The guideline consisted of six components: Device Preparation, Oxygen Optimization, ROX Assessment, Airway Care, Weaning, and Safety Prevention. Data were analyzed using descriptive statistics, the paired t-test, and the Friedman test, with statistical significance set at .05.

Following implementation of the guideline, the patients' mean oxygen saturation (SpO_2) increased from 88.49 ± 2.55% to 96.93 ± 1.71% ($p < .001$), while the mean respiratory rate decreased from 27.33 ± 1.54 to 19.47 ± 2.35 breaths/minute ($p < .001$). The mean PaO_2/FiO_2 (P/F) ratio increased from 229.80 ± 38.88 to 403.00 ± 42.16 ($p < .001$). The ROX Index also increased significantly ($p < .001$). Dyspnea and the use of accessory respiratory muscles progressively decreased. HFNC failure occurred in 4.44% of patients (2 cases). Among the eight patients who received HFNC following extubation, none required reintubation. Most complications were mild, including nasal irritation (13.33%) and pressure injuries (8.89%). Registered nurses reported the highest level of satisfaction with the guideline, with a mean score of 4.79 (SD = 0.41).

Keywords: Nursing practice guideline, High-flow nasal cannula (HFNC), Acute respiratory failure, ROX index

บทนำ

โรคระบบทางเดินหายใจยังคงเป็นปัญหาสาธารณสุขที่สำคัญทั้งในระดับโลกและระดับประเทศ และเป็นสาเหตุสำคัญของการเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล โดยเฉพาะในผู้ป่วยที่มีโรคระบบทางเดินหายใจเฉียบพลันหรือมีการกำเริบของโรคเรื้อรัง สถานการณ์ดังกล่าวมีแนวโน้มทวีความสำคัญมากขึ้นจากปัจจัยเสี่ยงหลายประการ ได้แก่ การติดเชื้อแบคทีเรียและไวรัส การสูบบุหรี่ การสัมผัสสารก่อภูมิแพ้ ฝุ่นละอองและมลพิษทางอากาศ ตลอดจนโรคร่วมและการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาในผู้สูงอายุ ปัจจัยเหล่านี้สามารถส่งผลให้ประสิทธิภาพการระบายอากาศและการแลกเปลี่ยนก๊าซของปอดลดลง และในผู้ป่วยบางรายอาจดำเนินไปสู่ภาวะหายใจล้มเหลวเฉียบพลัน (Acute respiratory failure) ซึ่งเป็นภาวะที่ระบบหายใจไม่สามารถรักษาระดับออกซิเจนหรือกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างเพียงพอต่อความต้องการของร่างกายและเป็นภาวะวิกฤตที่ต้องได้รับการดูแลอย่างเร่งด่วน [1]

ภาวะหายใจล้มเหลวหรือผู้ป่วยที่มีภาวะพร่องออกซิเจนรุนแรง มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณชีพ หรือมีแนวโน้มเกิดการล้มเหลวของระบบหายใจ ผู้ป่วยกลุ่มนี้อาจจำเป็นต้องได้รับการสนับสนุนการหายใจตั้งแต่การให้ออกซิเจนด้วยวิธีทั่วไป การให้ออกซิเจนด้วยระบบอัตราการไหลสูง การช่วยหายใจแบบไม่รุกล้ำ จนถึงการใส่ท่อช่วยหายใจและใช้เครื่องช่วยหายใจ [2] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความรุนแรงของโรคและการตอบสนองต่อการรักษา ผู้ป่วยภาวะหายใจล้มเหลวที่ไม่ตอบสนองต่อการให้

ออกซิเจนด้วยวิธีทั่วไปมักได้รับการใส่ท่อช่วยหายใจและใช้เครื่องช่วยหายใจแบบรุกล้ำ (Invasive mechanical ventilation) เพื่อช่วยให้ผู้ป่วยได้รับออกซิเจนและมีการระบายอากาศอย่างเพียงพอ แต่การใช้เครื่องช่วยหายใจแบบรุกล้ำสัมพันธ์กับความเสี่ยงต่อภาวะแทรกซ้อนหลายประการ เช่น ปอดอักเสบจากการใช้เครื่องช่วยหายใจ (Ventilator-associated pneumonia: VAP) การบาดเจ็บของทางเดินหายใจ ภาวะแทรกซ้อนจากยาระงับประสาท การบาดเจ็บของปอดจากแรงดันหรือปริมาตรของเครื่องช่วยหายใจ รวมถึงอาจเพิ่มระยะเวลาการรักษาและระยะเวลานอนโรงพยาบาล นอกจากนี้ ผู้ป่วยบางรายที่ได้รับการถอดท่อช่วยหายใจแล้วอาจเกิดภาวะหายใจล้มเหลวซ้ำและจำเป็นต้องใส่ท่อช่วยหายใจซ้ำ (Reintubation) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับภาวะแทรกซ้อนและอัตราการเสียชีวิตที่เพิ่มขึ้น [3]

ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทางการแพทย์ทำให้มีการนำวิธีสนับสนุนการหายใจแบบไม่รุกล้ำมาใช้เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะการให้ออกซิเจนอัตราการไหลสูงผ่านทางจมูก (High-Flow Nasal Cannula: HFNC) ซึ่งเป็นระบบให้ออกซิเจนที่สามารถส่งก๊าซที่มีอัตราการไหลสูงและควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้ป่วย พร้อมทั้งมีระบบเพิ่มความชื้นและควบคุมอุณหภูมิของก๊าซก่อนเข้าสู่ทางเดินหายใจ โดยหลักฐานทางวิชาการสนับสนุนว่า HFNC สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการให้ออกซิเจน ลดอาการหอบเหนื่อยและภาระในการหายใจ [4] ตลอดจนในกลุ่มผู้ป่วยที่เหมาะสมอาจช่วยลดความจำเป็นในการใส่ท่อช่วยหายใจหรือไม่ได้เพิ่มความเสี่ยงต่อการใส่ท่อช่วยหายใจซ้ำได้ [5] จึงนับเป็นทางเลือกสำคัญของการสนับสนุนระบบหายใจที่ช่วยลดช่องว่างระหว่างการให้ออกซิเจนแบบมาตรฐานกับการช่วยหายใจที่มีระดับการรุกล้ำมากขึ้น HFNC สามารถส่งก๊าซด้วยอัตราการไหลสูงได้ถึงประมาณ 60 ลิตรต่อนาที พร้อมปรับความเข้มข้นของออกซิเจน (Fraction of inspired oxygen: FiO_2) ให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้ป่วย รวมถึงทำให้อากาศมีความอุ่นและความชื้นในระดับที่เหมาะสม [1] กลไกดังกล่าวช่วยลดการเจือจางของออกซิเจนจากอากาศภายนอก ช่วยชะล้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่องว่างตายของทางเดินหายใจส่วนต้น (Anatomical dead space washout) ลดภาระในการหายใจ (Work of breathing) และอาจก่อให้เกิดแรงดันบวกในทางเดินหายใจช่วงสิ้นสุดการหายใจออกในระดับหนึ่ง (Positive end-expiratory pressure effect: PEEP effect) ซึ่งช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนก๊าซ [6] นอกจากนี้ การให้ก๊าซที่มีความชื้นและอุณหภูมิที่เหมาะสมยังช่วยลดความแห้งและการระคายเคืองของเยื่อบุทางเดินหายใจ เพิ่มความสุขสบายของผู้ป่วย ช่วยการทำงานของระบบกำจัดเสมหะ เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ให้ออกซิเจนบางประเภท

อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จของการรักษาด้วย HFNC ไม่ได้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของอุปกรณ์เพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับกระบวนการประเมิน การเฝ้าระวัง และการดูแลผู้ป่วยอย่างเป็นระบบ การพยาบาลผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC ครอบคลุมตั้งแต่การประเมินข้อบ่งชี้และสภาพผู้ป่วยก่อนเริ่มใช้อุปกรณ์ การเตรียมผู้ป่วยและอุปกรณ์ การเลือกขนาด nasal cannula ที่เหมาะสม การดูแลตำแหน่งและความกระชับของอุปกรณ์ การติดตามอัตราการไหลและ FiO_2 ตามแผนการรักษา การประเมินระดับออกซิเจน อัตราการหายใจ ลักษณะการหายใจ สัญญาณชีพ ระดับความรู้สึกตัว ความสุขสบาย และสภาพผิวหนัง ตลอดจนการประเมินการตอบสนองภายหลังเริ่ม HFNC และการเฝ้าระวังสัญญาณของ HFNC failure เพื่อให้ผู้ป่วยได้รับการยกระดับการรักษาอย่างเหมาะสมและไม่เกิดความล่าช้าในการใส่ท่อช่วยหายใจเมื่อมีข้อบ่งชี้ [7]

การพัฒนาแนวปฏิบัติการพยาบาลทางคลินิก (Clinical Nursing Practice Guideline: CNPG) ที่อาศัยหลักฐานเชิงประจักษ์จึงเป็นกลไกสำคัญในการลดความแปรปรวนของการปฏิบัติ และช่วยให้พยาบาลสามารถตัดสินใจในการดูแลผู้ป่วยบนพื้นฐานของหลักฐานที่ดีที่สุดร่วมกับความเชี่ยวชาญทางคลินิกและบริบทของหน่วยบริการ แนวปฏิบัติที่มีองค์ประกอบครอบคลุมตั้งแต่ก่อนเริ่ม HFNC ระหว่างการรักษา การประเมินการตอบสนอง การเฝ้าระวังภาวะแทรกซ้อน การประเมินความเสี่ยงต่อความล้มเหลวของ HFNC การรายงานแพทย์หรือทีมรักษา ตลอดจนการลดระดับและหยุดการรักษา จะช่วยสร้างมาตรฐานในการปฏิบัติงานและเพิ่มความต่อเนื่องของการดูแล [8]

จากข้อมูลของหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย โรงพยาบาลกุมภวาปี ในปี พ.ศ. 2566–2568 พบผู้ป่วยที่มีภาวะหายใจล้มเหลวและต้องใส่ท่อช่วยหายใจจำนวน 77, 83 และ 95 ราย ตามลำดับ สะท้อนภาระการดูแลผู้ป่วยที่มีภาวะหายใจล้มเหลวของหน่วยงาน อย่างไรก็ตาม จำนวนผู้ป่วยที่ใส่ท่อช่วยหายใจเพียงอย่างเดียวยังไม่สามารถแสดงช่องว่างในการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับออกซิเจนอัตราการไหลสูงได้โดยตรง ผู้วิจัยจึงศึกษาสถานการณ์การดูแลผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC ก่อนพัฒนาแนวปฏิบัติการพยาบาล เพื่อระบุปัญหาด้านกระบวนการดูแลและผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้องในบริบทของหน่วยงาน

จากการทบทวนเวชระเบียนผู้ป่วยที่ได้รับออกซิเจนอัตราการไหลสูงผ่านทางจมูก (High-Flow Nasal Cannula: HFNC) ในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย โรงพยาบาลกุมภวาปี ระหว่างเดือนเมษายน พ.ศ. 2567 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2568 พบผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC จำนวน 105 ราย มีผู้ป่วยที่ต้องใส่ท่อช่วยหายใจภายหลังเริ่ม HFNC จำนวน 28 ราย คิดเป็นร้อยละ 26.67 โดยจำนวนดังกล่าวรวมผู้ป่วยที่ใส่ท่อช่วยหายใจซ้ำภายใน 48 ชั่วโมงหลังถอดท่อจำนวน 3 ราย เมื่อพิจารณาเฉพาะผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC ภายหลังถอดท่อช่วยหายใจจำนวน 25 ราย พบอัตราการใส่ท่อช่วยหายใจซ้ำร้อยละ 12.00 นอกจากนี้พบอาการและภาวะแทรกซ้อนที่บันทึกไว้ระหว่างได้รับ HFNC ได้แก่ การระคายเคืองทางเดินหายใจหรือโพรงจมูกแห้งจำนวน 14 ราย คิดเป็นร้อยละ 13.33 แผลกดทับจากอุปกรณ์บริเวณหลังใบหูและใบหน้าจำนวน 22 ราย คิดเป็นร้อยละ 20.95 เลือดกำเดาไหลจำนวน 1 ราย คิดเป็นร้อยละ 0.95 ท้องอืดจำนวน 2 ราย คิดเป็นร้อยละ 1.90 และความรู้สึกอึดอัดหรือไม่สุขสบายขณะได้รับ HFNC จำนวน 10 ราย คิดเป็นร้อยละ 9.52 โดยร้อยละของอาการและภาวะแทรกซ้อนแต่ละประเภทคำนวณจากผู้ป่วยทั้งหมด 105 ราย ผู้ป่วยมีระยะเวลานอนโรงพยาบาลอยู่ในช่วง 2–4 วัน ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนสถานการณ์และประเด็นที่ควรทบทวนในการดูแลผู้ป่วย HFNC ของหน่วยงาน แต่ยังไม่สามารถระบุได้ว่าผลลัพธ์เหล่านี้มีสาเหตุจากการปฏิบัติการพยาบาลโดยตรง

ผู้วิจัยได้สำรวจการปฏิบัติการพยาบาลระหว่างเดือนมกราคมถึงกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 โดยมีพยาบาลวิชาชีพเข้าร่วมจำนวน 13 คน ประกอบด้วยการตรวจสอบการปฏิบัติงานจริงด้านการตั้งค่าเครื่อง การเลือกอุปกรณ์ การประเมินอาการผู้ป่วย สภาพผิวหนัง ความสุขสบาย ผลลัพธ์ทางคลินิก การใช้ ROX Index และการเฝ้าระวังภาวะแทรกซ้อน ร่วมกับการประเมินความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้ HFNC ข้อบ่งชี้และข้อห้าม และการประเมินทักษะการประกอบและเชื่อมต่อเครื่องกับชุดสาย การตั้งค่าเครื่อง การเปลี่ยนสาย การจัดการสัญญาณเตือน และการแก้ไขปัญหาเบื้องต้น ผลการสำรวจพบความแตกต่างในการปฏิบัติด้านการตั้งค่าอุณหภูมิ การเลือกขนาดสายให้ออกซิเจนทางจมูก การติดตามอาการและสัญญาณชีพ การใช้ ROX Index และการดูแลความสุขสบายของผู้ป่วย ส่วนการหย่า HFNC ยังไม่มีขั้นตอนและเกณฑ์การประเมินที่ใช้เป็นมาตรฐานร่วมกันอย่างชัดเจน และการยุติ HFNC เมื่อเห็นว่าผู้ป่วยมีอาการดีขึ้นโดยไม่ได้ลดระดับการช่วยเหลือเป็นลำดับขั้น ทั้งนี้พบผู้ป่วยบางรายต้องกลับมาใช้ HFNC อีกครั้ง แต่ยังไม่มีข้อมูลเพียงพอที่จะสรุปความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างวิธีการหย่ากับการกลับมาใช้ HFNC

จากปัญหาและความสำคัญดังกล่าวผู้วิจัยจึงสนใจพัฒนาแนวปฏิบัติการพยาบาลโดยใช้หลักฐานเชิงประจักษ์ร่วมกับข้อมูลสถานการณ์ของหน่วยงาน ในการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับออกซิเจนอัตราการไหลสูง หรือ HFNC Nursing Practice Guideline (CNPG) โดยนำ DORAWS HFNC Safety Bundle ซึ่งผู้วิจัยพัฒนาจากหลักฐานเชิงประจักษ์และบริบททางคลินิกของหน่วยงาน มาใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการนำแนวปฏิบัติลงสู่การปฏิบัติจริงอย่างเป็นระบบ โดยประกอบด้วย 6 องค์ประกอบ ได้แก่ Device Preparation, Oxygen Optimization, ROX Assessment, Airway Care, Weaning และ Safety Prevention เพื่อส่งเสริมให้พยาบาลสามารถนำสาระสำคัญของแนวปฏิบัติไปใช้ได้อย่างเป็นระบบ ต่อเนื่อง และสอดคล้องกับสภาพผู้ป่วยแต่ละราย รวมทั้งส่งเสริมความมั่นใจและความพึงพอใจของพยาบาลต่อการใช้แนวปฏิบัติอันจะนำไปสู่การพัฒนาคุณภาพการพยาบาลและความปลอดภัยของผู้ป่วย [9]

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสถานการณ์ ปัญหา และรูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับการให้ออกซิเจนอัตราการไหลสูงผ่านทางจมูกในแผนกอายุรกรรมชาย
2. เพื่อพัฒนาแนวปฏิบัติการพยาบาลในการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับการให้ออกซิเจนอัตราการไหลสูงผ่านทางจมูก โดยอาศัยหลักฐานเชิงประจักษ์
3. เพื่อศึกษาผลของการใช้แนวปฏิบัติการพยาบาลต่อผลลัพธ์ทางคลินิกของผู้ป่วย ได้แก่ ค่า SpO_2, อัตราการหายใจ (RR) และ P/F ratio
4. เพื่อติดตามอัตราการใส่ท่อช่วยหายใจซ้ำ (Reintubation rate) ภายใน 48 ชั่วโมง หลังการใช้แนวปฏิบัติ
5. เพื่อศึกษาความพึงพอใจของพยาบาลต่อแนวปฏิบัติการพยาบาลที่พัฒนาขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) ร่วมกับการวิจัยกึ่งทดลอง (Quasi-Experimental Research) แบบกลุ่มเดียววัดผลก่อนและหลังการทดลอง (One-Group Pretest–Posttest Design) ดำเนินการที่หอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย โรงพยาบาลกุมภวาปี ระหว่างเดือนตุลาคม 2568 ถึงเดือนมีนาคม 2569 ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินการวิจัยอย่างเป็นระบบตามกระบวนการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) ร่วมกับแนวคิดการปฏิบัติการพยาบาลตามหลักฐานเชิงประจักษ์ (Evidence-Based Practice: EBP) โดยแบ่งการดำเนินการวิจัยออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมการวิจัย (Research Preparation)

ในระยะเตรียมการวิจัย ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาปัญหาและสถานการณ์การดูแลผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC ภายในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย โรงพยาบาลกุมภวาปี โดยสำรวจข้อมูลอัตราการเกิดภาวะหายใจล้มเหลว อัตราการใช้ HFNC และปัญหาที่พบในการดูแลผู้ป่วยที่ผ่านมา เพื่อกำหนดประเด็นปัญหาและหัวข้อวิจัยให้สอดคล้องกับบริบทของหน่วยงาน จากนั้นผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าแนวคิด ทฤษฎี เอกสารวิชาการ ตำรา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งในประเทศและต่างประเทศ รวมถึงศึกษาหลักฐานเชิงประจักษ์ (Evidence-Based Practice: EBP) ที่เกี่ยวข้องกับการดูแลผู้ป่วยภาวะพร่องออกซิเจนและภาวะหายใจล้มเหลว เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาแนวปฏิบัติการพยาบาล นำมาจัดทำโครงร่างวิจัยและเสนอต่อคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ คปสอ.กุมภวาปี เพื่อพิจารณาอนุมัติการดำเนินการวิจัย ก่อนเริ่มเก็บรวบรวมข้อมูลจริง

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ แนวปฏิบัติการพยาบาล แบบบันทึกข้อมูลผู้ป่วย แบบบันทึกผลลัพธ์ทางคลินิก และแบบสอบถามความพึงพอใจของพยาบาล พร้อมทั้งนำเครื่องมือไปตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 3–5 ท่าน และปรับปรุงแก้ไขให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้จริง

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาสถานการณ์และวิเคราะห์ปัญหา (Situation Analysis)

ผู้วิจัยดำเนินการศึกษาสถานการณ์ ในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย โดยเก็บรวบรวมข้อมูลย้อนหลังจากเวชระเบียนผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC เพื่อศึกษาลักษณะผู้ป่วย ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการรักษา ภาวะแทรกซ้อน และผลลัพธ์ทางคลินิก พร้อมกันนี้ ผู้วิจัยได้สำรวจรูปแบบการปฏิบัติการพยาบาลในปัจจุบันของพยาบาลวิชาชีพภายในหน่วยงาน ได้แก่ การตรวจสอบการปฏิบัติงานหน้างาน การประเมินความรู้เกี่ยวกับการใช้ HFNC และการประเมินทักษะโดยให้พยาบาลสาธิตการใช้อุปกรณ์และการแก้ไขปัญหาเบื้องต้น โดยมีพยาบาลเข้าร่วมจำนวน 13 คน

ขั้นตอนที่ 3 การพัฒนาแนวปฏิบัติการพยาบาล (Development of Nursing Practice Guideline)

ผู้วิจัยนำข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม หลักฐานเชิงประจักษ์ และข้อมูลจากการศึกษาสถานการณ์ปัญหามาสังเคราะห์ เพื่อพัฒนาแนวปฏิบัติการพยาบาลในการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC แนวปฏิบัติการพยาบาลที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยเนื้อหาสำคัญ ได้แก่ 1) การประเมินผู้ป่วยก่อนเริ่มใช้ HFNC 2) แนวทางการตั้งค่าอัตราการไหลของออกซิเจน (Flow rate) และความเข้มข้นของออกซิเจน (FiO_2) 3)การเฝ้าระวังอาการและสัญญาณชีพระหว่างการรักษา 4) การประเมิน ROX Index 5) เกณฑ์การรายงานแพทย์ 6)แนวทางการหย่า HFNC (Weaning HFNC) 7) การป้องกันภาวะแทรกซ้อนจากการใช้ HFNC

ภายหลังการจัดทำร่างแนวปฏิบัติ ผู้วิจัยได้นำเสนอให้ผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบความเหมาะสม ความครอบคลุม และความถูกต้องของเนื้อหา พร้อมทั้งปรับปรุงแก้ไขตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ จากนั้น ผู้วิจัยนำแนวปฏิบัติไปทดลองใช้ (Try out/Pilot study) กับผู้ป่วยที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 5–10 ราย ภายในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย โรงพยาบาลกุมภวาปี เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริง ความชัดเจนของแนวทาง และความเหมาะสมในการปฏิบัติงาน ก่อนนำไปใช้จริงในกลุ่มตัวอย่างของการวิจัย

ขั้นตอนที่ 4 การนำแนวปฏิบัติไปใช้ (Implementation)

ผู้วิจัยดำเนินการชี้แจงรายละเอียดของแนวปฏิบัติการพยาบาลแก่พยาบาลวิชาชีพในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย พร้อมทั้งจัดกิจกรรมอบรมและให้ความรู้เกี่ยวกับการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC เพื่อให้พยาบาลมีความรู้ ความเข้าใจ และสามารถปฏิบัติตามแนวทางได้อย่างถูกต้อง

หลังจากนั้น ผู้วิจัยนำแนวปฏิบัติการพยาบาลไปใช้จริงกับผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC ตามเกณฑ์ที่กำหนด โดยพยาบาลวิชาชีพดำเนินการดูแลผู้ป่วยตามแนวทางที่พัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในระหว่างดำเนินการ ผู้วิจัยติดตามกำกับการใช้แนวปฏิบัติ ให้คำแนะนำ และสนับสนุนการปฏิบัติงานของพยาบาล เพื่อให้การดำเนินงานเป็นไปตามแนวทางที่กำหนดไว้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขั้นตอนที่ 5 การประเมินผลการใช้แนวปฏิบัติ (Evaluation)

ภายหลังการนำแนวปฏิบัติไปใช้ ผู้วิจัยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลผลลัพธ์ทางคลินิกของผู้ป่วยก่อนและหลังการใช้แนวปฏิบัติ โดยประเมินตัวชี้วัดสำคัญ ได้แก่ ค่า Oxygen saturation (SpO_2) ตราการหายใจ (Respiratory rate: RR) ค่า PaO_2 และอัตราส่วน PaO_2/FiO_2 (P/F ratio) อัตราการใส่ท่อช่วยหายใจซ้ำ (Reintubation rate) ภาวะแทรกซ้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการรักษา ระยะเวลาการใช้ HFNC และระยะเวลาการนอนโรงพยาบาล นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังประเมินความพึงพอใจของพยาบาลต่อการใช้แนวปฏิบัติการพยาบาล โดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ

ข้อมูลทั้งหมดถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวมถึงสถิติเชิงอนุมาน ได้แก่ Paired t-test, Wilcoxon Signed-Rank Test และ Chi-square test ตามลักษณะของข้อมูลและตัวแปรที่ศึกษา

ขั้นตอนที่ 6 การสรุป อภิปรายผล และเผยแพร่ผลการวิจัย (Conclusion and Dissemination)

เมื่อเสร็จสิ้นการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยดำเนินการสรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการศึกษา เปรียบเทียบกับแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งสรุปข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้พัฒนาคุณภาพการพยาบาล

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1. กลุ่มผู้ป่วย: ผู้วิจัยกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างโดยใช้โปรแกรม G*Power Analysis (Faul, Erdfelder, Lang, & Buchner, 2007) [10] โดยเลือก Test family เป็น t-tests และเลือก Statistical test เป็น Means: Difference between two dependent means (matched pairs) เนื่องจากเป็นการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการใช้แนวปฏิบัติการพยาบาลในกลุ่มตัวอย่างเดียวกัน ในการคำนวณกำหนดค่าอิทธิพลขนาดกลาง (Effect size) เท่ากับ 0.50 ที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่ง Cohen (1988) กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ (Alpha) เท่ากับ .05 และกำหนดค่าอำนาจการทดสอบ (Power of test) เท่ากับ 0.80 [11] ผลการคำนวณได้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 45 คน จากนั้นทำการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างใช้วิธีการเลือกแบบเฉพาะเจาะจง (Purposive Sampling) ประชากรในการศึกษาครั้งนี้แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ 1) พยาบาลวิชาชีพที่ปฏิบัติงานในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย โรงพยาบาลกุมภวาปี และ 2) ผู้ป่วยที่ได้รับการรักษาด้วย HFNC ในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย โดยใช้วิธีเลือกแบบเจาะจง (Purposive sampling) และใช้วิธีคัดเลือกผู้ป่วยตามเกณฑ์ที่กำหนดในช่วงดำเนินการวิจัย เพื่อให้ได้กลุ่มตัวอย่างที่สอดคล้องกับบริบทและสามารถประเมินผลของการนำแนวปฏิบัติการพยาบาลไปใช้ได้อย่างเหมาะสม

มีเกณฑ์คัดอาสาสมัครออกจากโครงการ (Exclusion Criteria) ดังนี้ 1) ผู้ป่วยที่มีโรคมะเร็งปอดระยะลุกลาม หรือมีพยากรณ์โรคไม่ดีในระยะท้ายของโรค 2) ผู้ป่วยที่มีระดับความรู้สึกตัวเปลี่ยนแปลง ไม่สามารถสื่อสารหรือให้ความร่วมมือในการรักษาได้ เช่น ซึม สับสน กระสับกระส่าย หรือมีพฤติกรรมก้าวร้าว 3) ผู้ป่วยที่มีภาวะวิกฤตฉุกเฉินและจำเป็นต้องใส่ท่อช่วยหายใจทันที 4) ผู้ป่วยที่มีภาวะลมรั่วในช่องเยื่อหุ้มปอด (Pneumothorax) 5)ผู้ป่วยที่ได้รับบาดเจ็บบริเวณใบหน้า หรือมีความผิดปกติของทางเดินหายใจส่วนบนที่ไม่สามารถใช้ HFNC ได้ 6) ผู้ป่วยที่มีภาวะช่องจมูกอุดตัน (Choanal atresia) หรือมีข้อจำกัดในการใช้อุปกรณ์ HFNC 7) ผู้ป่วยที่มีคะแนน Glasgow Coma Scale (GCS) น้อยกว่า 10 คะแนน 8) ผู้ป่วยวัณโรคปอดระยะแพร่กระจาย 9) ผู้ป่วยที่มีคำสั่งไม่กู้ชีพ (Do Not Resuscitate: DNR) 10) ผู้ป่วยที่ไม่ยินยอมเข้าร่วมการวิจัย หรือขอถอนตัวออกจากโครงการระหว่างการศึกษา

2. กลุ่มพยาบาล: พยาบาลวิชาชีพที่ปฏิบัติงานในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย จำนวน 13 ราย โดยกำหนดคุณสมบัติตามเกณฑ์การคัดเข้า ดังต่อไปนี้ 1) เป็นพยาบาลวิชาชีพที่ปฏิบัติงานในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย โรงพยาบาลกุมภวาปี 2) มีส่วนเกี่ยวข้องในการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC และ 3) ยินยอมเข้าร่วมโครงการวิจัยโดยสมัครใจ และมีเกณฑ์คัดออกดังนี้ 1) พยาบาลวิชาชีพที่อยู่ระหว่างลาศึกษาต่อ ลาคลอด หรือลาปฏิบัติงานเป็นระยะเวลานานในช่วงดำเนินการวิจัย 2) พยาบาลวิชาชีพที่อยู่ระหว่างลาศึกษาต่อ ลาคลอด หรือลาปฏิบัติงานเป็นระยะเวลานานในช่วงดำเนินการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย และเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย ได้แก่ แนวปฏิบัติการพยาบาลในการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับการรักษาด้วยการให้ออกซิเจนอัตราการไหลสูงผ่านทางจมูก (HFNC) พัฒนาตามหลัก Evidence-Based Practice (EBP) ร่วมกับกระบวนการพยาบาลครอบคลุมองค์ประกอบสำคัญในการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC ดังนี้ 1) การประเมินผู้ป่วยก่อนเริ่มใช้ HFNC ได้แก่ การประเมินภาวะพร่องออกซิเจน ระดับความรุนแรงของภาวะหายใจล้มเหลว สัญญาณชีพ และข้อบ่งชี้ในการใช้ HFNC 2) แนวทางการตั้งค่าเครื่อง HFNC ได้แก่ การกำหนดอัตราการไหลของออกซิเจน (Flow rate) และความเข้มข้นของออกซิเจน (FiO_2) ให้เหมาะสมกับสภาพผู้ป่วย 3) การเฝ้าระวังและติดตามอาการ (Monitoring) ได้แก่ การติดตามค่า Oxygen saturation (SpO_2) อัตราการหายใจ (Respiratory rate: RR) ระดับความรู้สึกตัว สัญญาณชีพ และอาการแสดงของภาวะหายใจล้มเหลว 4) การประเมิน ROX Index เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการรักษาด้วย HFNC และเฝ้าระวังความเสี่ยงต่อการใส่ท่อช่วยหายใจ 5) เกณฑ์การรายงานแพทย์ เมื่อพบอาการหรือสัญญาณที่บ่งชี้ถึงความล้มเหลวของการ

รักษาด้วย HFNC 6) แนวทางการลดและหย่า HFNC (Weaning HFNC) โดยกำหนดเกณฑ์การลดอัตราการไหลและความเข้มข้นของออกซิเจนตามอาการและการตอบสนองของผู้ป่วย และ 7) แนวทางการป้องกันภาวะแทรกซ้อน ได้แก่ การป้องกันแผลกดทับบริเวณจมูก การดูแลความชื้นของทางเดินหายใจ การส่งเสริมการขับเสมหะ และการดูแลด้านความสุขสบายของผู้ป่วย [14]

2. เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่ 1 แบบบันทึกข้อมูลส่วนบุคคลของผู้ป่วย

ส่วนที่ 2 แบบบันทึกข้อมูลทางคลินิก ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลทางสรีรวิทยาและข้อมูลการรักษา

ส่วนที่ 3 แบบประเมินผลลัพธ์การรักษา ใช้ประเมินผลลัพธ์ของการใช้ HFNC

ส่วนที่ 4 แบบสอบถามความพึงพอใจของพยาบาลต่อการใช้แนวปฏิบัติการพยาบาล

การตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือ

การตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือด้านความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) โดยผู้วิจัยนำแบบสอบถามที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน เพื่อตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) และความเหมาะสมของภาษาที่ใช้ (Wording) จากนั้นผู้เชี่ยวชาญจะประเมินค่าดัชนีความสอดคล้องของข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (Item Objective Congruence; IOC) โดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน พบว่าทุกข้อคำถามมีค่าดัชนีความสอดคล้องอยู่ระหว่าง 0.67-1.00 ภายหลังการปรับปรุงแก้ไขเครื่องมือตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว ผู้วิจัยได้นำแบบสอบถามความพึงพอใจของพยาบาลต่อการใช้แนวปฏิบัติการพยาบาล ไปทดลองใช้ (Try out) กับพยาบาลวิชาชีพที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 30 คน โดยแบบสอบถามความพึงพอใจของพยาบาลต่อการใช้แนวปฏิบัติมีจำนวน 13 ข้อ เป็นมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ได้ค่าสัมประสิทธิ์ Cronbach’s alpha เท่ากับ 0.82

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลดังนี้

1. ขั้นเตรียมการเก็บรวบรวมข้อมูล

1.1 ผู้วิจัยชี้แจงวัตถุประสงค์ ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย และรายละเอียดของแนวปฏิบัติการพยาบาลแก่พยาบาลวิชาชีพในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย เพื่อสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้แนวปฏิบัติการพยาบาลในการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC

1.2 ผู้วิจัยจัดอบรมและให้ความรู้เกี่ยวกับการใช้ออกซิเจนอัตราการไหลสูง (HFNC) การประเมินผู้ป่วย การตั้งค่าเครื่อง HFNC การประเมิน ROX Index การเฝ้าระวังภาวะแทรกซ้อน และแนวทางการหย่า HFNC ให้แก่พยาบาลวิชาชีพในหน่วยงาน

1.3 ผู้วิจัยเตรียมเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ แบบบันทึกข้อมูลทั่วไปของผู้ป่วย แบบบันทึกข้อมูลทางคลินิก แบบประเมินผลลัพธ์การรักษา แบบสอบถามความพึงพอใจของพยาบาล และ แนวปฏิบัติการพยาบาลในการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC

2. ขั้นดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลก่อนใช้แนวปฏิบัติ (Pretest)

2.1 ผู้วิจัยคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างตามเกณฑ์การคัดเข้าและเกณฑ์การคัดออกที่กำหนดไว้

2.2 ผู้วิจัยอธิบายรายละเอียดของการวิจัยแก่ผู้เข้าร่วมวิจัย และให้ลงนามในเอกสารแสดงความยินยอมเข้าร่วมการวิจัย (Informed Consent Form)

2.3 ผู้วิจัยเก็บรวบรวมข้อมูลพื้นฐานของผู้ป่วย ได้แก่ อายุ การวินิจฉัยโรค สาเหตุของภาวะพร่องออกซิเจน โรคประจำตัว และข้อมูลการรักษาที่เกี่ยวข้อง

2.4 ผู้วิจัยบันทึกข้อมูลทางคลินิกของผู้ป่วยก่อนใช้แนวปฏิบัติการพยาบาล ได้แก่ ค่า Oxygen saturation (SpO_2) อัตราการหายใจ (Respiratory rate: RR) ค่า PaO_2 ค่า PaO_2/FiO_2 (P/F ratio) และ ค่าการตั้งค่า HFNC เช่น Flow rate และ FiO_2

2.5 ผู้วิจัยเก็บข้อมูลผลลัพธ์ทางคลินิกก่อนใช้แนวปฏิบัติ ได้แก่ อัตราการใส่ท่อช่วยหายใจซ้ำ ภาวะแทรกซ้อน และระยะเวลาการนอนโรงพยาบาล

3. ขั้นดำเนินการใช้แนวปฏิบัติการพยาบาล

3.1 พยาบาลวิชาชีพในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชายดำเนินการดูแลผู้ป่วยตามแนวปฏิบัติการพยาบาล ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น

3.2 ผู้วิจัยติดตามการใช้แนวปฏิบัติอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งให้คำแนะนำและสนับสนุนการปฏิบัติงานแก่พยาบาลวิชาชีพ เพื่อให้การดูแลผู้ป่วยเป็นไปในแนวทางเดียวกัน

3.3 ระหว่างการใช้ HFNC ผู้วิจัยและพยาบาลผู้ดูแลทำการประเมินอาการผู้ป่วยอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ การประเมินสัญญาณชีพ ภาวะพร่องออกซิเจนของผู้ป่วย การประเมิน ROX Index และการเฝ้าระวังภาวะแทรกซ้อนที่อาจเกิดขึ้น

4. ขั้นเก็บรวบรวมข้อมูลหลังใช้แนวปฏิบัติ (Posttest)

4.1 ภายหลังการใช้แนวปฏิบัติ ผู้วิจัยเก็บรวบรวมข้อมูลทางคลินิกของผู้ป่วย ได้แก่ ค่า Oxygen saturation (SpO_2) อัตราการหายใจ (Respiratory rate: RR) ค่า PaO_2 ค่า PaO_2/FiO_2 (P/F ratio) อัตราการใส่ท่อช่วยหายใจซ้ำ (Reintubation rate) ภายใน 48 ชั่วโมง ภาวะแทรกซ้อนจากการรักษา ระยะเวลาการใช้ HFNC และระยะเวลาการนอนโรงพยาบาล

4.2 ผู้วิจัยประเมินผลสำเร็จและความล้มเหลวของการใช้ HFNC โดยพิจารณาจากการตอบสนองต่อการรักษาและการใส่ท่อช่วยหายใจซ้ำ

4.3 ผู้วิจัยเก็บข้อมูลความพึงพอใจของพยาบาลต่อการใช้แนวปฏิบัติการพยาบาล โดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ภายหลังสิ้นสุดการใช้แนวปฏิบัติ

5. การตรวจสอบความสมบูรณ์ของข้อมูล

ภายหลังการเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยตรวจสอบความครบถ้วนและความถูกต้องของข้อมูลทุกฉบับ ก่อนนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติ โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกเก็บรักษาเป็นความลับ และนำเสนอผลการวิจัยในภาพรวมเท่านั้น โดยไม่มีการเปิดเผยข้อมูลส่วนบุคคลของผู้เข้าร่วมวิจัยแต่อย่างใด

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. ข้อมูลทั่วไป ตัวแปรทางคลินิก ภาวะแทรกซ้อน และความพึงพอใจ วิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ จำนวน ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2. เปรียบเทียบผลลัพธ์ทางคลินิก (SpO_2, RR, P/F ratio) ก่อนและหลังการใช้แนวปฏิบัติ ใช้สถิติ Paired t-test
3. การวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ ROX Index และอาการทางคลินิกตามช่วงเวลา (1, 2, 6, 12, 24 ชั่วโมง) ใช้สถิติ Friedman test

การพิทักษ์สิทธิ์กลุ่มตัวอย่าง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตระหนักถึงหลักความปลอดภัย การยอมรับในความเป็นบุคคลของผู้ให้ข้อมูล เพื่อขออนุญาตในการเก็บข้อมูลผู้วิจัยได้อธิบายถึง วัตถุประสงค์ของการศึกษาและขอความยินยอมจากกลุ่มตัวอย่างเป็นลายลักษณ์อักษรผ่านแบบฟอร์มให้ความยินยอม (Informed consent form) และกลุ่มตัวอย่างสามารถแจ้งยุติก่อนสิ้นสุดการศึกษาได้ตลอดเวลาและข้อมูลทุกอย่างจะถูกปิดเป็นความลับ ผลการวิจัยจะถูกนำเสนอในภาพรวมเพื่อใช้ประโยชน์สำหรับการศึกษา หากมีข้อสงสัยสามารถติดต่อผู้วิจัยได้ตลอดเวลา ทั้งนี้ได้เสนอขอรับรองจริยธรรมโครงการวิจัยจากโรงพยาบาลกุมภวาปี เลขที่ KPEC26/2568 ลงวันที่ 2 พฤษภาคม 2568

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างผู้ป่วยเป็นเพศชาย 45 ราย อายุเฉลี่ย 54.38 ± 8.54 ปี (35–79 ปี) การวินิจฉัยหลักพบ COPD Exacerbation มากที่สุด ร้อยละ 31.11 (14 ราย) รองลงมาคือ Pneumonia ร้อยละ 26.67 (12 ราย), Pulmonary Edema ร้อยละ 17.78 (8 ราย) และ Sepsis ร้อยละ 17.78 (8 ราย) มีผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC หลังถอดท่อช่วยหายใจ 8 ราย (17.78%) ระดับความรุนแรงของภาวะหายใจล้มเหลวส่วนใหญ่เป็นระดับเล็กน้อย (60.00%) และระดับปานกลาง (35.56%) ระยะเวลาการใช้ HFNC เฉลี่ย 19.60 ± 9.79 ชั่วโมง โดยมีระยะเวลาต่ำสุด 2 ชั่วโมง และสูงสุด 48 ชั่วโมง และระยะเวลานอนโรงพยาบาลเฉลี่ย 3.89 ± 1.85 วัน

ผลการศึกษาสถานการณ์ ปัญหา และรูปแบบการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับออกซิเจนอัตราการไหลสูงผ่านทางจมูกในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย พบประเด็นสำคัญเกี่ยวกับความจำเป็นในการพัฒนาแนวปฏิบัติการพยาบาลให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน การติดตามเฝ้าระวังอาการเปลี่ยนแปลงทางคลินิกอย่างเป็นระบบ และการประเมินการตอบสนองต่อการรักษาอย่างต่อเนื่อง ผลการศึกษาดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาแนวปฏิบัติการพยาบาลโดยประยุกต์ใช้ DORAWS HFNC Safety Bundle ภายใต้กรอบการปฏิบัติการพยาบาลโดยใช้หลักฐานเชิงประจักษ์ร่วมกับบริบทของหน่วยงาน ประกอบด้วย 6 องค์ประกอบ ได้แก่ 1) การเตรียมอุปกรณ์ (Device Preparation) 2) การปรับระดับออกซิเจนให้เหมาะสม (Oxygen Optimization) 3) การประเมิน ROX Index (ROX Assessment) 4) การดูแลทางเดินหายใจ (Airway Care) 5) การลดระดับการให้ออกซิเจน (Weaning) และ 6) การป้องกันความเสี่ยงและภาวะแทรกซ้อน (Safety Prevention)

2. ผลลัพธ์ทางคลินิกก่อนเริ่ม HFNC และ หลังสิ้นสุดการใช้ HFNC ร่วมกับการดูแลตามแนวปฏิบัติ

ภายหลังการใช้ HFNC 24 ชั่วโมง ร่วมกับการดูแลตามแนวปฏิบัติ ร่วมกับการดูแลตามแนวปฏิบัติ ผลลัพธ์ทางคลินิกของผู้ป่วยปรับตัวดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ทางคลินิกก่อนเริ่ม HFNC และ หลังสิ้นสุดการใช้ HFNC ร่วมกับการดูแลตามแนวปฏิบัติ (n = 45)

ตัวแปรทางคลินิก	ก่อนใช้ (Mean ± SD)	หลังใช้ (Mean ± SD)	ผลต่างเฉลี่ย	t	p-value
Oxygen saturation (SpO_2, %)	88.49 ± 2.55	96.93 ± 1.71	+8.73	21.11	< .001**
อัตราการหายใจ (RR, ครั้ง/นาที)	27.33 ± 1.54	19.47 ± 2.35	-7.77	-24.36	< .001**
PaO_2/FiO_2 ratio (P/F ratio)	229.80 ± 38.88	403.00 ± 42.16	+173.20	21.34	< .001**

ผลการวิเคราะห์พบว่า ภายหลังได้รับการดูแลด้วย HFNC ผู้ป่วยมีค่า SpO_2 เพิ่มขึ้นจาก 88.49 ± 2.55% เป็น 96.93 ± 1.71% โดยเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 8.44% ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t = 22.65$, $p < .001$) อัตราการหายใจลดลงจาก 27.33 ± 1.54 ครั้ง/นาที เป็น 19.47 ± 2.35 ครั้ง/นาที โดยลดลงเฉลี่ย 7.87 ครั้ง/นาที ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t = -23.22$, $p < .001$) ค่า P/F ratio เพิ่มขึ้นจาก 229.80 ± 38.88 เป็น 403.00 ± 42.16 โดยเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 173.20 คะแนน ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t = 21.34$, $p < .001$)

แสดงให้เห็นว่า HFNC ร่วมกับแนวปฏิบัติการพยาบาลช่วยเพิ่มระดับออกซิเจนในเลือด ลดอัตราการหายใจ และเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนก๊าซได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < .001$

3. ผลการติดตามการตอบสนองต่อ HFNC ตามช่วงเวลา

การประเมินผลลัพธ์ทางคลินิกภายหลังเริ่มใช้ HFNC ดำเนินการตามช่วงเวลาที่กำหนด โดยผู้วิจัยตรวจสอบความครบถ้วนของข้อมูลในแต่ละช่วงเวลาและรายงานจำนวนผู้ป่วยที่มีข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์แยกตามตัวแปร กรณีผู้ป่วยหยุดใช้ HFNC ก่อนครบ 24 ชั่วโมง จะบันทึกสาเหตุและพิจารณาข้อมูลตามสถานะการรักษาจริง ส่วนข้อมูลที่ไม่มีการบันทึกจะไม่นำมาทดแทนโดยไม่มีหลักเกณฑ์ทางสถิติที่เหมาะสม ทั้งนี้ การวิเคราะห์แต่ละช่วงเวลาจะใช้จำนวนตัวอย่างที่มีข้อมูลจริงตามที่ระบุในตารางผลการวิจัย ภายหลังการติดตามผู้ป่วยตามช่วงเวลา พบความเปลี่ยนแปลงดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางแสดงผลการติดตามผู้ป่วยระหว่างได้รับ HFNC ตามช่วงเวลา

ตัวแปร	Pre (Mean ± SD)	1 hr (Mean ± SD)	2 hr (Mean ± SD)	6 hr (Mean ± SD)	12 hr (Mean ± SD)	24 hr (Mean ± SD)
SpO_2 (%)	88.20±2.63 (n=45)	94.96±1.07 (n=45)	96.47±1.01 (n=45)	96.93±0.59 (n=44)	96.83±1.32 (n=42)	97.57±1.60 (n=21)
RR (ครั้ง/นาที)	27.24±1.55 (n=45)	25.73±1.39 (n=45)	23.87±2.43 (n=45)	21.45±1.85 (n=44)	18.81±2.54 (n=42)	19.24±1.84 (n=21)
HR (ครั้ง/นาที)	102.62±7.22 (n=45)	98.76±6.40 (n=45)	92.87±8.99 (n=45)	89.70±5.88 (n=44)	86.98±6.28 (n=42)	82.95±4.03 (n=21)
ROX Index	11.47±2.42 (n=5)	8.25±0.95 (n=45)	8.52±1.62 (n=45)	11.19±1.46 (n=44)	14.27±2.64 (n=42)	14.69±1.80 (n=421)
Dyspnea score	1.95±0.37 (n=45)	1.87±0.40 (n=45)	1.04±0.52 (n=45)	0.52±0.55 (n=44)	0.10±0.37 (n=42)	0.00±0.00 (n=21)
Accessory muscle (คะแนน)	0.98±0.15 (n=45)	0.93±0.25 (n=45)	0.11±0.32 (n=45)	0.05±0.21 (n=44)	0.02±0.15 (n=42)	0.00±0.00 (n=21)

จากตาราง การประเมินอาการเหนื่อยในแบบบันทึก HFNC Monitoring ใช้คะแนน 0–3 ได้แก่ 0 หมายถึงไม่เหนื่อย 1 หมายถึงเหนื่อยเล็กน้อย 2 หมายถึงเหนื่อยปานกลาง และ 3 หมายถึงเหนื่อยมาก ส่วนการใช้กล้ามเนื้อช่วยหายใจใช้รหัส 0 หมายถึงไม่ใช้ และ 1 หมายถึงใช้กล้ามเนื้อช่วยหายใจ ผู้ให้คะแนนเป็นพยาบาลวิชาชีพผู้ดูแลผู้ป่วยในแต่ละเวร โดยประเมินก่อนเริ่ม HFNC และหลังเริ่มที่ 1, 2, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง เฉพาะช่วงเวลาที่มีการประเมินจริง และบันทึกผลในแบบบันทึก HFNC Monitoring

n คือจำนวนผู้ป่วยที่มีค่าของตัวแปรนั้นบันทึกไว้จริง ณ เวลาประเมินค่าเฉลี่ย ข้อมูลแต่ละช่องอาจมีจำนวนผู้ป่วยแตกต่างกันระหว่างตัวแปรและช่วงเวลา ผู้ป่วยที่ยุติ HFNC ก่อนถึงเวลาประเมิน เนื่องจากหย่าได้สำเร็จ หรือจำเป็นต้องใส่ท่อช่วยหายใจ จะไม่มีค่าติดตามระหว่างใช้ HFNC ในช่วงเวลาถัดไป ไม่ได้นำค่าครั้งสุดท้ายไปแทนค่าในช่วงเวลาที่ไม่ได้ประเมิน

ผลการติดตามค่า SpO_2 พบว่า ก่อนใช้ HFNC ผู้ป่วยมีค่า SpO_2 เฉลี่ย 88.20±2.63% สะท้อนภาวะพร่องออกซิเจน หลังได้รับ HFNC ค่า SpO_2 เพิ่มขึ้นเป็น 94.96±1.07% ใน 1 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นต่อเนื่องเป็น 97.65±1.60% ที่ 24 ชั่วโมง ผลการเปรียบเทียบรายคู่พบว่า ค่า SpO_2 หลังใช้ HFNC สูงกว่าก่อนใช้ทุกช่วงเวลาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<.001$)

อัตราการหายใจลดลงจาก 27.24±1.55 ครั้ง/นาที ก่อนใช้ HFNC เป็น 25.73±1.39 ครั้ง/นาที ที่ 1 ชั่วโมง และลดลงต่อเนื่องเป็น 19.20±1.88 ครั้ง/นาที ที่ 24 ชั่วโมง ผลการเปรียบเทียบรายคู่พบว่า RR หลังใช้ HFNC ลดลงจากก่อนใช้ทุกช่วงเวลาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<.001$) แสดงถึงภาระงานของการหายใจที่ลดลง

ค่า HR ลดลงจาก 102.62±7.22 ครั้ง/นาที ก่อนใช้ HFNC เป็น 83.10±4.08 ครั้ง/นาที ที่ 24 ชั่วโมง โดยลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทุกช่วงเวลา ($p<.001$) สะท้อนว่าภาวะพร่องออกซิเจนและการทำงานชดเชยของร่างกายลดลงหลังได้รับ HFNC

ค่า ROX Index เพิ่มขึ้นจาก 8.20±0.97 ที่ 1 ชั่วโมง เป็น 11.18±1.47 ที่ 6 ชั่วโมง และ 14.53±1.84 ที่ 24 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์แนวโน้มด้วย Friedman test พบว่าค่า ROX Index เปลี่ยนแปลงดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\chi^2=64.93$, $p<.001$) แสดงว่าผู้ป่วยตอบสนองต่อ HFNC ดีขึ้นตามระยะเวลา

อาการเหนื่อยลดลงจาก 1.95±0.37 ก่อนใช้ HFNC เป็น 0.52±0.55 ที่ 6 ชั่วโมง และเป็น 0.00±0.00 ที่ 24 ชั่วโมง โดย Wilcoxon signed-rank test พบว่าอาการเหนื่อยลดลงอย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่ 2 ชั่วโมงเป็นต้นไป ($p<.001$) ส่วนการใช้กล้ามเนื้อช่วยหายใจลดลงจาก 0.98±0.15 ก่อนใช้ HFNC เป็น 0.11±0.32 ที่ 2 ชั่วโมง และเป็น 0.00±0.00 ที่ 24 ชั่วโมง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<.001$)

การติดตามผู้ป่วยตามช่วงเวลา (1, 2, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง) พบว่า ผู้ป่วยมีค่า SpO_2 และ ROX Index เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ RR, HR, การวิเคราะห์ด้วย Friedman test พบความเปลี่ยนแปลงดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\chi 2 = 64.93$, $p < .001$) อาการเหนื่อยและการใช้กล้ามเนื้อช่วยหายใจลดลงจนเป็น 0.00 ที่ 24 ชั่วโมง ($p < .001$) แสดงให้เห็นว่า HFNC ร่วมกับแนวปฏิบัติการพยาบาลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนก๊าซ ลดภาระงานของการหายใจ และทำให้ผู้ป่วยมีอาการทางคลินิกดีขึ้นภายใน 24 ชั่วโมง

4. ผลด้าน HFNC failure การใส่ท่อช่วยหายใจ และภาวะแทรกซ้อน

ผลการวิเคราะห์ภาวะแทรกซ้อนในผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC จำนวน 45 ราย พบว่า ผู้ป่วย 43 ราย (95.56%) ประสบความสำเร็จในการรักษาด้วย HFNC โดยไม่ต้องใส่ท่อช่วยหายใจ พบ HFNC failure จำนวน 2 ราย (4.44%) ซึ่งต้องใส่ท่อช่วยหายใจและส่งต่อเข้า ICU ในกลุ่มผู้ป่วยหลังถอดท่อช่วยหายใจ 8 ราย ไม่พบการใส่ท่อช่วยหายใจซ้ำ (Reintubation rate = 0.00%) พบภาวะแทรกซ้อน ได้แก่ การระคายเคืองบริเวณจมูก (Nasal irritation) 6 ราย (13.33%), แผลกดทับจากอุปกรณ์ (Pressure sore) 4 ราย (8.89%) และท้องอืด 1 ราย (2.22%) ไม่พบภาวะแทรกซ้อนรุนแรง เช่น Pneumothorax หรือ VAP สะท้อนว่า การใช้ HFNC ร่วมกับแนวปฏิบัติการพยาบาลมีความปลอดภัย และสามารถเฝ้าระวังภาวะแทรกซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. ความพึงพอใจของพยาบาลวิชาชีพ

พยาบาลวิชาชีพ 13 ราย มีความพึงพอใจต่อแนวปฏิบัติการพยาบาลโดยรวมอยู่ในระดับ มากที่สุด (Mean = 4.79 ± 0.41 จากคะแนนเต็ม 5 คิดเป็นร้อยละ 95.74) ทั้งด้านความชัดเจน ความเหมาะสม ความสะดวกในการใช้ และประโยชน์

ต่อการดูแลผู้ป่วย สะท้อนว่าแนวปฏิบัติที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ได้จริงในหน่วยงาน และช่วยส่งเสริมคุณภาพการพยาบาลผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC ได้อย่างเป็นระบบ

6. ผลการปฏิบัติตาม CNPG/DORAWS HFNC Safety Bundle

ผลการประเมินการปฏิบัติตาม DORAWS HFNC Safety Bundle ในผู้ป่วย 45 ราย ครอบคลุม 6 องค์ประกอบ รวมโอกาสที่ควรปฏิบัติทั้งหมด 270 ครั้ง พบว่าพยาบาลปฏิบัติครบ 258 ครั้ง คิดเป็นอัตราการปฏิบัติตามแนวทางโดยรวม (overall adherence) ร้อยละ 95.56 เมื่อพิจารณารายองค์ประกอบ พบว่า D–Device Preparation และ O–Oxygen Optimization มี adherence สูงสุด ร้อยละ 100.00 รองลงมา ได้แก่ A–Airway Care ร้อยละ 97.78, W–Weaning และ S–Safety Prevention ร้อยละ 93.33 และ R–ROX Assessment ร้อยละ 88.89 ตามลำดับ

องค์ประกอบที่มีการปฏิบัติไม่ครบมากที่สุดคือ R–ROX Assessment จำนวน 5 ครั้ง โดยมีข้อจำกัดจากภาระในการคำนวณและการคำนวณย้อนหลังภายหลังประเมินผู้ป่วย ทำให้ข้อมูลไม่เป็นปัจจุบันหรือเกิดการลืม ขณะที่ W–Weaning ไม่ครบ 3 ครั้ง ส่วนหนึ่งเกี่ยวข้องกับการรอคำสั่งหรือการประเมินของแพทย์ และ S–Safety Prevention ไม่ครบ 3 ครั้ง โดยพบปัญหารอยแดงหรือรอยช้ำบริเวณตำแหน่งสัมผัสอุปกรณ์ ส่วน A–Airway Care ไม่ครบ 1 ครั้ง เนื่องจากขาดการติดตามหลังให้คำแนะนำด้านการระบายเสมหะ ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนว่าแม้ DORAWS สามารถนำไปใช้ได้ในระดับสูง แต่ยังมีประเด็นที่ควรพัฒนาโดยเฉพาะระบบช่วยคำนวณ ROX Index การกำหนดเกณฑ์ weaning ที่ชัดเจน และการติดตามการป้องกัน pressure injury จากอุปกรณ์ HFNC

อภิปรายผล

การพัฒนาแนวปฏิบัติการพยาบาลในการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับออกซิเจนอัตราการไหลสูงผ่านทางจมูก (High-Flow Nasal Cannula: HFNC) ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นการประยุกต์ใช้หลักฐานเชิงประจักษ์ร่วมกับกระบวนการพยาบาลและบริบทของหอผู้ป่วยอายุรกรรมชาย โรงพยาบาลกุมภวาปี โดยกำหนดให้แนวปฏิบัติการพยาบาลเป็นกรอบหลักในการดูแลผู้ป่วย และใช้นวัตกรรม DORAWS HFNC Safety Bundle เป็นเครื่องมือสนับสนุนการนำแนวปฏิบัติไปใช้ ณ จุดดูแลผู้ป่วยอย่างเป็นระบบ ผลการศึกษาพบว่าภายหลังการนำแนวปฏิบัติไปใช้ ผู้ป่วยมีผลลัพธ์ทางคลินิกดีขึ้นอย่างชัดเจน สะท้อนให้เห็นว่า ประสิทธิผลของการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC ไม่ได้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของอุปกรณ์เพียงอย่างเดียว แต่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของกระบวนการพยาบาลตั้งแต่การประเมินสภาพผู้ป่วยก่อนเริ่ม HFNC การเตรียมและติดตั้งอุปกรณ์อย่างถูกต้อง การติดตามการตอบสนองต่อการรักษา การประเมินสัญญาณเตือนของภาวะหายใจล้มเหลว ตลอดจนการป้องกันภาวะแทรกซ้อนและการประสานทีมรักษาเมื่อผู้ป่วยมีแนวโน้มทรุดลง การกำหนดกิจกรรมเหล่านี้ให้อยู่ในแนวปฏิบัติเดียวกันช่วยลดความแตกต่างในการปฏิบัติงานระหว่างบุคลากร ทำให้พยาบาลมีกรอบในการตัดสินใจทางคลินิกที่ชัดเจน และสามารถเฝ้าระวังผู้ป่วยได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่อาจมีส่วนสนับสนุนให้เกิดผลลัพธ์ทางคลินิกที่ดีขึ้น [12]

ผลการศึกษาด้านสรีรวิทยาพบว่า ภายหลังได้รับการดูแลตามแนวปฏิบัติ ผู้ป่วยมีค่า SpO_2 และ P/F ratio เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่อัตราการหายใจลดลง สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของภาวะออกซิเจนและภาระในการหายใจไปในทิศทางที่ดีขึ้น ผลดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากกลไกทางสรีรวิทยาของ HFNC ซึ่งสามารถส่งก๊าซที่มีอัตราการไหลสูงและมีความเข้มข้นของออกซิเจนตามที่กำหนดเข้าสู่ทางเดินหายใจ ช่วยลดการเจือจางของออกซิเจนจากอากาศภายนอกและช่วยชะล้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางเดินหายใจส่วนต้นหรือลด nasopharyngeal dead space ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการระบายอากาศดีขึ้น นอกจากนี้ อัตราการไหลสูงยังสามารถสร้างแรงดันบวกในทางเดินหายใจช่วงสิ้นสุดการหายใจออกในระดับหนึ่ง (PEEP effect) ซึ่งอาจช่วยเพิ่มปริมาตรปอดช่วงสิ้นสุดการหายใจออก ส่งเสริมการเปิดของถุงลมและการ

แลกเปลี่ยนก๊าซ ตลอดจนลดภาระงานของการหายใจ (work of breathing) จึงทำให้ผู้ป่วยมีอัตราการหายใจลดลงและมีภาวะออกซิเจนดีขึ้น [6]

อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ดังกล่าวไม่ได้เกิดจากกลไกของ HFNC เพียงอย่างเดียว แต่การมีแนวปฏิบัติการพยาบาลตามหลักฐานเชิงประจักษ์ช่วยสนับสนุนให้การใช้ HFNC มีประสิทธิภาพและปลอดภัยมากขึ้น โดยเฉพาะการกำหนดให้พยาบาลประเมินอาการทางคลินิกและติดตามค่า SpO_2 อัตราการหายใจ ความต้องการออกซิเจน การตั้งค่าอัตราการไหลและ FiO_2 รวมถึงการประเมิน ROX Index อย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถติดตามแนวโน้มการตอบสนองต่อ HFNC ได้อย่างเป็นระบบ [13] นอกจากนี้ การดูแลระบบทำความชื้นและอุณหภูมิของก๊าซอย่างเหมาะสมยังช่วยลดความแห้งและการระคายเคืองของเยื่อบุทางเดินหายใจ ส่งเสริมการทำงานของ mucociliary clearance และเพิ่มความสุขสบายของผู้ป่วย การดูแลดังกล่าวจึงเป็นการผสมผสานระหว่างประสิทธิภาพทางสรีรวิทยาของ HFNC กับคุณภาพของการพยาบาล ทำให้ผู้ป่วยได้รับประโยชน์จาก HFNC อย่างเหมาะสม สอดคล้องกับหลักฐานที่พบว่า การนำคู่มือหรือแนวทางการพยาบาลที่พัฒนาจากหลักฐานเชิงประจักษ์มาใช้ในผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC สามารถช่วยเพิ่มมาตรฐานการดูแล ลดความเสี่ยง สร้างความสม่ำเสมอในการปฏิบัติงาน และลดความแปรปรวนของการดูแลระหว่างผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มคุณภาพและความปลอดภัยในการดูแลผู้ป่วย [9]

ผลการศึกษาที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ อัตราความสำเร็จของการรักษาด้วย HFNC สูงถึงร้อยละ 95.56 และไม่พบการใส่ท่อช่วยหายใจซ้ำในผู้ป่วยกลุ่มหลังถอดท่อช่วยหายใจ ผลดังกล่าวสะท้อนถึงความเป็นไปได้ของการใช้ HFNC ร่วมกับระบบการติดตามและประเมินผู้ป่วยอย่างใกล้ชิด อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จของการรักษาไม่ควรพิจารณาจากการที่ผู้ป่วยไม่ต้องใส่ท่อช่วยหายใจเพียงอย่างเดียว [13] แต่ควรพิจารณาร่วมกับการตอบสนองทางคลินิก เช่น ค่า SpO_2 อัตราการหายใจ ลักษณะการหายใจ การใช้กล้ามเนื้อช่วยหายใจ ระดับความรู้สึกตัว ความต้องการ FiO_2 และแนวโน้มของ ROX Index เนื่องจากผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC ยังคงมีความเสี่ยงต่อการเกิด HFNC failure และอาจจำเป็นต้องได้รับการช่วยหายใจในระดับที่สูงขึ้นหากไม่ตอบสนองต่อการรักษา

การติดตาม ROX Index ร่วมกับ Clinical Assessment อย่างเป็นระบบตามกรอบ DORAWS จึงอาจเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สนับสนุนผลลัพธ์ดังกล่าว เนื่องจาก ROX Index เป็นเครื่องมือที่ใช้ข้อมูลด้านภาวะออกซิเจนร่วมกับอัตราการหายใจเพื่อช่วยประเมินแนวโน้มการตอบสนองต่อ HFNC การนำค่าดังกล่าวมาใช้ร่วมกับการประเมินอาการทางคลินิกอย่างต่อเนื่อง ช่วยให้พยาบาลไม่พิจารณาเพียงค่า SpO_2 ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง แต่สามารถติดตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผู้ป่วยและระบุผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงต่อความล้มเหลวของ HFNC ได้เร็วขึ้น เมื่อพบสัญญาณผิดปกติ พยาบาลสามารถรายงานแพทย์และประสานทีมรักษาเพื่อพิจารณายกระดับการช่วยหายใจได้อย่างเหมาะสม ซึ่งมีความสำคัญต่อการป้องกันภาวะ delayed intubation [9]

ประเด็นดังกล่าวมีความสำคัญทางคลินิก เนื่องจากเป้าหมายของการใช้ HFNC ไม่ใช่การหลีกเลี่ยงการใส่ท่อช่วยหายใจในผู้ป่วยทุกราย แต่คือการให้การสนับสนุนระบบหายใจอย่างเหมาะสมในผู้ป่วยที่มีข้อบ่งชี้ พร้อมกับตรวจพบผู้ป่วยที่ไม่ตอบสนองต่อ HFNC ให้เร็วที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดความล่าช้าในการใส่ท่อช่วยหายใจเมื่อมีข้อบ่งชี้ ดังนั้น การที่แนวปฏิบัติครั้งนี้กำหนดการประเมิน ROX Index ควบคู่กับ Clinical Assessment และกำหนดระบบการเฝ้าระวังอย่างต่อเนื่อง จึงเป็นกลไกด้านความปลอดภัยที่สำคัญ สอดคล้องกับหลักฐานที่รายงานว่า การนำแนวทางการดูแลผู้ป่วยที่ใช้ HFNC ไปใช้จริงร่วมกับการติดตามการตอบสนองของผู้ป่วยอย่างเป็นระบบ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการประเมินความสำเร็จของการรักษา และช่วยลดความเสี่ยงจากการใส่ท่อช่วยหายใจล่าช้า [9] ทั้งนี้ การไม่พบการใส่ท่อช่วยหายใจซ้ำในกลุ่มหลังถอดท่อช่วยหายใจในการศึกษาครั้งนี้ควรตีความด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากผลลัพธ์ดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับลักษณะและความรุนแรงของผู้ป่วย การรักษาร่วม และจำนวนผู้ป่วยในกลุ่มดังกล่าวด้วย ไม่ควรสรุปว่าเป็นผลจากแนวปฏิบัติเพียงปัจจัยเดียว

สำหรับภาวะแทรกซ้อนจากการใช้ HFNC การศึกษาครั้งนี้พบการระคายเคืองบริเวณจมูกและการเกิดแผลกดทับ แม้ภาวะแทรกซ้อนที่พบจะไม่รุนแรง แต่มีความสำคัญต่อคุณภาพการดูแล เนื่องจากผู้ป่วยบางรายจำเป็นต้องได้รับ HFNC ต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน การสัมผัสและแรงกดจาก nasal cannula บริเวณจมูก แก้ม หรือใบหู รวมทั้งความไม่เหมาะสมของขนาดอุปกรณ์ ตำแหน่งของสาย และสภาพความชื้นของเยื่อบุ อาจก่อให้เกิดความไม่สุขสบาย การระคายเคือง หรือการบาดเจ็บของผิวหนังได้ ภาวะแทรกซ้อนเหล่านี้แม้ไม่คุกคามชีวิตโดยตรง แต่สามารถส่งผลต่อความร่วมมือในการรักษาและประสบการณ์ของผู้ป่วย จึงเป็นผลลัพธ์ทางการพยาบาลที่ไม่ควรมองข้าม

ข้อค้นพบดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการเพิ่มความเข้มข้นขององค์ประกอบ Airway Care และ Safety Prevention ในนวัตกรรม DORAWS HFNC Safety Bundle โดยพยาบาลควรประเมินความเหมาะสมของขนาด nasal cannula ตรวจสอบตำแหน่งของอุปกรณ์และสายรัด ประเมินผิวหนังบริเวณที่สัมผัสอุปกรณ์อย่างสม่ำเสมอ ดูแลช่องปากและเยื่อบุจมูก ติดตามระบบทำความชื้นและอุณหภูมิ ตลอดจนประเมินความสุขสบายของผู้ป่วยเป็นระยะ การนำผลการศึกษานี้กลับไปปรับปรุงรายละเอียดของ Safety Bundle จึงเป็นกระบวนการพัฒนาคุณภาพอย่างต่อเนื่องที่สำคัญ กล่าวคือ แนวปฏิบัติไม่ได้เป็นเอกสารที่พัฒนาแล้วสิ้นสุด แต่ควรได้รับการประเมินผลและปรับปรุงจากข้อมูลที่เกิดขึ้นจริงในหน่วยงาน เพื่อให้สามารถป้องกันภาวะแทรกซ้อนได้ครอบคลุมยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ ผลการศึกษาพบว่าพยาบาลมีความพึงพอใจต่อการใช้แนวปฏิบัติในระดับมากที่สุด ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่สะท้อนถึงการยอมรับ (acceptability) และความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริง (feasibility) ของแนวปฏิบัติในบริบทของหอผู้ป่วย ความพึงพอใจดังกล่าวอาจอธิบายได้จากการที่ CNPG ช่วยกำหนดขั้นตอนการดูแลที่ชัดเจน ทำให้พยาบาลทราบว่าควรประเมิน เฝ้าระวัง และรายงานข้อมูลใดในแต่ละช่วงของการดูแล ขณะที่ DORAWS HFNC Safety Bundle ทำหน้าที่เป็นเครื่องมือช่วยเตือน ณ จุดดูแลผู้ป่วย ทำให้สามารถตรวจสอบกิจกรรมสำคัญได้ง่ายและลดภาระในการจดจำรายละเอียดทั้งหมดของแนวปฏิบัติ [12] การมีเครื่องมือที่กระชับและสามารถนำไปใช้ในงานประจำจึงอาจช่วยเพิ่มความมั่นใจในการดูแลผู้ป่วยและทำให้บุคลากรปฏิบัติงานไปในทิศทางเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม ความพึงพอใจในระดับสูงไม่ควรใช้เป็นหลักฐานเพียงอย่างเดียวในการสรุปว่าแนวปฏิบัติมีประสิทธิผล แต่ควรพิจารณาร่วมกับอัตราการปฏิบัติตามแนวทาง ผลลัพธ์ทางคลินิก และภาวะแทรกซ้อนที่เกิดขึ้น การที่การศึกษาครั้งนี้พบทั้งผลลัพธ์ทางคลินิกที่ดีขึ้น อัตราความสำเร็จของ HFNC ในระดับสูง และการยอมรับจากพยาบาล จึงสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของแนวปฏิบัติในการนำไปบูรณาการเข้าสู่งานประจำ ทั้งนี้ การนำไปใช้อย่างยั่งยืนควรมีระบบสนับสนุนเพิ่มเติม เช่น การอบรมและทบทวนสมรรถนะของพยาบาล การนิเทศติดตาม การประเมิน adherence ต่อ CNPG และ DORAWS HFNC Safety Bundle รวมถึงการทบทวนผลลัพธ์ทางคลินิกและเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์เป็นระยะ เพื่อนำข้อมูลกลับมาปรับปรุงแนวปฏิบัติอย่างต่อเนื่อง

การเปรียบเทียบผลการศึกษากับงานวิจัยที่ในด้านผลลัพธ์ทางคลินิกและบริบทการดูแลผู้ป่วย HFNC ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของ SpO_2 และ P/F ratio และการลดลงของ RR อาจสัมพันธ์กับกลไกการทำงานของ HFNC ร่วมกับกระบวนการพยาบาลที่เป็นระบบตามแนวปฏิบัติ DORAWS HFNC Safety Bundle ซึ่งครอบคลุมการเตรียมอุปกรณ์ การปรับออกซิเจน การประเมิน ROX Index และการเฝ้าระวังภาวะแทรกซ้อน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเป็นการวิจัยแบบกลุ่มเดียววัดก่อนและหลัง จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าผลลัพธ์ที่ดีขึ้นเกิดจากแนวปฏิบัติเพียงอย่างเดียว

สรุปผล

ผลการศึกษาครั้งนี้มีแนวโน้มสนับสนุนว่า การพัฒนาแนวปฏิบัติการพยาบาลในการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC โดยประยุกต์ใช้หลักฐานเชิงประจักษ์ร่วมกับกระบวนการพยาบาล และใช้ DORAWS HFNC Safety Bundle เป็นเครื่องมือสนับสนุนการปฏิบัติ ณ จุดดูแลผู้ป่วย มีส่วนช่วยทำให้กระบวนการดูแลมีความเป็นระบบและเป็นมาตรฐานมากขึ้น ผลลัพธ์ที่พบทั้งการเพิ่มขึ้นของ SpO_2 และ P/F ratio การลดลงของอัตราการหายใจ อัตราความสำเร็จของ HFNC ร้อยละ 95.56 การไม่พบการใส่ท่อช่วยหายใจซ้ำในกลุ่มหลังถอดท่อช่วยหายใจ ตลอดจนความพึงพอใจของพยาบาลในระดับมากที่สุด สะท้อนถึงศักยภาพของแนวปฏิบัติในการสนับสนุนคุณภาพและความปลอดภัยของการดูแลผู้ป่วย อย่างไรก็ตาม การพบการระคายเคืองจมูกและแผลกดทับยังเป็นข้อมูลสำคัญที่ควรนำไปใช้ปรับปรุงองค์ประกอบด้าน Airway Care และ Safety Prevention ให้มีความเข้มแข็งยิ่งขึ้น รวมถึงควรติดตามผลการนำแนวปฏิบัติไปใช้ในระยะยาว เพื่อประเมินความยั่งยืนของผลลัพธ์และสนับสนุนการขยายผลไปยังหน่วยบริการอื่นที่มีบริบทใกล้เคียงกัน

ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะจากการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ดำเนินการในหอผู้ป่วยอายุรกรรมชายของโรงพยาบาลแห่งเดียวและมีกลุ่มตัวอย่างเฉพาะบริบท จึงมีข้อจำกัดสำคัญ ได้แก่ 1) ไม่มีกลุ่มควบคุมหรือกลุ่มก่อนใช้แนวปฏิบัติ 2) ไม่สามารถแยกผลของ HFNC ออกจากผลของ CNP 3) ความแตกต่างของโรคและการรักษาร่วมอาจเป็นตัวแปรกวน 4) ผู้วิจัยและพยาบาลทราบว่ากำลังใช้แนวปฏิบัติ อาจเกิด Hawthorne effect 5) ข้อมูลที่ 24 ชั่วโมงอาจมีผู้ป่วยไม่ครบทุกคน 6) กลุ่มหลังถอดท่อช่วยหายใจมีเพียง 8 ราย จึงควรศึกษาประสิทธิผลของแนวปฏิบัติในกลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและหลากหลายบริบท รวมทั้งมีการเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม ตลอดจนติดตามผลในระยะยาว เพื่อยืนยันประสิทธิผล ความปลอดภัย และความยั่งยืนของการใช้ CNPG ร่วมกับ DORAWS HFNC Safety Bundle

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. ควรนำแนวปฏิบัติการพยาบาลในการดูแลผู้ป่วยที่ได้รับ HFNC ร่วมกับ DORAWS HFNC Safety Bundle ไปใช้เป็นมาตรฐานการดูแลในหอผู้ป่วย โดยเน้นการประเมินอาการทางคลินิก ค่า SpO_2 อัตราการหายใจ และ ROX Index เพื่อเฝ้าระวังการตอบสนองต่อการรักษาและตรวจพบ HFNC failure ได้อย่างทันท่วงที
2. ควรพัฒนาสมรรถนะพยาบาลอย่างต่อเนื่อง โดยจัดอบรมและทบทวนความรู้เกี่ยวกับการใช้ HFNC การประเมิน ROX Index การดูแลระบบความชื้น การป้องกันแผลกดทับและการระคายเคืองบริเวณจมูก รวมถึงเกณฑ์การรายงานและยกระดับการรักษาเมื่อผู้ป่วยมีอาการทรุดลง
3. ควรจัดให้มีระบบนิเทศ ติดตาม และประเมินการปฏิบัติตาม CNPG และ DORAWS HFNC Safety Bundle อย่างสม่ำเสมอ พร้อมนำข้อมูลผลลัพธ์ทางคลินิก ภาวะแทรกซ้อน และความพึงพอใจของผู้ใช้มาทบทวนเพื่อปรับปรุงแนวปฏิบัติอย่างต่อเนื่อง

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรศึกษาประสิทธิผลของ CNPG ร่วมกับ DORAWS HFNC Safety Bundle ด้วยรูปแบบการวิจัยที่มีกลุ่มเปรียบเทียบและกลุ่มตัวอย่างขนาดใหญ่ขึ้น รวมถึงศึกษาในหลายหอผู้ป่วยหรือหลายโรงพยาบาล เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความสามารถในการอ้างอิงผลไปยังบริบทอื่น

2. ควรศึกษาผลลัพธ์ในระยะยาวและผลลัพธ์เพิ่มเติม เช่น HFNC failure อัตราการใส่ท่อช่วยหายใจและการใส่ท่อซ้ำ ระยะเวลาการใช้ HFNC ระยะเวลานอนโรงพยาบาล ภาวะแทรกซ้อน ค่าใช้จ่าย และความคุ้มค่าของการนำแนวปฏิบัติไปใช้ เพื่อประเมินประสิทธิผลของแนวปฏิบัติอย่างครอบคลุม

เอกสารอ้างอิง

1. Nishimura M. High-Flow Nasal Cannula Oxygen Therapy in Adults: Physiological Benefits, Indication, Clinical Benefits, and Adverse Effects. Respir Care. 2016; 61(4): 529-541. https://doi.org/10.4187/respcare.04577
2. Piraino T, Madden M, Roberts KJ, Lamberti J, Ginier E, Strickland SL. AARC clinical practice guideline: management of adult patients with oxygen in the acute care setting. Respir Care. 2022; 67(1): 115-128. doi:10.4187/respcare.09294
3. Hernández G, Vaquero C, Colinas L, Cuena R, González P, Canabal A, Sanchez S, Rodriguez ML, Villasclaras A, Suarez D. Effect of postextubation high-flow nasal cannula vs noninvasive ventilation on reintubation and postextubation respiratory failure in high-risk patients: a randomized clinical trial. JAMA. 2016 Oct 18; 316(15): 1565-1574. https://doi.org/10.1001/jama.2016.14194
4. Rochwerg B, Granton D, Wang DX, Helviz Y, Einav S, Frat JP, Mancebo J, Mauri T, Hernandez G, Brochard L, Azoulay E, Cavalcanti AB, Ricard JD. High flow nasal cannula compared with conventional oxygen therapy for acute hypoxemic respiratory failure: a systematic review and meta-analysis. Intensive Care Med. 2019; 45(5): 563-572. doi:10.1007/s00134-019-05590-5
5. Qin J, Liao Y, Liao X, Wang G, Han D. High-flow Nasal Therapy vs Noninvasive Ventilation for Post-extubation Patients at High Risk of Reintubation: A Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. Arch Bronconeumol. 2026; 62(8): 548-556. doi:10.1016/j.arbres.2026.04.006
6. Spoletini G, Alotaibi M, Blasi F, Hill NS. Heated humidified high-flow nasal oxygen in adults: mechanisms of action and clinical implications. Chest. 2015; 148(1): 253-261. doi:10.1378/chest.14-2871
7. Tasaka S, Ohshimo S, Takeuchi M, Yasuda H, Ichikado K, Tsushima K, Egi M, Hashimoto S, Shime N, Saito O, Matsumoto S, Nango E, Okada Y, Hayashi K, Sakuraya M, Nakajima M, Okamori S, Miura S, Fukuda T, Ishihara T, Kamo T, Yatabe T, Norisue Y, Aoki Y, Iizuka Y, Kondo Y, Narita C, Kawakami D, Okano H, Takeshita J, Anan K, Okazaki SR, Taito S, Hayashi T, Mayumi T, Terayama T, Kubota Y, Abe Y, Iwasaki Y, Kishihara Y, Kataoka J, Nishimura T, Yonekura H, Ando K, Yoshida T, Masuyama T, Sanui M. ARDS Clinical Practice Guideline 2021. J Intensive Care. 2022; 10(1): 32. https://doi.org/10.1186/s40560-022-00615-6

8. ปาจรีย์ ศักดิ์วาลี้สกุล. การพัฒนาแนวปฏิบัติการพยาบาลทางคลินิกสำหรับผู้ป่วยผู้ใหญ่ที่ได้รับออกซิเจนอัตราการไหลสูง. สมุทรสงคราม: โรงพยาบาลสมเด็จพระพุทธเลิศหล้า. 2566. https://shorturl.asia/r4iw74
9. จีรนันท์ สุทธิวรานันท์, วิมลทิพย์ พวงเข้ม, สุทธิดา พงษ์พันธ์งาม.ผลของการใช้แนวปฏิบัติการพยาบาลผู้ที่ได้รับออกซิเจนอัตราการไหลสูงต่อความสำเร็จในการบำบัดและการใส่ท่อช่วยหายใจล่าช้าในผู้ป่วยอายุรกรรม.วารสารวิจัยการพยาบาลและการสาธารณสุข. 2568; 5(2). e272438. https://he02.tci-thaijo.org/index.php/jnphr/article/view/272438/187811
10. Faul F, Erdfelder E, Lang AG, Buchner A. G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. Behav Res Methods. 2007; 39(2): 175-191. https://doi.org/10.3758/bf03193146
11. Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2nd ed. Hillsdale (NJ): Lawrence Erlbaum Associates; 1988. https://doi.org/10.4324/9780203771587
12. มาลินี นักบุญ, เสริมศรี สันตติ, อรุณวรรณ พฤทธิพันธุ์. การพัฒนาและประเมินผลแนวปฏิบัติการพยาบาลทางคลินิกสำหรับการระบบออกซิเจนอัตราไหลสูงแบบประยุกต์ทางจมูกในผู้ป่วยเด็ก. วารสารการปฏิบัติการพยาบาลและการผดุงครรภ์ไทย 2563; 7(2): 25-40. https://he02.tci-thaijo.org/index.php/apnj/article/view/242984/169246
13. Zhou, X., Liu, J., Pan, J., Xu, Z., & Xu, J. The ROX index as a predictor of high-flow nasal cannula outcome in pneumonia patients with acute hypoxemic respiratory failure: A systematic review and meta-analysis. BMC Pulmonary Medicine. 2022; 22(1), 121. https://doi.org/10.1186/s12890-022-01914-2
14. Oczkowski S, Ergan B, Bos L, Chatwin M, Ferrer M, Gregoretti C, Heunks L, Frat JP, Longhini F, Nava S, Navalesi P, Ozsancak Uğurlu A, Pisani L, Renda T, Thille AW, Winck JC, Windisch W, Tonia T, Boyd J, Sotgiu G, Scala R. ERS clinical practice guidelines: high-flow nasal cannula in acute respiratory failure. Eur Respir J. 2022; 59(4): 2101574. doi:10.1183/13993003.01574-2021

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนารูปแบบการดูแลผู้ป่วยนอกเพื่อสนับสนุนบริการ Tele-Urology โรงพยาบาลพยัคฆภูมิพิสัย จังหวัดมหาสารคาม

Development of an Outpatient Care Model to Support Tele-Urology Services at Phayakkhaphum Phisai Hospital, Maha Sarakham Province.

อนงค์ จันทศิลป์[1*] ชญาภา เยยโพธิ์[2] และ จิตรา สุวรรณพันธ์[3]

Anong Jantasin[1*], Chayapa Yoeipho[2] and Jitra Suwannapan[3]

[1]*พยาบาลวิชาชีพชำนาญการ*

[2]*พยาบาลวิชาชีพชำนาญการพิเศษ งานผู้ป่วยนอก โรงพยาบาลพยัคฆภูมิพิสัย จังหวัดมหาสารคาม*

[3]*นักวิชาการสาธารณสุขชำนาญการ งานแผนยุทธศาสตร์ โรงพยาบาลพยัคฆภูมิพิสัย จังหวัดมหาสารคาม*

[1]*Professional Nurse*

[2]*Senior Professional Nurse Outpatient Department, Phayakkhaphum Phisai Hospital, Maha Sarakham Province*

[3]*Public Health Technical Officer, Professional Level, Strategic Planning Unit, Phayakkhaphumphisai Hospital, Mahasarakham Province*

[*]Corresponding author; email: anongja 2513@gmail.com

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
18 กันยายน 2569	29 ตุลาคม 2569	3 พฤศจิกายน 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ พัฒนาและประเมินผลรูปแบบการดูแลผู้ป่วยนอกเพื่อสนับสนุนบริการ Tele-Urology โรงพยาบาลพยัคฆภูมิพิสัย จังหวัดมหาสารคาม เป็นการวิจัยและพัฒนาร่วมกับการวิจัยกึ่งทดลองแบบสองกลุ่มเปรียบเทียบต่างช่วงเวลา โดยใช้กลุ่มควบคุมเชิงประวัติ ดำเนินการ 4 ระยะ ระหว่างเดือนตุลาคม 2567 ถึงกรกฎาคม 2569 กลุ่มตัวอย่างเป็นผู้ป่วยอายุ 18 ปีขึ้นไปที่รับบริการคลินิก Tele-Urology และมีรหัสวินิจฉัย ICD-10 กลุ่ม N20–N23 หรือ N40 จำนวน 162 ราย แบ่งเป็นกลุ่มก่อนและหลังใช้รูปแบบ กลุ่มละ 81 ราย เครื่องมือวิจัยคือ TELE-URO Nursing Model จำนวน 7 องค์ประกอบ บูรณาการกับระบบ BMS–HOSxP Dashboard, Fund Management และ Smart COC Platform วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา การทดสอบไคสแควร์ การทดสอบทีสำหรับกลุ่มอิสระ และการถดถอยโลจิสติก

ผลการวิจัยพบว่า ภายหลังใช้รูปแบบ ความครบถ้วนของข้อมูลก่อนการปรึกษาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 65.43 เป็น 85.19 (adjusted OR = 4.03) อัตราการกลับมารับบริการซ้ำจากสาเหตุที่ป้องกันได้ภายใน 90 วันลดลงจากร้อยละ 49.38 เป็น 14.81 (adjusted OR = 0.17) และอัตราความสำเร็จของการประสานการดูแลต่อเนื่องแบบปิดวงจรเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 58.33 เป็น 87.50 (adjusted OR = 7.18) ไม่พบภาวะแทรกซ้อนรุนแรง ขณะที่ความพึงพอใจของผู้รับบริการและบุคลากรอยู่ในระดับมากที่สุด (4.65 ± 0.42 และ 4.58 ± 0.38 ตามลำดับ)

สรุป รูปแบบ TELE-URO Nursing Model ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเตรียมข้อมูล ลดการกลับมารับบริการซ้ำที่ไม่จำเป็น และส่งเสริมความต่อเนื่องของการดูแล จึงควรพิจารณาขยายผลในโรงพยาบาลชุมชนที่มีบริบทใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ : รูปแบบการดูแลผู้ป่วยนอก, การแพทย์ทางไกล, Tele-Urology, การดูแลต่อเนื่อง, ความเสมอภาค

Abstract

This study aimed to develop and evaluate an outpatient care model to support Tele-Urology services at Phayakkhaphum Phisai Hospital, Maha Sarakham Province. This research and development approach was employed a quasi-experimental design with two nonconcurrent comparison groups using a historical control. The study was conducted in four phases between October 2024 and July 2026. The sample comprised 162 patients aged 18 years or older who attended the Tele-Urology clinic and had ICD-10 diagnostic codes N20–N23 or N40. Participants were assigned to pre-implementation and post-implementation groups, with 81 patients in each group. The research instrument was the seven-component TELE-URO Nursing Model, integrated with the BMS–HOSxP Dashboard, Fund Management system, and Smart COC Platform. Data were analyzed using descriptive statistics, chi-square tests, independent-samples t-tests, and logistic regression.

Results: Following implementation of the model, the completeness rate of pre-consultation data increased from 65.43% to 85.19% (adjusted OR = 4.03). The rate of preventable repeat visits within 90 days decreased from 49.38% to 14.81% (adjusted OR = 0.17), while the success rate of closed-loop continuity-of-care coordination increased from 58.33% to 87.50% (adjusted OR = 7.18). No severe complications were reported. Patient and staff satisfaction were both rated at the highest level, with mean scores of 4.65 ± 0.42 and 4.58 ± 0.38, respectively.

Conclusion: The TELE-URO Nursing Model improved the efficiency of pre-consultation data preparation, reduced unnecessary repeat visits, and enhanced continuity of care. The model should be considered for wider implementation in community hospitals with comparable service contexts.

Keywords: outpatient care model, telemedicine, Tele-Urology, continuity of care, equity

บทนำ

องค์การอนามัยโลกให้ความสำคัญกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสุขภาพดิจิทัล (digital health interventions) เพื่อเพิ่มการเข้าถึงบริการสุขภาพ เสริมประสิทธิภาพระบบบริการ และสนับสนุนความต่อเนื่องในการดูแลผู้ป่วย โดยเน้นว่าการนำเทคโนโลยีมาใช้ให้เกิดประสิทธิผลจำเป็นต้องดำเนินควบคู่กับการออกแบบกระบวนการบริการที่เหมาะสม [1] สำหรับประเทศไทย การให้บริการการแพทย์ทางไกลมีแนวทางกำกับด้านมาตรฐานวิชาชีพ การยืนยันตัวตน การบันทึกเวชระเบียน และการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูล ตามประกาศแพทยสภาที่ 54/2563 เรื่อง แนวทางปฏิบัติการแพทย์ทางไกลหรือโทรเวช [2] ภายหลังการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 การให้บริการการแพทย์ทางไกลภายใต้ระบบหลักประกันสุขภาพของประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จของบริการมิได้ขึ้นอยู่กับความพร้อมของเทคโนโลยีเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับการออกแบบกระบวนการให้บริการและกลไกสนับสนุนที่เหมาะสม [3] โดยเฉพาะในโรงพยาบาลชุมชน ซึ่งมีข้อจำกัดด้านบุคลากรเฉพาะทาง การพัฒนาระบบการพยาบาลผู้ป่วยนอกให้สามารถสนับสนุนการคัดกรอง การเตรียมข้อมูลทางคลินิก การประสานงาน และการติดตามผลอย่างเป็นระบบ จึงเป็นองค์ประกอบสำคัญของการจัดบริการทางไกลที่มี

คุณภาพ ทั้งนี้ มีรายงานการศึกษาจากโรงพยาบาลชุมชนในประเทศไทยที่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการพัฒนารูปแบบบริการผู้ป่วยนอกร่วมกับระบบการแพทย์ทางไกลในการลดระยะเวลารอคอยและเพิ่มความพึงพอใจของผู้รับบริการ [4]

การวิจัยครั้งนี้ใช้กรอบแนวคิดความต่อเนื่องในการดูแล ซึ่งครอบคลุมความต่อเนื่องด้านข้อมูล (informational continuity) ด้านการจัดการดูแล (management continuity) และด้านความสัมพันธ์ระหว่างผู้ให้บริการกับผู้ป่วย (relational continuity) ตามแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับองค์การอนามัยโลก [5] ร่วมกับกรอบการประเมินคุณภาพบริการของ Donabedian ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้าง กระบวนการ และผลลัพธ์ (structure–process–outcome) [6] โดยประยุกต์ใช้กรอบดังกล่าวในการออกแบบรูปแบบการพยาบาลที่เชื่อมโยงระบบสารสนเทศและทรัพยากรสนับสนุนเข้ากับกระบวนการปฏิบัติการพยาบาล ตลอดจนประเมินผลด้านความครบถ้วนของข้อมูลก่อนปรึกษาแพทย์ การกลับมารับบริการซ้ำ ความต่อเนื่องในการดูแล ความเสมอภาคในการเข้าถึงบริการ และความปลอดภัยของผู้ป่วย

โรงพยาบาลพยัคฆภูมิพิสัยเป็นโรงพยาบาลชุมชนระดับ M2 ขนาด 122 เตียง ซึ่งมีข้อจำกัดด้านการเข้าถึงแพทย์เฉพาะทางระบบทางเดินปัสสาวะ ส่งผลให้ผู้ป่วยโรคต่อมลูกหมากโตและนิ่วในระบบทางเดินปัสสาวะบางส่วนจำเป็นต้องได้รับการส่งต่อไปยังโรงพยาบาลมหาสารคาม ซึ่งอยู่ห่างออกไปประมาณ 84 กิโลเมตร การเดินทางดังกล่าวก่อให้เกิดภาระด้านค่าใช้จ่าย เวลา และการสูญเสียโอกาสในการทำงานของผู้ป่วยและผู้ดูแล โดยเฉพาะผู้สูงอายุและผู้ที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ห่างไกล โรงพยาบาลจึงนำบริการ Tele-Urology มาใช้เพื่อเพิ่มโอกาสเข้าถึงบริการเฉพาะทางและลดข้อจำกัดจากการเดินทาง อย่างไรก็ตาม การประเมินสถานการณ์ก่อนดำเนินการวิจัยพบข้อจำกัดสำคัญของกระบวนการบริการ 4 ประการ ประการแรก ความไม่ครบถ้วนของข้อมูลและผลตรวจทางคลินิกก่อนปรึกษาแพทย์ ทำให้การประเมินผู้ป่วยและการกำหนดแผนการรักษาในการรับบริการแต่ละครั้งอาจไม่สมบูรณ์ โดยการประเมินผู้ป่วยโรคต่อมลูกหมากโตจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากประวัติ อาการ การตรวจร่างกาย และผลตรวจทางห้องปฏิบัติการตามข้อบ่งชี้ ขณะที่การประเมินผู้ป่วยนิ่วในระบบทางเดินปัสสาวะต้องพิจารณาภาพวินิจฉัยและการทำงานของไตร่วมด้วย [7,8] ประการที่สอง การกลับมารับบริการซ้ำจากปัญหาที่อาจป้องกันได้ เช่น การรอผลตรวจ การสื่อสารแผนการรักษาไม่ครบถ้วน และการขาดแนวทางจัดการอาการระหว่างรอรับบริการ ซึ่งสะท้อนถึงความจำเป็นในการกำหนดเกณฑ์คัดกรองและเส้นทางการดูแลที่ชัดเจนเพื่อสนับสนุนความปลอดภัยของผู้ป่วย [9] ประการที่สาม ความเหลื่อมล้ำในการเข้าถึงบริการจัดส่งยาทางไปรษณีย์ เนื่องจากข้อจำกัดของกลไกการสนับสนุนค่าจัดส่งยาตามสิทธิการรักษา ส่งผลให้ผู้ป่วยบางกลุ่มยังต้องเดินทางมารับยาด้วยตนเอง และประการที่สี่ การขาดระบบเชื่อมโยงข้อมูลการดูแลต่อเนื่องระหว่างโรงพยาบาลกับชุมชน โดยข้อมูลจากการเยี่ยมบ้านซึ่งบันทึกในเอกสารกระดาษอาจไม่ถูกส่งกลับเข้าสู่ระบบเวชระเบียนได้ทันเวลาก่อนการรับบริการครั้งถัดไป ข้อจำกัดดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงช่องว่างในการจัดระบบการพยาบาลเพื่อสนับสนุนบริการ Tele-Urology โดยเฉพาะการบูรณาการการจัดเตรียมข้อมูลทางคลินิก การประสานสิทธิและการเข้าถึงยา ตลอดจนการติดตามและเชื่อมโยงข้อมูลการดูแลระหว่างโรงพยาบาลกับชุมชนให้เป็นกระบวนการเดียวกัน แม้การแพทย์ทางไกลจะช่วยลดข้อจำกัดด้านระยะทางได้ แต่หากไม่มีระบบการพยาบาลที่กำหนดขั้นตอน ผู้รับผิดชอบ และกลไกติดตามผลอย่างชัดเจน ย่อมมีข้อจำกัดในการทำให้บริการมีความต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงพัฒนา TELE-URO Nursing Model ซึ่งเป็นรูปแบบการพยาบาลผู้ป่วยนอกเพื่อสนับสนุนบริการ Tele-Urology โดยมุ่งเชื่อมโยงกระบวนการเตรียมความพร้อมก่อนปรึกษาแพทย์ การประสานการรักษาและสิทธิประโยชน์ การติดตามผล และการดูแลต่อเนื่องในชุมชนเข้าด้วยกัน

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินผลรูปแบบดังกล่าว โดยมุ่งประเมินความครบถ้วนของข้อมูลก่อนปรึกษาแพทย์ การกลับมารับบริการซ้ำ และผลลัพธ์ด้านความต่อเนื่อง ความเสมอภาค และความปลอดภัยของการดูแล เพื่อใช้เป็นแนวทางพัฒนาระบบบริการการแพทย์ทางไกลที่เหมาะสมกับบริบทของโรงพยาบาลชุมชน

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อพัฒนารูปแบบการดูแลผู้ป่วยนอกของ TELE-URO Nursing Model
2. เพื่อประเมินผลรูปแบบการดูแลผู้ป่วยนอกของ TELE-URO Nursing Model ที่พัฒนาขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

1. รูปแบบการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) ร่วมกับการวิจัยกึ่งทดลองแบบสองกลุ่มเปรียบเทียบต่างช่วงเวลา โดยใช้กลุ่มเปรียบเทียบจากข้อมูลย้อนหลัง (historical control group) เพื่อพัฒนาและประเมินผลรูปแบบการดูแลผู้ป่วยนอกเพื่อสนับสนุนการให้บริการทางไกลด้านระบบทางเดินปัสสาวะ (TELE-URO Nursing Model) โรงพยาบาลพยัคฆภูมิพิสัย จังหวัดมหาสารคาม

การดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 4 ระยะ ได้แก่ (1) การวิเคราะห์สถานการณ์ ปัญหา และช่องว่างของระบบบริการเดิม (2) การพัฒนารูปแบบการพยาบาลและเครื่องมือสนับสนุน (3) การทดลองนำร่องและปรับปรุงรูปแบบ และ (4) การนำรูปแบบไปใช้จริงและประเมินผล ดำเนินการระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2567 ถึง 28 กรกฎาคม 2569

การประเมินผลใช้การเปรียบเทียบข้อมูลผู้ป่วยที่ได้รับบริการก่อนและหลังการใช้ TELE-URO Nursing Model โดยกลุ่มก่อนใช้รูปแบบเป็นข้อมูลย้อนหลังจากเวชระเบียนอิเล็กทรอนิกส์ และกลุ่มหลังใช้รูปแบบเป็นข้อมูลที่เก็บไปข้างหน้าภายใต้กระบวนการบริการที่พัฒนาขึ้น ทั้งนี้ ผู้ป่วยทั้งสองกลุ่มได้รับการดูแลตามมาตรฐานวิชาชีพและแนวทางความปลอดภัยของโรงพยาบาล

2. ประชากร และกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ศึกษา ได้แก่ ผู้ป่วยอายุ 18 ปีบริบูรณ์ขึ้นไปที่เข้ารับบริการคลินิก Tele-Urology โรงพยาบาลพยัคฆภูมิพิสัย จังหวัดมหาสารคาม โดยได้รับการวินิจฉัยโรคระบบทางเดินปัสสาวะตามรหัส ICD-10 กลุ่ม N40 ซึ่งหมายถึงภาวะต่อมลูกหมากโต และกลุ่ม N20–N23 ซึ่งเกี่ยวข้องกับนิ่วในระบบทางเดินปัสสาวะและภาวะที่สัมพันธ์กับนิ่ว หรือเป็นผู้ป่วยที่มีอาการเข้าเกณฑ์การปรึกษาแพทย์เฉพาะทางตามแนวทางของเครือข่ายบริการ

เกณฑ์คัดเข้า (Inclusion criteria) ได้แก่ (1) อายุ 18 ปีบริบูรณ์ขึ้นไป (2) ได้รับการวินิจฉัยอยู่ในกลุ่มโรคที่กำหนดหรือมีอาการเข้าเกณฑ์การปรึกษาตามแนวทางเครือข่ายบริการ (3) มีข้อมูลระบุตัวตนและเวชระเบียนอิเล็กทรอนิกส์ที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ และ (4) มีข้อมูลสำหรับประเมินผลลัพธ์ตามระยะเวลาติดตาม 90 วัน หรือมีข้อมูลสถานะการติดตามที่สามารถจำแนกได้ตามแผนการวิเคราะห์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า

เกณฑ์คัดออก (Exclusion criteria) ได้แก่ (1) ผู้ป่วยที่เข้าร่วมการทดลองนำร่องจำนวน 30 ราย (2) เวชระเบียนไม่สมบูรณ์จนไม่สามารถประเมินผลลัพธ์หลักได้ (3) มีรหัสผู้ป่วยซ้ำซ้อนซึ่งไม่สามารถตรวจสอบและรวมข้อมูลให้ถูกต้องได้ และ (4) ผู้ป่วยที่มีภาวะฉุกเฉินตั้งแต่แรกรับและได้รับการส่งต่อผ่านระบบเร่งด่วนโดยไม่ผ่านกระบวนการ Tele-Urology ตามที่กำหนด

การกำหนดเกณฑ์คัดออกกรณีข้อมูลติดตามไม่ครบจะดำเนินการโดยไม่เลือกตัดผู้ป่วยออกจากการวิเคราะห์เพียงเพราะเกิดผลลัพธ์ไม่พึงประสงค์ โดยจะบันทึกสาเหตุของข้อมูลสูญหายและรายงานจำนวนผู้ป่วยที่มีข้อมูลผลลัพธ์ในแต่ละช่วงเวลาอย่างชัดเจน

การคำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่าง

คำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่างโดยใช้สูตรเปรียบเทียบสัดส่วนของประชากรสองกลุ่มอิสระ กำหนดสัดส่วนความครบถ้วนของข้อมูลขั้นต่ำก่อนใช้รูปแบบเท่ากับ 0.65 จากผลการทดลองนำร่อง และคาดหวังสัดส่วนหลังใช้รูปแบบเท่ากับ

0.85 กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 แบบสองทาง อำนาจการทดสอบร้อยละ 80 และอัตราส่วนกลุ่มตัวอย่าง 1:1 ได้ขนาดตัวอย่างขั้นต่ำประมาณ 73 รายต่อกลุ่ม

เมื่อปรับเพิ่มเพื่อชดเชยข้อมูลสูญหายร้อยละ 10 ได้ขนาดตัวอย่างประมาณ 82 รายต่อกลุ่ม รวม 164 ราย ทั้งนี้ จำนวนสุดท้ายจะยืนยันจากสูตรหรือโปรแกรมที่ใช้คำนวณและวิธีปัดเศษที่กำหนดไว้

คัดเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (purposive sampling) ตามลำดับการเข้ารับบริการจนได้จำนวนตามเกณฑ์ที่กำหนด แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1. กลุ่มก่อนใช้รูปแบบ: ผู้ป่วยที่ได้รับบริการด้วยระบบเดิม โดยเก็บข้อมูลย้อนหลังจากเวชระเบียนอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2567 ถึง 5 สิงหาคม 2568

2. กลุ่มหลังใช้รูปแบบ: ผู้ป่วยที่ได้รับบริการภายใต้ TELE-URO Nursing Model โดยเก็บข้อมูลไปข้างหน้าระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2568 ถึง 29 เมษายน 2569 และติดตามผลลัพธ์ภายใน 90 วันหลังเข้ารับบริการตามเกณฑ์ที่กำหนด

3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย

1) เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย ได้แก่ “TELE-URO Nursing Model” ประกอบด้วย 7 องค์ประกอบหลัก ครอบคลุมกระบวนการตั้งแต่การเตรียมข้อมูลก่อนปรึกษา การประสานงานระหว่างปรึกษา การส่งต่อและติดตามหลังปรึกษา จนถึงการจัดส่งยาและติดตามอาการ โดยบูรณาการกับระบบสารสนเทศสุขภาพ 3 ระบบ ได้แก่ BMS–HOSxP Dashboard (ระบบติดตามความครบถ้วนข้อมูลแบบ visual control) BMS–HOSxP Fund Management (ระบบบริหารจัดการสิทธิและกองทุนยา) และ Smart COC Platform (ระบบส่งต่อและติดตามการดูแลต่อเนื่องแบบดิจิทัล)

2) เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่

1. แบบบันทึกข้อมูลทั่วไป ประกอบด้วย เพศ อายุ สิทธิการรักษา และกลุ่มโรคตามรหัส ICD-10

2. แบบตรวจสอบความครบถ้วนของข้อมูลขั้นต่ำก่อนปรึกษาแพทย์ เป็นรายการตรวจสอบข้อมูลที่จำเป็นตามกลุ่มโรค กำหนดผลการตรวจสอบเป็นครบถ้วนหรือไม่ครบถ้วน โดยต้องกำหนดรายการข้อมูลที่จำเป็นและเกณฑ์ตัดสินให้เป็นมาตรฐานเดียวกันทั้งสองกลุ่ม

3. แบบบันทึกการกลับมารับบริการซ้ำจากสาเหตุที่ป้องกันได้ภายใน 90 วัน ใช้บันทึกเหตุการณ์การกลับมารับบริการซ้ำ วันและสาเหตุของการกลับมารับบริการ รวมถึงผลการพิจารณาว่าเป็นเหตุการณ์ที่สามารถป้องกันได้หรือไม่ โดยกำหนดนิยามและเกณฑ์การตัดสินไว้ล่วงหน้า

4. แบบบันทึกสถานะความสำเร็จของการประสานการดูแลผ่าน Smart COC Platform ใช้บันทึกสถานะการส่งต่อ การรับทราบข้อมูล และการติดตามกลับจากหน่วยบริการที่เกี่ยวข้อง โดยกำหนดเกณฑ์ความสำเร็จของการปิดวงจรการส่งต่อให้ชัดเจน

5. แบบบันทึกสถานะการได้รับยาจัดส่งทางไปรษณีย์ ใช้บันทึกสถานะการได้รับยาตามแผนการรักษาและจำแนกตามสิทธิการรักษา 3 กลุ่ม ได้แก่ ได้รับยาหรือไม่ได้รับยา โดยกำหนดช่วงเวลาที่ใช้ตัดสินสถานะให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน

6. แบบสอบถามความพึงพอใจต่อระบบบริการ แบ่งเป็น 2 ฉบับ ได้แก่ แบบสอบถามสำหรับผู้รับบริการจำนวน 15 ข้อ และแบบสอบถามสำหรับบุคลากรจำนวน 20 ข้อ ให้คะแนนตามมาตรประมาณค่า 5 ระดับ ตั้งแต่ 5 คะแนน หมายถึง พึงพอใจมากที่สุด ถึง 1 คะแนน หมายถึง พึงพอใจน้อยที่สุด การแปลผลค่าเฉลี่ยกำหนดดังนี้

- 4.51–5.00 หมายถึง ความพึงพอใจระดับมากที่สุด
- 3.51–4.50 หมายถึง ความพึงพอใจระดับมาก
- 2.51–3.50 หมายถึง ความพึงพอใจระดับปานกลาง
- 1.51–2.50 หมายถึง ความพึงพอใจระดับน้อย
- 1.00–1.50 หมายถึง ความพึงพอใจระดับน้อยที่สุด

การประเมินความพึงพอใจของผู้รับบริการและบุคลากรจะวิเคราะห์แยกกัน เนื่องจากเป็นผู้ตอบแบบสอบถามคนละกลุ่มและใช้แบบสอบถามที่มีจำนวนข้อแตกต่างกัน

7. แบบบันทึกอุบัติการณ์ความปลอดภัยทางคลินิก ใช้บันทึกภาวะแทรกซ้อนเฉียบพลันรุนแรงและความคลาดเคลื่อนทางยา โดยระบุประเภทอุบัติการณ์ วันเวลาที่เกิด ความรุนแรง ผลกระทบต่อผู้ป่วย และการดำเนินการแก้ไขตามข้อมูลที่มีจริง

4. การตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือ

4.1 ความตรงเชิงเนื้อหา

เครื่องมือวิจัยทั้ง 7 ชุดได้รับการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน ประกอบด้วย ศัลยแพทย์ระบบทางเดินปัสสาวะ พยาบาลเวชปฏิบัติผู้ป่วยนอก และนักวิชาการคอมพิวเตอร์ ผลการประเมินที่รายงานได้ค่าดัชนีความตรงเชิงเนื้อหารายข้อ (I-CVI) อยู่ระหว่าง 0.80–1.00 และค่าเฉลี่ยดัชนีความตรงเชิงเนื้อหาทั้งฉบับ (S-CVI/Ave) เท่ากับ 0.94

4.2 ความเที่ยงระหว่างผู้ประเมิน

สำหรับเครื่องมือที่ต้องอาศัยการตัดสินของผู้ประเมิน ได้แก่ แบบบันทึกการกลับมารับบริการซ้ำจากสาเหตุที่ป้องกันได้ และแบบบันทึกอุบัติการณ์ความปลอดภัยทางคลินิก กำหนดให้ผู้ประเมิน 2 คนที่ผ่านการชี้แจงเกณฑ์และฝึกใช้เครื่องมือประเมินข้อมูลชุดเดียวกันอย่างเป็นอิสระต่อกัน

ประเมินความสอดคล้องด้วย Cohen’s kappa และกำหนดเกณฑ์ยอมรับไว้ล่วงหน้าที่ไม่น้อยกว่า 0.80 โดยรายงานค่าที่คำนวณได้จริงพร้อมช่วงความเชื่อมั่น 95% หากมีข้อมูลเพียงพอ ทั้งนี้ ต้องแยกเกณฑ์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้าออกจากผลการตรวจสอบที่เกิดขึ้นจริง

สำหรับแบบสอบถามความพึงพอใจ ควรตรวจสอบความชัดเจนของข้อคำถามและความเหมาะสมของเนื้อหา รวมถึงประเมินความสอดคล้องภายในของแบบสอบถามแต่ละฉบับด้วย Cronbach’s alpha เมื่อเหมาะสมกับลักษณะเครื่องมือและข้อมูลที่เก็บได้

5. ขั้นตอนการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ดำเนินการตามกระบวนการวิจัยและพัฒนา (R&D) แบ่งออกเป็น 4 ระยะต่อเนื่องกัน ดังนี้

ระยะที่ 1 การวิเคราะห์สถานการณ์ ผู้วิจัยทบทวนวรรณกรรม แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับบริการการแพทย์ทางไกล (Telemedicine) การพยาบาลผู้ป่วยนอก การดูแลผู้ป่วยโรคระบบทางเดินปัสสาวะ และการดูแลต่อเนื่อง ทบทวนข้อมูลย้อนหลังจากระบบ BMS–HOSxP ของผู้ป่วยอายุ 18 ปีขึ้นไปที่ได้รับการวินิจฉัยด้วยรหัส ICD-10 กลุ่ม N20–N23 (นิ่วในระบบทางเดินปัสสาวะ) และ N40 (ต่อมลูกหมากโต) วิเคราะห์กระบวนการทำงานเดิมตั้งแต่การคัดกรอง การเตรียมข้อมูลก่อนปรึกษา การปรึกษาแพทย์ผู้เชี่ยวชาญ การจัดส่งยา จนถึงการติดตามผลการดูแลต่อเนื่อง

ระยะที่ 2 การพัฒนารูปแบบ ผู้วิจัยนำผลการวิเคราะห์จากระยะที่ 1 มาสังเคราะห์ร่วมกับหลักฐานเชิงประจักษ์ เพื่อยกร่างรูปแบบการพยาบาล 7 องค์ประกอบ จัดทำคู่มือการใช้รูปแบบ แนวปฏิบัติ และเครื่องมือเก็บรวบรวมข้อมูล ให้ผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่านตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาแล้วปรับแก้ตามข้อเสนอแนะ ประชุมชี้แจงและฝึกอบรมทีมสหวิชาชีพ 15 คน เพื่อสร้างความเข้าใจตรงกันเรื่องบทบาทหน้าที่และขั้นตอนการปฏิบัติตามรูปแบบ

ระยะที่ 3 การทดลองนำร่องและปรับปรุงรูปแบบ ผู้วิจัยนำรูปแบบไปทดลองปฏิบัติจริงกับผู้ป่วยนำร่อง 30 คน ระหว่างวันที่ 13 สิงหาคม ถึงวันที่ 24 กันยายน 2568 แบ่งเป็น 2 วงรอบ PDSA

วงรอบที่ 1 ดำเนินงานวันที่ 13–27 สิงหาคม พ.ศ. 2568 กับผู้ป่วยนำร่อง 15 คนแรก **Plan:** วางแผนนำร่างรูปแบบไปทดลองใช้ในคลินิก Tele-Urology **Do:** ทีมสหวิชาชีพปฏิบัติตามรูปแบบ 7 องค์ประกอบ **Study:** พบว่าพยาบาลใช้เวลานานในการบันทึกข้อมูลและสืบค้นผลตรวจ **Act:** พัฒนาและติดตั้งหน้าจอ BMS–HOSxP Dashboard คิวกลาง แสดงสถานะความพร้อมของผู้ป่วยด้วยสัญญาณไฟสีเขียว–แดงวง

รอบที่ 2 การดำเนินงานนำร่องกับผู้ป่วย 15 คนหลัง (3–17 กันยายน 2568) และประชุมสรุปผล **Plan:** นำรูปแบบที่ปรับปรุงจากวงรอบที่ 1 ไปทดลองใช้ซ้ำ **Do:** ปฏิบัติตามรูปแบบร่วมกับ Dashboard คิวกลาง **Study:** พบว่าผู้ป่วยบางสิทธิการรักษา (ข้าราชการ/ประกันสังคม) ไม่ได้รับการชดเชยค่าส่งยาและค่าบริการทางไกล ทำให้มีงานเอกสารซ้ำซ้อน **Act:** พัฒนาระบบ BMS–HOSxP Fund Management สำหรับบริหารสิทธิการรักษา และเชื่อมโยง Smart COC Platform เพื่อส่งใบงานดิจิทัลให้พยาบาลชุมชนติดตามผู้ป่วยต่อเนื่อง

ระยะที่ 4 นำรูปแบบไปใช้จริงและประเมินผล ประกาศใช้รูปแบบฉบับสมบูรณ์ ประเมินผลของรูปแบบที่พัฒนาขึ้น โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างกลุ่มก่อนและหลังใช้รูปแบบ กลุ่มก่อนใช้รูปแบบ (Pre) เก็บข้อมูลย้อนหลังจนครบ 81 คนก่อนวันที่ 6 สิงหาคม 2568 ส่วนกลุ่มหลังใช้รูปแบบ (Post) เก็บข้อมูลไปข้างหน้าอย่างต่อเนื่องจนครบ 81 คน จากนั้นกำหนดกรอบเวลาติดตามผลลัพธ์ทางคลินิก 90 วันของผู้ป่วยรายสุดท้ายจนครบวงรอบ

6. วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินควบคู่กับกระบวนการให้บริการตามปกติของคลินิก Tele-Urology โดยใช้เกณฑ์และนิยามผลลัพธ์เดียวกันทั้งกลุ่มก่อนและหลังใช้รูปแบบ แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. ระยะก่อนปรึกษาแพทย์: บันทึกข้อมูลทั่วไปและตรวจสอบความครบถ้วนของข้อมูลขั้นต่ำก่อนปรึกษาตาม Checklist โดยบันทึกผลก่อนเริ่มการปรึกษา เพื่อประเมินผลลัพธ์หลักด้วยเกณฑ์เดียวกันทั้งสองกลุ่ม

2. ระยะระหว่างและหลังการปรึกษา: บันทึกสถานะการประสานงานและการปิดวงจรการส่งต่อผ่าน Smart COC Platform รวมถึงสถานะการได้รับยาจัดส่งตามเกณฑ์ที่กำหนด

3. ระยะติดตามผล 90 วัน: ตรวจสอบข้อมูลการกลับมารับบริการซ้ำจากเวชระเบียนอิเล็กทรอนิกส์และบันทึกอุบัติการณ์ความปลอดภัยทางคลินิก โดยใช้ช่วงเวลาติดตามเดียวกันทั้งสองกลุ่ม พร้อมบันทึกกรณีไม่สามารถติดตามได้และเหตุผลของข้อมูลที่ขาดหาย

4. ระยะประเมินความพึงพอใจ: เก็บข้อมูลจากผู้รับบริการหลังเสร็จสิ้นกระบวนการดูแล และจากบุคลากรสหวิชาชีพที่เกี่ยวข้องหลังสิ้นสุดระยะดำเนินการ โดยชี้แจงการตอบแบบสอบถามตามความสมัครใจและรักษาความลับของผู้ตอบ

ข้อมูลจากทั้งสองกลุ่มจะได้รับการตรวจสอบความถูกต้อง ความครบถ้วน และความซ้ำซ้อนก่อนวิเคราะห์ โดยใช้รหัสการศึกษาแทนข้อมูลระบุตัวตน และจัดเก็บข้อมูลตามมาตรการรักษาความมั่นคงปลอดภัยที่โรงพยาบาลกำหนด

7. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมสถิติที่เหมาะสม โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 และใช้การทดสอบแบบสองทางเมื่อเหมาะสมกับสมมติฐานการวิจัย ดังนี้

1. สถิติเชิงพรรณนา: ข้อมูลเชิงคุณภาพรายงานด้วยความถี่และร้อยละ ส่วนข้อมูลเชิงปริมาณรายงานด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเมื่อมีการแจกแจงใกล้เคียงปกติ หรือรายงานด้วยมัธยฐานและพิสัยระหว่างควอไทล์เมื่อการแจกแจงไม่เป็นปกติ

2. การเปรียบเทียบข้อมูลพื้นฐานระหว่างกลุ่ม: ใช้ Pearson’s chi-square test สำหรับตัวแปรเชิงคุณภาพเมื่อเป็นไปตามข้อกำหนดของการทดสอบ และใช้ Fisher’s exact test เมื่อจำนวนความถี่คาดหวังในบางช่องมีค่าน้อยเกินไป ส่วนตัวแปรเชิงปริมาณใช้ independent samples t-test เมื่อเป็นไปตามสมมติฐาน หรือใช้วิธีทางสถิติที่ไม่อาศัยสมมติฐานการแจกแจงปกติเมื่อเหมาะสม

3. การวิเคราะห์ผลลัพธ์หลัก: เปรียบเทียบสัดส่วนผู้ป่วยที่มีข้อมูลขั้นต่ำครบถ้วนก่อนปรึกษาระหว่างกลุ่มก่อนและหลังใช้รูปแบบ โดยรายงานจำนวนและร้อยละของแต่ละกลุ่ม ค่าความแตกต่างของสัดส่วนหรือขนาดผลที่เหมาะสม พร้อมช่วงความเชื่อมั่น 95% และค่า *p*

4. การวิเคราะห์ผลลัพธ์รอง: เปรียบเทียบสัดส่วนความสำเร็จในการปิดวงจรการส่งต่อ สถานะการได้รับยา และผลลัพธ์เชิงคุณภาพอื่นด้วยสถิติที่เหมาะสม สำหรับการกลับมารับบริการซ้ำและอุบัติการณ์ความปลอดภัย ให้รายงานจำนวนเหตุการณ์ สัดส่วนหรืออัตราตามตัวหารที่กำหนด พร้อมช่วงความเชื่อมั่นเมื่อสามารถคำนวณได้

5. การวิเคราะห์ความพึงพอใจ: รายงานคะแนนความพึงพอใจของผู้รับบริการและบุคลากรแยกจากกัน โดยนำเสนอค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือมัธยฐานและพิสัยระหว่างควอไทล์ตามลักษณะข้อมูล ทั้งนี้ การเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มจะดำเนินการเฉพาะเมื่อมีข้อมูลที่สามารถเปรียบเทียบกันได้อย่างเหมาะสม

6. การวิเคราะห์ปัจจัยที่สัมพันธ์กับผลลัพธ์: ใช้ binary logistic regression เมื่อผลลัพธ์เป็นตัวแปรทวิภาค โดยกำหนดผลลัพธ์และตัวแปรอิสระที่จะนำเข้าแบบจำลองไว้ล่วงหน้า พิจารณาตัวแปรพื้นฐานที่อาจเป็นปัจจัยกวน เช่น อายุ เพศ สิทธิการรักษา กลุ่มโรค และช่วงเวลาที่รับบริการ ตามความเหมาะสมและจำนวนเหตุการณ์ที่พบ รายงานค่า odds ratio ที่ปรับแล้ว (adjusted odds ratio) พร้อมช่วงความเชื่อมั่น 95% และค่า *p* โดยตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองและปัญหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระก่อนสรุปผล

ข้อมูลที่ขาดหายจะได้รับการตรวจสอบจำนวน รูปแบบ และสาเหตุแยกตามกลุ่ม ก่อนกำหนดวิธีจัดการให้เหมาะสม โดยไม่ถือว่าข้อมูลที่ขาดหายเท่ากับไม่มีเหตุการณ์ และจะระบุจำนวนผู้ป่วยที่นำมาวิเคราะห์จริงสำหรับผลลัพธ์แต่ละรายการ

8. การพิทักษ์สิทธิกลุ่มตัวอย่าง

การวิจัยได้รับการรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ โรงพยาบาลพยัคฆภูมิพิสัย เลขที่ 25/2567 ลงวันที่ 29 พฤศจิกายน 2567 โดยดำเนินการตามหลักจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ ปฏิญญาเฮลซิงกิ และแนวปฏิบัติการวิจัยทางคลินิกที่ดีตามขอบเขตที่เกี่ยวข้อง

ผู้เข้าร่วมในกลุ่มเก็บข้อมูลไปข้างหน้าได้รับข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ ขั้นตอน ประโยชน์ ความเสี่ยง และสิทธิในการถอนตัวจากการวิจัย พร้อมลงนามยินยอมก่อนเข้าร่วม ส่วนการใช้ข้อมูลย้อนหลังจากเวชระเบียนดำเนินการตามขอบเขตการอนุมัติหรือการยกเว้นการขอความยินยอมที่ได้รับจากคณะกรรมการจริยธรรม

การเข้าร่วมวิจัยไม่มีผลต่อสิทธิการรักษาหรือการได้รับบริการตามมาตรฐานวิชาชีพ ผู้ป่วยที่พบสัญญาณอันตรายได้รับการประเมินและส่งต่อเข้าสู่กระบวนการดูแลเร่งด่วนตามแนวทางของโรงพยาบาล

การรักษาความลับดำเนินการโดยใช้รหัสการศึกษาแทนข้อมูลระบุตัวตน จำกัดสิทธิการเข้าถึงข้อมูลเฉพาะผู้ที่ได้รับอนุญาต และนำเสนอผลการวิจัยในภาพรวม โดยกำหนดระยะเวลาเก็บรักษาและทำลายข้อมูลให้สอดคล้องกับข้อกำหนดของคณะกรรมการจริยธรรมและนโยบายของโรงพยาบาล

สำหรับการให้บริการทางไกล มีการดำเนินการตามกฎหมายและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการประกอบวิชาชีพเวชกรรม การให้บริการทางไกล และการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล รวมถึงการยืนยันตัวตน การบันทึกเวชระเบียน และการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูลตามแนวทางที่หน่วยงานกำหนด

วิเคราะห์ วิจารณ์ และปรับปรุงระเบียบวิธีวิจัย TELE-URO Nursing Model

ผลการวิจัย

การวิจัยและพัฒนารูปแบบการพยาบาลผู้ป่วยนอกเพื่อสนับสนุนบริการ Tele-Urology โรงพยาบาลพยัคฆภูมิพิสัย จังหวัดมหาสารคาม นำเสนอผลการวิจัยออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างทั้งสองกลุ่ม มีลักษณะใกล้เคียงกันทั้งด้านอายุและเพศ ด้านอายุกลุ่มก่อนใช้รูปแบบมีอายุเฉลี่ย 57.88 ปี (SD.=11.43) กลุ่มหลังใช้รูปแบบมีอายุเฉลี่ย 59.53 ปี (SD.=11.98, p=.370) ด้านเพศ พบว่าทั้งสองกลุ่มส่วนใหญ่เป็นเพศชายร้อยละ 77.8 ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางระบาดวิทยาของโรคระบบทางเดินปัสสาวะที่พบในคลินิก อย่างไรก็ตาม พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในด้านสิทธิการรักษา (p = .010) โดยกลุ่มหลังใช้รูปแบบมีผู้ใช้สิทธิหลักประกันสุขภาพแห่งชาติสูงขึ้นจากร้อยละ 30.9 เป็น 54.3 และพบความแตกต่างของการกระจายกลุ่มโรค (p = .004) โดยสัดส่วนผู้ป่วยต่อมลูกหมากโตเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 22.2 เป็น 38.3 ขณะที่ผู้ป่วยที่มีอาการปวดบิดจากนิ่วลดลงจากร้อยละ 30.9 เหลือ 9.9

ส่วนที่ 2 รูปแบบการดูแลผู้ป่วยนอกเพื่อสนับสนุนบริการ Tele-Urology (TELE-URO Nursing Model)

จากการวิเคราะห์กระบวนงานเดิมและการทดลองนำร่อง 2 วงรอบ (PDSA Cycles) ร่วมกับทีมสหวิชาชีพ 15 คน คณะผู้วิจัยได้สังเคราะห์และพัฒนารูปแบบการพยาบาลผู้ป่วยนอกเพื่อสนับสนุนบริการ Tele-Urology หรือ “TELE-URO Nursing Model” ซึ่งประกอบด้วย 7 องค์ประกอบปฏิบัติทางการพยาบาล ออกแบบตามกรอบ Donabedian [6] โดยองค์ประกอบ T และ E แรกทำหน้าที่เป็น กระบวนการต้นทาง ที่ควบคุมคุณภาพข้อมูลก่อนการปรึกษา องค์ประกอบ L, E ที่สอง และ U เป็น กระบวนการระหว่างให้บริการ ที่ประกันความปลอดภัยและความเสมอภาค ขณะที่องค์ประกอบ R และ O เป็นกระบวนการปลายทาง ที่เชื่อมโยงบริการโรงพยาบาลกับชุมชนแบบปิดวงจร จุดเด่นของรูปแบบคือการผูกทุกกิจกรรมการพยาบาลเข้ากับระบบสารสนเทศที่โรงพยาบาลมีอยู่เดิม จึงไม่ก่อให้เกิดภาระงานเอกสารซ้ำซ้อนและสามารถขยายผลได้โดยไม่ต้องลงทุนระบบใหม่ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของรูปแบบการพยาบาล TELE-URO Nursing Model

องค์ประกอบ	รายละเอียดกิจกรรม
T: Triage	- คัดกรองอาการและสัญญาณอันตรายเชิงรุกก่อนเข้าสู่กระบวนการปรึกษาทางไกล เพื่อจัดลำดับความเร่งด่วนและคัดแยกผู้ป่วยที่ต้องส่งต่อทันที
E: Examination readiness	- ตรวจสอบความครบถ้วนของชุดข้อมูลขั้นต่ำเฉพาะโรค (ผลตรวจทางห้องปฏิบัติการ ภาพถ่ายทางรังสี ประวัติการรักษา) ผ่านระบบ Dashboard ก่อนเวลานัดปรึกษา
L: Linkage	- เชื่อมประสานสิทธิการรักษา ระบบการเงิน และห้องยา ให้พร้อมรองรับการสั่งจ่ายยาและเบิกจ่ายตั้งแต่ต้นกระบวนการ
E: Encounter support	- บริบาลระหว่างการตรวจในห้องตรวจเสมือนจริง (virtual consultation room) พร้อมบันทึกข้อมูลแบบเรียลไทม์ระหว่างแพทย์ต้นทางและปลายทาง
U: Urgency management	- จัดการภาวะเร่งด่วนที่อาจเกิดระหว่างหรือหลังปรึกษา ผ่านระบบ Fast track เพื่อส่งต่อผู้ป่วยฉุกเฉินอย่างรวดเร็ว
R: Response and referral	- ทวนสอบคำสั่งการรักษาด้วยวิธี Read-back ระหว่างทีมพยาบาล และส่งต่อข้อมูลดิจิทัลไปยังหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง
O: Outcome monitoring	- ติดตามผลลัพธ์การดูแลแบบปิดวงจร (closed-loop) ผ่านการเชื่อมต่อกับพยาบาลชุมชนในพื้นที่

รูปแบบดังกล่าวถูกออกแบบให้ทำงานร่วมกับระบบดิจิทัล 3 ระบบ เพื่อเสริมประสิทธิภาพในแต่ละขั้นตอน ได้แก่

1) BMS–HOSxP Dashboard เป็นเครื่องมือควบคุมด้วยสายตา (visual control) แสดงสถานะคิวผู้ป่วยและความพร้อมของข้อมูลก่อนตรวจด้วยสัญญาณไฟเขียว–แดง ช่วยให้ทีมพยาบาลระบุและแก้ไขข้อมูลที่ขาดหายได้ทันเวลาก่อนถึงรอบปรึกษา

2) BMS–HOSxP Fund Management ระบบบริหารพอร์ตการเงินและตัดยอดคลังยาอัตโนมัติตามสิทธิการรักษาของผู้ป่วยแต่ละราย ลดความล่าช้าและความคลาดเคลื่อนในการเบิกจ่ายยา

3) Smart COC Platform (Continuity of Care) ระบบส่งใบงานดิจิทัลไปยังพยาบาลชุมชนในพื้นที่ พร้อมดึงรายงานผลการดูแล (เช่น สภาพแผลผ่าตัด หรือการดูแลสายสวนปัสสาวะ) กลับเข้าสู่เวชระเบียนอิเล็กทรอนิกส์ HOSxP โดยอัตโนมัติ ทำให้เกิดการปิดวงจรข้อมูลระหว่างโรงพยาบาลแม่ข่ายกับหน่วยบริการปฐมภูมิ

ส่วนที่ 3 ผลการประเมินรูปแบบการดูแลผู้ป่วยนอกเพื่อสนับสนุนบริการ Tele-Urology (TELE-URO Nursing Model) ก่อนและหลังการใช้รูปแบบ

ภายหลังการใช้ TELE-URO Nursing Model พบว่า ผลลัพธ์หลักดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งสามตัวตัวชี้วัดประการแรก ความครบถ้วนของชุดข้อมูลขั้นต่ำก่อนปรึกษาเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 65.43 เป็น 85.19 (p = .004) ประการที่สอง การกลับมารับบริการซ้ำจากสาเหตุที่ป้องกันได้ภายใน 90 วัน ลดลงจากร้อยละ 49.38 เหลือ 14.81, (p < .001) ประการที่สาม ความสำเร็จของการประสานการดูแลต่อเนื่องแบบปิดวงจรเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 58.33 เป็น 87.50 (p = .007) โดยตัวชี้วัดนี้คำนวณจากฐานเฉพาะผู้ป่วยที่มีข้อบ่งชี้ในการส่งต่อเพื่อดูแลต่อเนื่องในชุมชน (36 และ 32 รายตามลำดับ) ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การยกระดับความพร้อมของข้อมูลในองค์ประกอบ E ส่งผลต่อเนื่องไปยังการลดการนัดซ้ำที่ไม่จำเป็นได้จริง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลการประเมินรูปแบบการดูแลระหว่างก่อนและหลังการใช้รูปแบบ TELE-URO Nursing Model

ผลลัพธ์	กลุ่มก่อนใช้รูปแบบ (n=81) จำนวน (ร้อยละ)	กลุ่มหลังใช้รูปแบบ (n=81) จำนวน (ร้อยละ)	χ^2	*p-value*
1. ความครบถ้วนของข้อมูลจำเป็นก่อนรับคำปรึกษา				
- ข้อมูลครบถ้วน	53 (65.43)	69 (85.19)	8.50	.004*
- ข้อมูลไม่ครบถ้วน	28 (34.57)	12 (14.81)		
2. การกลับมารับบริการซ้ำจากสาเหตุที่ป้องกันได้ภายใน 90 วัน				
- มีเหตุการณ์กลับมารับบริการซ้ำ	40 (49.38)	12 (14.81)	22.20	< .001*
- ไม่เกิดเหตุการณ์กลับมารับบริการซ้ำ	41 (50.62)	69 (85.19)		
3. การประสานการดูแลผ่าน Smart COC Platform สำเร็จแบบปิดวงจร *(เฉพาะผู้ป่วยที่มีข้อบ่งชี้ทางคลินิก: ก่อน n = 36, หลัง n = 32)*				
- สำเร็จ	21 (58.33)	28 (87.50)	7.16	.007*
- ไม่สำเร็จ	15 (41.67)	4 (12.50)		

**p-value* <0.05 (Pearson chi-square test)

เมื่อวิเคราะห์ด้วยถดถอยโลจิสติกพหุคูณ (Binary logistic regression) เพื่อยืนยันผลลัพธ์การประเมิน และควบคุมตัวแปร อายุ เพศ กลุ่มโรค และสิทธิการรักษา พบว่าผู้ป่วยที่ได้รับบริการตามรูปแบบมีโอกาสที่ชุดข้อมูลขั้นต่ำจะครบถ้วนก่อนปรึกษาเป็น 4.03 เท่า ของรูปแบบเดิม (95%CI 1.72–9.44) มีโอกาสกลับมารับบริการซ้ำจากสาเหตุที่ป้องกันได้ลดลงเหลือเพียง 0.17 เท่า หรือลดความเสี่ยงลงประมาณร้อยละ 83 (95%CI 0.08–0.38) และมีโอกาสได้รับการประสานการดูแลต่อเนื่องสำเร็จแบบปิดวงจรสูงเป็น 7.18 เท่า (95%CI 2.89–17.80) ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ถดถอยโลจิสติกพหุคูณแบบทวิภาคของผลลัพธ์หลัก เมื่อควบคุมอายุ เพศ กลุ่มโรค และสิทธิการรักษา

ตัวชี้วัดผลลัพธ์	Crude OR (95%CI)	Adjusted OR (95%CI)	*p-value*
ความครบถ้วนของชุดข้อมูลขั้นต่ำก่อนปรึกษา	3.04 (1.39-6.65)	4.03 (1.72-9.44)	< .001*
การกลับมารับบริการซ้ำจากสาเหตุที่ป้องกันได้	0.18 (0.08-0.38)	0.17 (0.08-0.38)	< .001*
การประสานการดูแลต่อเนื่องสำเร็จแบบปิดวงจร	5.79 (2.53-13.25)	7.18 (2.89-17.80)	< .001*

**p-value* < .05; กลุ่มอ้างอิง (reference group) คือกลุ่มก่อนใช้รูปแบบ

สำหรับผลลัพธ์ด้านความเสมอภาคในการเข้าถึงบริการจัดส่งยาทางไปรษณีย์ในกลุ่มหลังใช้รูปแบบ (n = 81) พบว่าภาพรวมส่วนใหญ่ได้รับยาบริการจัดส่งยาทางไปรษณีย์สัดส่วนความสำเร็จ ร้อยละ 88.89 แยกตามสิทธิการรักษาดังนี้ สิทธิบัตรทอง (ร้อยละ 88.64), สิทธิข้าราชการจ่ายตรง (ร้อยละ 89.47), และสิทธิประกันสังคม/อื่นๆ (ร้อยละ 88.89) ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความเสมอภาคในการเข้าถึงยาจัดส่งทางไปรษณีย์ จำแนกตามสิทธิการรักษา (กลุ่มหลังใช้รูปแบบ)

สิทธิการรักษา	**ได้รับยาทางไปรษณีย์สำเร็จ จำนวน (ร้อยละ)**	**ไม่สำเร็จ จำนวน (ร้อยละ)**
หลักประกันสุขภาพแห่งชาติ (n=44)	39 (88.64)	5 (11.36)
สวัสดิการรักษาพยาบาลข้าราชการ (n=19)	17 (89.47)	2 (10.53)
ประกันสังคม/อื่นๆ (n=18)	16 (88.89)	2 (11.11)
รวม	**72 (88.89)**	**9 (11.11)**

ด้านความพึงพอใจ พบว่า ผู้รับบริการมีความพึงพอใจต่อระบบบริการในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$=4.65, S.D.=0.42) โดยประเด็นที่ได้คะแนนสูงสุดคือการไม่ต้องเดินทางไปโรงพยาบาลแม่ข่ายและการได้รับยาถึงบ้าน เช่นเดียวกับบุคลากรสหวิชาชีพที่มีระดับความพึงพอใจสูงขึ้นสู่ระดับมากที่สุด ($\bar{X}$=4.58, S.D.=0.38) จากการที่ขั้นตอนการทำงานมีความชัดเจนและลดการทำงานซ้ำซ้อน และด้านอุบัติการณ์ภาวะแทรกซ้อนเฉียบพลันรุนแรงและความคลาดเคลื่อนทางยา พบว่า หลังใช้รูปแบบ ไม่พบอุบัติการณ์ภาวะแทรกซ้อนเฉียบพลันรุนแรง และความคลาดเคลื่อนทางยาจากระบบการแพทย์ทางไกล ตลอดช่วงเวลาศึกษา ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความพึงพอใจของผู้รับบริการและบุคลากร และอุบัติการณ์ความปลอดภัยทางคลินิก

ตัวชี้วัด	ก่อนใช้รูปแบบ	หลังใช้รูปแบบ	ระดับ	p-value
ความพึงพอใจของผู้รับบริการ ($\bar{X}$± S.D.)	3.92 ± 0.55	4.65 ± 0.42	มากที่สุด	<.001*
ความพึงพอใจของบุคลากรสหวิชาชีพ ($\bar{X}$± S.D.)	3.78 ± 0.51	4.58 ± 0.38	มากที่สุด	<.001*

**p-value* <0.05 (Independent t-test)

สรุปและอภิปรายผล

ผลการวิจัยครั้งนี้พบว่า ภายหลังการนำรูปแบบการพัฒนาการดูแลผู้ป่วยนอกเพื่อสนับสนุนบริการทางไกลด้านระบบทางเดินปัสสาวะ (TELE-URO Nursing Model) มาใช้ ผู้ป่วยมีผลลัพธ์ด้านกระบวนการให้บริการดีขึ้นในหลายมิติ ได้แก่ ความครบถ้วนของข้อมูลก่อนรับคำปรึกษา การกลับมารับบริการซ้ำจากสาเหตุที่ป้องกันได้ และการประสานการดูแลต่อเนื่องระหว่างโรงพยาบาลกับเครือข่ายปฐมภูมิ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการศึกษานี้เป็นการเปรียบเทียบก่อนและหลังโดยใช้กลุ่มควบคุมเชิงประวัติศาสตร์ ผลการศึกษาจึงสะท้อนความสัมพันธ์ระหว่างการนำรูปแบบไปใช้กับผลลัพธ์ที่พบ แต่ยังไม่สามารถยืนยันความสัมพันธ์เชิงเหตุและผลได้อย่างสมบูรณ์

1. ด้านความครบถ้วนของข้อมูลก่อนรับคำปรึกษาทางไกล

ภายหลังการใช้ TELE-URO Nursing Model สัดส่วนความครบถ้วนของข้อมูลที่จำเป็นก่อนรับคำปรึกษาเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 85.19 และเมื่อควบคุมปัจจัยร่วม ได้แก่ อายุ เพศ กลุ่มโรค และสิทธิการรักษา ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยโลจิสติกส์พหุคูณ พบว่ากลุ่มหลังใช้รูปแบบมี odds ของการมีข้อมูลครบถ้วนเป็น 4.03 เท่าของกลุ่มก่อนใช้รูปแบบ (Adjusted OR = 4.03, 95% CI: 1.72–9.44, $p < .001$) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างการใช้รูปแบบกับความครบถ้วนของข้อมูลก่อนให้คำปรึกษา โดยช่วงความเชื่อมั่นไม่ครอบคลุมค่า 1 และค่า p มีนัยสำคัญทางสถิติ

ผลลัพธ์นี้อาจอธิบายได้จากการออกแบบกระบวนการเตรียมความพร้อมก่อนรับคำปรึกษา (Examination Readiness) ร่วมกับการใช้ BMS–HOSxP Dashboard เป็นเครื่องมือกำกับติดตามสถานะข้อมูลผ่านระบบสัญญาณสีเขียวและสีแดง ช่วยให้พยาบาลสามารถตรวจสอบข้อมูลที่จำเป็นตามข้อบ่งชี้ทางคลินิกก่อนเริ่มการปรึกษาผ่านระบบทางไกล ลดโอกาสที่ข้อมูลสำคัญจะไม่พร้อมใช้งานในเวลาที่แพทย์ต้องตัดสินใจ ทั้งนี้ ควรกำหนดชุดข้อมูลขั้นต่ำแยกตามกลุ่มโรคและแนวทางเวชปฏิบัติที่เกี่ยวข้อง โดยไม่กำหนดให้ผู้ป่วยทุกรายต้องได้รับการตรวจทุกชนิดโดยไม่มีข้อบ่งชี้

ข้อค้นพบนี้สนับสนุนแนวคิดการจัดระบบข้อมูลก่อนการให้บริการทางไกลอย่างเป็นมาตรฐาน ซึ่งมีความสำคัญต่อคุณภาพการสื่อสารระหว่างบุคลากรและการตัดสินใจทางคลินิก อย่างไรก็ตาม การเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าควรพิจารณาความแตกต่างของประชากร รูปแบบการให้บริการ และนิยามความครบถ้วนของข้อมูลร่วมด้วย เพื่อไม่ให้สรุปว่าผลลัพธ์จากบริบทอื่นสามารถนำมาอธิบายผลของการศึกษานี้ได้โดยตรง

2. ด้านการกลับมารับบริการซ้ำจากสาเหตุที่ป้องกันได้

ผลการศึกษาพบว่า อัตราการกลับมารับบริการซ้ำจากสาเหตุที่ป้องกันได้ภายใน 90 วัน ลดลงจากร้อยละ 49.38 ในกลุ่มก่อนใช้รูปแบบ เหลือร้อยละ 14.81 ในกลุ่มหลังใช้รูปแบบ เมื่อวิเคราะห์โดยควบคุมอายุ เพศ กลุ่มโรค และสิทธิการรักษา พบว่า กลุ่มหลังใช้รูปแบบมี odds ของการกลับมารับบริการซ้ำต่ำกว่ากลุ่มก่อนใช้รูปแบบ (Adjusted OR = 0.17, 95% CI: 0.08–0.38, $p < .001$)

เมื่อพิจารณาจากสัดส่วนดิบ พบว่าสัดส่วนการกลับมารับบริการซ้ำลดลง 34.57 จุดร้อยละ หรือคิดเป็นการลดลงสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 70.00 ขณะที่ค่า Adjusted OR สะท้อน odds ที่ลดลงประมาณร้อยละ 83.00 หลังควบคุมปัจจัยร่วมแล้ว ตัวเลขทั้งสองจึงควรรายงานแยกกัน เนื่องจากเป็นการวัดผลคนละประเภท

ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจสัมพันธ์กับการกำหนดบทบาทผู้รับผิดชอบคิวกลาง การเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างหน่วยบริการและการติดตามคำสั่งรักษาที่ยังไม่เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งช่วยสนับสนุนการประสานงานและลดโอกาสที่กระบวนการดูแลจะขาดช่วง อย่างไรก็ตาม การระบุว่ากลไกเหล่านี้เป็นสาเหตุโดยตรงของการลดลงยังต้องอาศัยหลักฐานเพิ่มเติม เนื่องจากอาจมีปัจจัยอื่นที่เปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงเวลาก่อนและหลังการดำเนินรูปแบบ

นอกจากนี้ ควรกำหนดนิยามการกลับมารับบริการซ้ำจากสาเหตุที่ป้องกันได้ให้ชัดเจน โดยระบุประเภทการรับบริการ สาเหตุที่เข้าเกณฑ์ วิธีพิจารณาความสามารถในการป้องกัน และแหล่งข้อมูลที่ใช้ตรวจสอบ เพื่อให้การประเมินมีความสม่ำเสมอและสามารถทำซ้ำได้

3. ด้านความต่อเนื่องของการดูแลผู้ป่วยในชุมชน

การประสานการดูแลผ่าน Smart COC Platform แบบปิดวงจรในผู้ป่วยที่มีข้อบ่งชี้ทางคลินิกเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 87.50 และมีความสัมพันธ์กับการใช้รูปแบบใหม่ โดยมีค่า Adjusted OR = 7.18 (95% CI: 2.89–17.80, $p < .001$) ผลดังกล่าวสนับสนุนความสำคัญของระบบประสานการดูแลที่กำหนดผู้รับผิดชอบ ขั้นตอนการส่งต่อข้อมูล และการติดตามผลอย่างชัดเจน

การใช้ใบงานดิจิทัลและระบบรายงานข้อมูลป้อนกลับ (Feedback Loop) อาจช่วยให้พยาบาลในชุมชนสามารถดำเนินการดูแลต่อเนื่องตามแผน เช่น การดูแลแผลศัลยกรรม การเปลี่ยนสายสวนปัสสาวะ และการติดตามอาการ โดยลดความจำเป็นในการเดินทางมายังโรงพยาบาลเมื่อสามารถให้บริการในพื้นที่ได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัย

อย่างไรก็ตาม ควรรายงานจำนวนผู้ป่วยที่เข้าเกณฑ์การประสานดูแล จำนวนผู้ป่วยที่ได้รับการติดตามจริง และองค์ประกอบที่ใช้ตัดสินว่าการประสานงานเสร็จสมบูรณ์ เพื่อให้สามารถประเมินความครอบคลุมของระบบได้อย่างถูกต้อง สำหรับการไม่พบภาวะแทรกซ้อนเฉียบพลันและความคลาดเคลื่อนทางยา ควรระบุว่าเป็นผลจากการเฝ้าระวังในกลุ่มตัวอย่างและช่วงเวลาที่ศึกษา ไม่ควรตีความว่ารูปแบบสามารถกำจัดความเสี่ยงดังกล่าวได้ทั้งหมด

4. ด้านความเสมอภาคในการเข้าถึงบริการและการจัดส่งยา

ผลการศึกษาพบว่า สัดส่วนการได้รับยาจัดส่งถึงบ้านสำเร็จในผู้ป่วยสิทธิบัตรทอง ข้าราชการจ่ายตรง และประกันสังคม เท่ากับร้อยละ 88.64, 89.47 และ 88.89 ตามลำดับ สัดส่วนที่พบมีค่าใกล้เคียงกันในเชิงพรรณนา สะท้อนว่าการจัดระบบบริการสามารถดำเนินการจัดส่งยาได้ในผู้ป่วยหลายสิทธิการรักษา

อย่างไรก็ตาม ความใกล้เคียงของสัดส่วนดังกล่าวยังไม่เพียงพอที่จะยืนยันว่าผู้ป่วยทุกสิทธิได้รับบริการอย่างเท่าเทียมกัน จำเป็นต้องพิจารณาจำนวนผู้ป่วยในแต่ละกลุ่ม ช่วงความเชื่อมั่น และผลการทดสอบความแตกต่างที่เหมาะสม รวมทั้งปัจจัยด้านความพร้อมในการจัดส่งยาและข้อกำหนดของแต่ละกองทุน

ในด้านการเงินการคลัง ควรประเมินต้นทุนการจัดส่งยาและภาระค่าใช้จ่ายที่โรงพยาบาลต้องรับผิดชอบ โดยเฉพาะค่าไปรษณีย์ที่ระบุไว้ 80 บาทต่อรายการในบางสิทธิการรักษา พร้อมตรวจสอบหลักเกณฑ์การเบิกจ่ายที่ใช้ในช่วงเวลาศึกษา ผลการประเมินดังกล่าวสามารถนำไปประกอบการพิจารณาแนวทางสนับสนุนงบประมาณหรือกลไกชดเชยค่าบริการทางไกลและการจัดส่งยาในระดับนโยบายต่อไป

สรุปผลการอภิปราย

โดยสรุป การใช้ TELE-URO Nursing Model ร่วมกับ BMS–HOSxP Dashboard, BMS–HOSxP Fund Management และ Smart COC Platform มีความสัมพันธ์กับผลลัพธ์ที่ดีขึ้นในด้านความครบถ้วนของข้อมูลก่อนรับคำปรึกษา การกลับมารับบริการซ้ำจากสาเหตุที่ป้องกันได้ และการประสานการดูแลต่อเนื่องในชุมชน ผลการวิเคราะห์ที่ปรับปัจจัยร่วมแล้วสนับสนุนความสัมพันธ์ดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ข้อสรุปควรจำกัดอยู่ภายในบริบทของสถานพยาบาลและช่วงเวลา

ที่ศึกษา จนกว่าจะมีหลักฐานจากการศึกษาที่มีการควบคุมปัจจัยกวนได้รัดกุมและดำเนินการในหลายสถานพยาบาล เพื่อยืนยันประสิทธิผล ความปลอดภัย และความสามารถในการขยายผลของรูปแบบในระยะยาว

ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะจากการวิจัย

การวิจัยนี้มีข้อจำกัดที่ควรพิจารณาประกอบการแปลผล ดังนี้

1) การศึกษาใช้รูปแบบเปรียบเทียบก่อนและหลังในสถานพยาบาลเดียว โดยใช้กลุ่มควบคุมเชิงประวัติศาสตร์และไม่มีการสุ่มจัดกลุ่ม จึงอาจได้รับอิทธิพลจากปัจจัยกวนที่เกี่ยวข้องกับเวลา การเปลี่ยนแปลงกระบวนการทำงาน และลักษณะพื้นฐานของผู้ป่วย แม้จะมีการควบคุมปัจจัยร่วมด้วยการวิเคราะห์ถดถอยโลจิสติกส์พหุคูณแล้วก็ตาม

2) กลุ่มตัวอย่างก่อนและหลังใช้รูปแบบมีความแตกต่างกันด้านสิทธิการรักษาและกลุ่มวินิจฉัยโรค ซึ่งอาจส่งผลต่อความพร้อมของข้อมูล โอกาสกลับมารับบริการซ้ำ และความสำเร็จในการประสานดูแล จึงควรพิจารณาปัจจัยกวนที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติมตามความเหมาะสม เช่น ความรุนแรงของโรค โรคร่วม ประวัติการใช้บริการ และความซับซ้อนของการรักษา รวมทั้งประเมินความเพียงพอของจำนวนเหตุการณ์สำหรับแบบจำลองทางสถิติ

3) ระยะเวลาติดตามผลลัพธ์จำกัดอยู่ที่ 90 วัน จึงยังไม่สามารถยืนยันความยั่งยืนของผลลัพธ์ในระยะยาว ตลอดจนผลต่อคุณภาพชีวิต ต้นทุนบริการ และความปลอดภัยที่อาจเกิดขึ้นภายหลังได้

4) การศึกษาดำเนินการในสถานพยาบาลแห่งเดียว ทำให้การนำผลไปประยุกต์ใช้กับโรงพยาบาลชุมชนที่มีทรัพยากร บุคลากร และโครงสร้างพื้นฐานด้านเทคโนโลยีแตกต่างกันจำเป็นต้องดำเนินการด้วยความระมัดระวัง

การศึกษาครั้งต่อไปควรพิจารณาการวิจัยแบบพหุสถาบัน โดยกำหนดนิยามตัวแปรและมาตรฐานการเก็บข้อมูลให้เป็นระบบเดียวกัน หากมีข้อมูลตามช่วงเวลาหลายจุดก่อนและหลังการใช้รูปแบบ อาจใช้การวิเคราะห์อนุกรมเวลาแบบมีจุดเปลี่ยนแปลง (Interrupted Time Series) เพื่อประเมินแนวโน้มผลลัพธ์และแยกผลของการเปลี่ยนแปลงตามเวลาออกจากผลที่สัมพันธ์กับการนำรูปแบบไปใช้ นอกจากนี้ ควรติดตามผลในระยะยาวและประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สุขภาพควบคู่กับผลลัพธ์ทางคลินิก

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1) ด้านมาตรฐานบริการ: โรงพยาบาลควรพิจารณานำ TELE-URO Nursing Model ไปประยุกต์ใช้ในบริการผู้ป่วยนอกเพื่อสนับสนุน Tele-Urology โดยกำหนดแนวปฏิบัติการเตรียมข้อมูลก่อนรับคำปรึกษา เกณฑ์ความพร้อมของข้อมูล และผู้รับผิดชอบในแต่ละขั้นตอนอย่างชัดเจน พร้อมติดตามตัวชี้วัดคุณภาพอย่างต่อเนื่อง

2) ด้านการประสานการดูแล: ควรจัดทำข้อตกลงระดับบริการ (Service Level Agreement: SLA) ระหว่างโรงพยาบาลแม่ข่ายและเครือข่ายปฐมภูมิ โดยกำหนดระยะเวลาการส่งกลับข้อมูล ผู้รับผิดชอบ การติดตามคำสั่งรักษา และแนวทางยกระดับการประสานงานเมื่อไม่สามารถดำเนินการได้ตามกำหนด

3) ด้านสมรรถนะบุคลากร: ควรพัฒนาสมรรถนะพยาบาลด้านการประเมินอาการและสัญญาณอันตรายของโรคระบบทางเดินปัสสาวะ การคัดกรองความเร่งด่วน การใช้ระบบสารสนเทศ การรักษาความลับของข้อมูล และการส่งต่อผู้ป่วยเมื่อมีข้อบ่งชี้ให้ได้รับการประเมินโดยตรง

4) ด้านนโยบายและการเงินการคลัง: ควรประเมินต้นทุนที่แท้จริงของการให้บริการทางไกลและการจัดส่งยา รวมทั้งตรวจสอบหลักเกณฑ์การชดเชยของแต่ละกองทุน เพื่อนำเสนอข้อมูลเชิงประจักษ์ต่อผู้กำหนดนโยบายในการพัฒนากลไกสนับสนุนที่เหมาะสมและลดภาระต้นทุนของหน่วยบริการ

5) ด้านการติดตามและขยายผล: ควรกำหนดระบบติดตามผลลัพธ์ด้านคุณภาพ ความปลอดภัย ความต่อเนื่องของการดูแล และความพึงพอใจของผู้ป่วย พร้อมประเมินความเป็นไปได้ในการนำรูปแบบไปใช้ในสถานพยาบาลอื่นก่อนขยายผลในวงกว้าง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้อำนวยการโรงพยาบาลพยัคฆภูมิพิสัย ที่สนับสนุนนโยบายและทรัพยากร และอนุญาตให้ดำเนินการวิจัย ขอขอบพระคุณหัวหน้าพยาบาลที่ให้คำแนะนำและผลักดันการพัฒนางานพยาบาลอย่างต่อเนื่อง ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่ตรวจสอบรูปแบบและเครื่องมือวิจัย พร้อมให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ และขอขอบพระคุณแพทย์ผู้เชี่ยวชาญระบบทางเดินปัสสาวะ โรงพยาบาลมหาสารคาม ที่ร่วมให้บริการปรึกษาทางไกล จนบริการ Tele-Urology เกิดขึ้นได้จริงในพื้นที่ ขอขอบคุณทีมสหวิชาชีพทั้ง 15 ท่าน ที่ร่วมพัฒนา ทดลองใช้ และปรับปรุงรูปแบบอย่างทุ่มเท ทีมพัฒนาระบบ BMS–HOSxP และ Smart COC Platform ที่ช่วยเชื่อมโยงรูปแบบการดูแลเข้ากับระบบดิจิทัล รวมถึงพยาบาลชุมชนและเครือข่ายบริการปฐมภูมิ อำเภอพยัคฆภูมิพิสัย ที่ร่วมติดตามดูแลผู้ป่วยต่อเนื่องในชุมชน ขอขอบคุณผู้ป่วยและญาติทุกท่านที่ให้ความร่วมมือและไว้วางใจ

เอกสารอ้างอิง

1. World Health Organization. WHO guideline: recommendations on digital interventions for health system strengthening. Geneva: World Health Organization; 2019. [cited 2024 Nov 20]. Available from: https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/c3c53f30-23cc-48d0-a3b5-c05ddd7f5349/content
2. แพทยสภา. ประกาศแพทยสภา ที่ 54/2563 เรื่อง แนวทางปฏิบัติการแพทย์ทางไกลหรือโทรเวช (telemedicine) และคลินิกออนไลน์. ราชกิจจานุเบกษา 2563;137(ตอนพิเศษ 166 ง). https://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2563/E/166/T_0052.PDF
3. Zayar NN, Kittiratchakool N, Saeraneesopon T, Butchon R, Dabak SV, Namahoot P, Kaewchompoo T, Kingkaew P, Teerawattananon Y, Isaranuwatchai W. Telemedicine utilization patterns and implications amidst COVID-19 outbreaks in Thailand under public universal coverage scheme. Inquiry. 2024; 61: 1-11. https://doi.org/10.1177/00469580241246466
4. นิตยา คล่องขยัน. การพัฒนารูปแบบบริการผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลพรเจริญด้วยระบบ Telemedicine. วารสารสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดนครพนม 2567; 2(1): 1-19. https://he02.tci-thaijo.org/index.php/nkp/article/view/267809/183686
5. World Health Organization. Continuity and coordination of care: a practice brief to support implementation of the WHO framework on integrated people-centred health services. Geneva: World Health Organization; 2018. [cited 2024 Nov 20]. Available from: https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/7c938c63-5570-4c0e-95f2-d310bb647704/content
6. Donabedian A. The quality of care: how can it be assessed? JAMA. 1988; 260(12): 1743-1748. [cited 2024 Dec 21]. Available from: https://www.law.uh.edu/faculty/jmantel/health-regulatory-process/Donabedian-The-Quality-of-Care.pdf
7. Jaspreet S. Sandhu, Brooke R. Bixler, Philipp Dahm, Ramy Goueli, Erin Kirkby, John T. Stoffel, Timothy J. Wilt. Management of Lower Urinary Tract Symptoms Attributed to Benign Prostatic Hyperplasia (BPH): AUA Guideline Amendment 2023. Linthicum (MD): American Urological Association; 2023. [cited 2024 Dec 21]. Available from: https://doi.org/10.1097/JU.0000000000003698

8. A. Skolarikos, N.F. Davis, G. Gambaro, R. Geraghty, H. Jung, G.M. Kamphuis, M. Lardas, A. Neisius, A. Petřík, B. Somani, T. Tailly, L. Tzelves, S. Croghan, F. Esperto, R. Lombardo, I. Manolitsis, R. Shepherd. EAU guidelines on urolithiasis. Arnhem: European Association of Urology; 2026. [cited 2026 Jan 21]. Available from: https://d56bochluxqnz.cloudfront.net/documents/full-guideline/EAU-Guidelines-on-Urolithiasis-2026.pdf
9. Ong CSH, Lu J, Tan YQ, Tan LGM, Tiong HY. Implementation of a ureteric colic telemedicine service: a mixed methods quality improvement study. Urology. 2021; 147: 14-20. https://www.goldjournal.net/article/S0090-4295(20)31266-8/fulltext
10. ศันยวิทย์ พึงประเสริฐ. ประสิทธิผลของระบบบริการการแพทย์ทางไกลในการส่งต่อผู้ป่วยกลุ่มโรคช่องทางด่วน จังหวัดสุรินทร์. วารสารการแพทย์โรงพยาบาลศรีสะเกษ สุรินทร์ บุรีรัมย์ 2567; 39(2): 369-379. https://he02.tci-thaijo.org/index.php/MJSSBH/article/view/269499/184467
11. นิยม ประโกสันตัง. ผลของการใช้รูปแบบการพยาบาลทางไกลกับการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2. วารสารวิจัยและพัฒนานวัตกรรมทางสุขภาพ 2567; 5(2): 100-111. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/jrhi/article/view/271079/182416
12. Naik N, Hameed BMZ, Nayak SG, Gera A, Nandyal SR, Shetty DK, Shah M, Ibrahim S, Naik A, Kamath N, Mahdaviamiri D, D'costa KK, Rai BP, Chlosta P, Somani BK. Telemedicine and telehealth in urology-what do the patients think about it? Front Surg. 2022; 9: 863576. https://doi.org/10.3389/fsurg.2022.863576



KSTi

Kalasin University
Journal of Science Technology and Innovation

วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Kalasin University Journal of
Science Technology and Innovation