



วารสารวิชาการ ISSN: 3027-8090 (Online)

นวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

Academic Journal of Industrial Technology Innovation



ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม - สิงหาคม 2569 Vol. 4 No. 2 May – August 2026

วารสารวิชาการกลุ่มสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชานวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

Doctor of Philosophy Program in Industrial Technology Innovation, Faculty of Engineering and Industrial Technology,
Nakhon Si Thammarat Rajabhat University



วารสารวิชาการนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชานวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

Academic Journal of Industrial Technology Innovation, Doctor of Philosophy Program in Industrial Technology Innovation,

Faculty of Engineering and Industrial Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม - สิงหาคม 2569, Vol. 4 No. 2 May – August 2026, ISSN: 2822-1125 (Print), ISSN: 3027-8090 (Online)

เจ้าของ หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชานวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

บรรณาธิการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิศักดิ์ ศิริพันธ์

วัตถุประสงค์

วารสารวิชาการนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม เป็นวารสารวิชาการสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อเป็นสื่อกลางเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัยของบุคลากร วิทยานิพนธ์ ดุษฎีนิพนธ์ ของนักศึกษา คณาจารย์ บุคลากร นักวิชาการ ตลอดจนผู้สนใจ ทั้งภายในและภายนอก โดยมุ่งเน้นเผยแพร่บทความวิชาการทางด้านนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

คณะที่ปรึกษา

นายกสภามหาวิทยาลัย	ที่ปรึกษา
อธิการบดีมหาวิทยาลัย	ที่ปรึกษา
รองอธิการบดี (ฝ่ายวิชาการและนวัตกรรมการศึกษา)	ที่ปรึกษา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย แก้วดี	ที่ปรึกษา

นโยบาย

- สนับสนุนการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการของสถาบันการศึกษา บุคลากรในมหาวิทยาลัย นักศึกษา นักวิจัย และบุคคลทั่วไป
- สนับสนุนการสร้างความรู้และองค์ความรู้ที่ถูกต้อง การพัฒนานวัตกรรมทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรม การศึกษาทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรม อุตสาหกรรม วิศวกรรม เทคนิคและอาชีวศึกษา อุตสาหกรรมจากภูมิปัญญาชุมชน การจัดการและบริหารภูมิปัญญาด้านการผลิตเชิงอุตสาหกรรมชุมชนเพื่อก้าวสู่สากล
- ส่งเสริมธรรมาภิบาลในการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ เช่น การไม่คัดลอกผลงาน การตีพิมพ์ซ้ำซ้อน การปลอมแปลงหรือสร้างข้อมูลอันเป็นเท็จเพื่อประโยชน์ของตนเองและองค์กร

ขอบเขตบทความ

เป็นวารสารที่ครอบคลุมสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี บทความมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาทางด้านนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม อาทิ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ อุตสาหกรรมศึกษา เทคนิคและอาชีวศึกษา อุตสาหกรรมศิลป์ สถาปัตยกรรมและการออกแบบ และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับเทคโนโลยีอุตสาหกรรม โดยนำเสนอในรูปแบบบทความวิจัย บทความวิชาการ บทความวิจารณ์/บทความปริทัศน์

กระบวนการพิจารณาบทความ

บทความจะผ่านขั้นตอนการประเมินเบื้องต้นถึงคุณภาพและขอบเขตของเนื้อหา ความถูกต้องของรูปแบบการเตรียมบทความ ความซ้ำซ้อน และการคัดลอกวรรณกรรม (Duplication and Plagiarism) โดยกองบรรณาธิการวารสารฯ จากนั้นบทความจะได้รับการประเมินคุณภาพทางวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิทางสาขาที่เกี่ยวข้องไม่น้อยกว่า 3 ท่านซึ่งผู้ต้นฉบับ (Author) และผู้ประเมิน (Reviewer) จะไม่ทราบข้อมูลของกันและกัน (Double-Blinded Peer Reviews) โดยบทความที่ผ่านการปรับปรุงตามผลการประเมินจะได้รับพิจารณาอนุมัติให้ตีพิมพ์บทความขั้นตอนสุดท้าย กองบรรณาธิการจะดำเนินการตรวจสอบบทความและพิสูจน์อักษรก่อนที่จะเผยแพร่บทความแบบออนไลน์ และจัดพิมพ์บทความทั้งหมดรวมเล่มเพื่อดำเนินการเผยแพร่ต่อไป

อนึ่งผลงานวิจัยและผลงานทางวิชาการที่ปรากฏเผยแพร่ในวารสารวิชาการนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม เป็นความคิดเห็นอิสระของผู้แต่ง โดยผู้แต่งเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความเผยแพร่นั้น ซึ่งกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

ภาษาที่รับตีพิมพ์ : ภาษาไทย หรือ ภาษาอังกฤษ

กำหนดเผยแพร่ : เผยแพร่ปีละ 3 ฉบับ ของทุกปี ดังนี้

ฉบับที่ 1 ระหว่างเดือน มกราคม – เมษายน

ฉบับที่ 2 ระหว่างเดือน พฤษภาคม - สิงหาคม

ฉบับที่ 3 ระหว่างเดือน กันยายน – ธันวาคม

กองบรรณาธิการ ประกอบด้วย

ศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญนันท์ นิลสุข	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข	สำนักวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.อัศรัตน์ พูลกระจำง	ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ปณิตา วรรณพิรุณ	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แก้วเกื้อกุล	ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุธ จริตงาม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ธนิตย์ธีรพันธ์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์เรวัต สุขสีกาญจน์	สำนักวิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

ฝ่ายประสานงานและเผยแพร่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย แก้วดี	สาขาวิชานวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
--------------------------------------	--

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระยุทธ สดสมบุรณ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมสันต์ สุวรรณโรจน์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และอุตสาหกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุนทร ปลื้มสง	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิลาวัณย์ จินวรรณ	สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรมและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์เทพ วีระพงศ์	สาขาวิชาอุตสาหกรรมและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัตยากร ไทยพันธ์	สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ฝ่ายจัดการ	
อาจารย์วิสา รวยรวย	สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
อาจารย์วิศรุต ช่วยจันทร์	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ดร.วรากรณ์ สาริษา	สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
อาจารย์อังฉริรี อนุมณี	สาขาวิชาวิศวกรรมการออกแบบ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
อาจารย์เปมิกา แซ่เตียว	สาขาวิชาอุตสาหกรรมและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
อาจารย์ชัยญากัศ ไชยพรรณ	สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรมและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรพรรณ อำนวยศิลป์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และอุตสาหกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

อาจารย์ประภัสสร กุลทอง	สาขาวิชาการจัดการนวัตกรรมการอุตสาหกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล ปานศรีนวล	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
คณะผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบภาษาอังกฤษ	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โยฟ้า ตระกูลสันติ	สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรมและจีستิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ดร.ธานี จินตสุทธศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และอุตสาหกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ดร.ปิสุตา สังข์ศรี	สาขาวิชาการจัดการนวัตกรรมการอุตสาหกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ดร.จิราพร สุขกรง	สาขาวิชาภาษาอังกฤษธุรกิจ คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์คณาพร แก้วแกมจันทร์	สาขาวิชาภาษาอังกฤษธุรกิจ คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
Asst.Dr. Mohammed Yassin Mohammed Aba Sha'ar สำนักวิทยบริการ	และเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ผู้จัดการวารสาร	
นางเกวณีน เกื้อสุข	นักวิชาการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
นายโพธิ์เศรษฐ์ โพธิ์ปลอด	นักวิชาการโสตทัศนศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
นางสาวชาลิสา พรหมณัฐ	นักวิเคราะห์นโยบายและแผน คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
นางสาวพัชณีย์ แก้วคงจันทร์	นักวิชาการเงินและบัญชี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ปก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย แก้ววดี	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

สำนักงาน 1812 อาคาร 18 คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
เลขที่ 1 หมู่ที่ 4 ตำบลท่าจั่ว อำเภอเมืองนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280
โทรศัพท์: 075-377-439 e-mail: technstru.editorjournal@gmail.com

เว็บไซต์วารสาร <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/AJITI>

พิมพ์ที่ สำนักงานหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช 1812 อาคาร 18
เลขที่ 1 หมู่ที่ 4 ตำบลท่าจั่ว อำเภอเมืองนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280
โทรศัพท์บรรณาธิการ: 089-729-2549 e-mail editor: technstru.editorjournal@gmail.com

ข้อกำหนดเฉพาะของวารสาร

1. บทความที่ลงตีพิมพ์ทุกเรื่องได้รับการตรวจสอบทางวิชาการ โดยผู้ประเมินอิสระหรือพิชญพิจารณ์ (Peer review) ที่มีความเชี่ยวชาญ
จำนวนบทความละ 3 ท่าน
2. ข้อคิดเห็นใด ๆ ของบทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารวิชาการฉบับนี้เป็นของผู้เขียน คณะผู้จัดทำวารสารไม่จำเป็นต้องเห็นด้วย
3. กองบรรณาธิการวารสารวิชาไม่ได้สงวนสิทธิ์การคัดลอกแต่ให้อ้างอิงแสดงที่มา

ค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์บทความ :

ไม่มีการเรียกเก็บค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์บทความ ฉบับที่ 1-12 และเก็บค่าธรรมเนียมตั้งแต่ ฉบับที่ 13 เป็นต้นไป บทความละ
3,000 บาท สำหรับบุคลากร/นักศึกษา ในสังกัดมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช และ 4,000 บาท สำหรับบุคคลทั่วไป

บทบรรณาธิการ

“วารสารวิชาการนวัตกรรมอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี” ปัจจุบันเป็นฉบับปีที่ 4 ฉบับที่ 2 โดยเป็นวารสารของหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมร่วมกับคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ซึ่งจัดทำขึ้นเพื่อส่งเสริมและสนับสนุนให้นักศึกษา คณาจารย์ บุคลากร นักวิชาการ ตลอดจนผู้สนใจทั้งภายในและภายนอกในการพัฒนางานวิจัย บทความวิชาการ บทความวิจารณ์ และบทความปริทัศน์ ได้มีช่องทางในการนำเสนอความคิด และผลผลิตจากการพัฒนางานวิจัยในระดับสูง สื่อสารผลงานวิชาการสู่ภายนอกอย่างเป็นระบบในช่องทางวิชาการ โดยการจัดทำวารสารมีเป้าหมายสู่การรับรองในกลุ่มภายในประเทศและวางกรอบสู่ระดับนานาชาติในอนาคต

ขอบเขตของผลงานในวารสาร “วารสารวิชาการนวัตกรรมอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี” เน้นเผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการ บทความวิจารณ์ และบทความปริทัศน์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี บทความที่มีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องอาทิเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ อุตสาหกรรมศึกษา เทคนิคและอาชีวศึกษา อุตสาหกรรมศิลป์ สถาปัตยกรรมและการออกแบบ และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับเทคโนโลยีอุตสาหกรรม เพื่อในกรอบความคิดและการนำเสนอเป็นศาสตร์เดียวกัน โดยมีการจัดพิมพ์ฉบับนี้เป็นบทความวิจัยจำนวน 7 เรื่อง โดยมีผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความเรื่องละ 2-3 ท่าน ในศาสตร์ทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรม อุตสาหกรรมศิลป์ ออกแบบผลิตภัณฑ์ เทคโนโลยีการบรรจุภัณฑ์ เทคโนโลยีการผลิต วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมโยธา และเทคโนโลยีสารสนเทศ

ขอขอบคุณความร่วมมือในการเผยแพร่ผลงานในรูปแบบของวารสารทางวิชาการในครั้งนี้ จากผู้เกี่ยวข้องหลากหลายฝ่าย ผู้สนใจตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานทางวิชาการ กองบรรณาธิการ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่ตรวจประเมินบทความ (Peer reviewers) ทีมงานจัดทำสารสารทุกท่าน บรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นช่องทางใหม่ให้กับทุกคนที่สนใจและเป็นแหล่งสืบค้น เรียนรู้และอ้างอิงให้กับนักศึกษา คณาจารย์ บุคลากร นักวิชาการ ตลอดจนผู้สนใจทั้งภายในและภายนอก เพื่อประโยชน์แก่การพัฒนางานทางวิชาการให้มีคุณภาพต่อไป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิศันย์ ศิริพันธ์

บรรณาธิการ

สารบัญ

	หน้า
วัตถุประสงค์ (Objectives)	A
กองบรรณาธิการวารสารวิชาการนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (Editorial Board of The Journal of Industrial Technology)	B
บทบรรณาธิการ	F
บทความวิจัย	
ผลของชนิดและปริมาณชีวมวลจากปาล์มน้ำมันต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุ เชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลเพื่อการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้ EFFECTS OF OIL PALM BIOMASS TYPE AND CONTENT ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF RECYCLED POLYPROPYLENE COMPOSITES FOR WOOD SUBSTITUTE APPLICATIONS	1-13
ภูมัมมาร์ การามา, อีรพงศ์ แก้วสมทอง, โสภิตา จรเด่น, อุไรวรรณ สุขยัง	
การเปรียบเทียบวิธีประมาณกำลังรับน้ำหนักปลายของเสาเข็มตอกจากผลทดสอบที่ไม่ถึงจุดวิบัติ COMPARISON OF ESTIMATION METHODS FOR ULTIMATE BEARING CAPACITY OF DRIVEN PILES BASED ON NON-FAILED LOAD TESTS	14-31
พัทธดนย์ ทองด้วง, ภาณุ พร้อมพุดชางกูร	
การเปรียบเทียบลายเซ็นการสั่นสะเทือนแบบโดเมนเวลาของสปินเดิลเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก ตามรูปแบบเส้นทางการแกะสลักไม้ COMPARISON OF TIME-DOMAIN VIBRATION SIGNATURES OF A MINI CNC SPINDLE UNDER DIFFERENT WOOD CARVING TOOL PATHS	32-48
เสรี หนูหลง, ธนะรัตน์ รัตนกุล, กันต์ธมน สุขกระจ่าง, วีรชัย มีภูธรักษ์	
การศึกษาองค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมผักตบชวา กับมูลวัว ในระดับห้องปฏิบัติการ LABORATORY-SCALE STUDY OF BIOGAS COMPOSITION AND HEATING VALUE FROM CO-DIGESTION OF WATER HYACINTH AND CATTLE MANURE	49-65
วิษัฒพร เขมวงศ์, วิศรุต ช่วยจันทร์, ศักดิ์ธีรพี ขุนเพชร, ประภัสสร กุลทอง, วิชิต มาลาเวช	

**การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบไก่แปรรูปที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมอาหารแปรรูปแช่แข็ง
ด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น กรณีศึกษา บริษัท XYZ**

OPTIMIZE SUPPLIER SELECTION FOR PROCESSED CHICKEN RAW MATERIALS IN FROZEN
FOOD INDUSTRY USING THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS: A CASE STUDY OF XYZ

66-75

เบญจพร กันหามอม, ปิยะ บุษรากุล, พัฒนพงษ์ พลอยแก้ว

**การพัฒนาชุดฝึกอบรมไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์สันดาปภายในแบบโมดูลสำหรับนักเรียนระดับ
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ**

DEVELOPMENT OF ELECTRICAL SYSTEM TRAINING KIT FOR INTERNAL COMBUSTION
ENGINE VEHICLE AIR CONDITIONING FOR VOCATIONAL CERTIFICATE STUDENTS

76-90

รณพร รัตนจันทร์, ฉัตรชัย แก้วดี, วีรพล ปานศรีนวล, วีระยุทธ สุตสมบุญ

**การออกแบบและพัฒนาระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE OFFICIAL ACCOUNT สำหรับวิสาหกิจ
ชุมชนในอำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช**

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A DIGITAL SERVICE PLATFORM USING LINE OFFICIAL
ACCOUNT FOR COMMUNITY ENTERPRISES IN KHANOM DISTRICT,
NAKHON SI THAMMARAT PROVINCE

91-113

วชิร ยิ่งยืน, กมลนันท์ ชีวรัตน์โชติ, เมธพร มีเดช

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับ

114-120

จริยธรรมในการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสาร (Publication Ehtics)

121-122

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาบทความวารสารวิชาการนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาภาษาอังกฤษวารสารวิชาการนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ปีที่ 4 เล่มที่ 2 (พฤษภาคม - สิงหาคม 2569)

123

แบบประเมินคุณภาพตามความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิสำหรับการตีพิมพ์บทความวิจัย/บทความ

วิชาการวารสารนวัตกรรมอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิตและคณะ

วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

124

แบบสรุปผลการประเมินบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารนวัตกรรมอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิตและคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏ
นครศรีธรรมราช

125

ผลของชนิดและปริมาณชีวมวลจากปาล์มน้ำมันต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุ
เชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลเพื่อการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้
EFFECTS OF OIL PALM BIOMASS TYPE AND CONTENT ON THE PHYSICAL AND
MECHANICAL PROPERTIES OF RECYCLED POLYPROPYLENE COMPOSITES FOR
WOOD SUBSTITUTE APPLICATIONS

กู๋มมาร์ การามา¹, ธีรพงศ์ แก้วสมทอง¹, โสภิดา จรเด่น², อุไรวรรณ สุกยัง^{2*}
Kuammar Karama¹, Theerapong Kaewsomthong¹, Sopida Jornden², Uraiwan Sookyung^{2*}

¹ นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Undergraduate Student, Bachelor of Engineering Program, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Lecturer, Bachelor of Engineering Program, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: uraiwan.so@mutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 28 มิถุนายน 2569 ; วันที่ทบทวนบทความ: 11 กรกฎาคม 2569 ; วันที่ตอบรับบทความ: 28 สิงหาคม 2569 ;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 31 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มมูลค่าพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลร่วมกับวัสดุชีวมวลจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ได้แก่ ผงกะลาปาล์มน้ำมัน (PM) และเส้นใยปาล์มน้ำมัน (OPF) เพื่อพัฒนาวัสดุเชิงประกอบสำหรับใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้ในงานเฟอร์นิเจอร์ โดยเตรียมวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 170 °C และความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที (RPM) จากนั้นขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยกระบวนการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 20 นาที ศึกษาผลของชนิดและปริมาณวัสดุชีวมวลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การพองตัวตามความหนา ความต้านทานแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น และแรงยึดเหนี่ยวของสกรู โดยการทดสอบดำเนินการอย่างน้อย 3 ซ้ำ และรายงานผลในรูปค่าเฉลี่ย ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณ PM และ OPF ส่งผลให้ความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น โดยสูตร PP60PM40 ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 1.03 ± 0.01 g/cm³ และค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดในกลุ่มวัสดุเชิงประกอบเท่ากับ 43.81 ± 1.72 MPa ขณะที่สูตร PP60PM20OPF20 มีค่าการพองตัวตามความหนาสูงสุดเท่ากับ 1.79% อย่างไรก็ตาม วัสดุเชิงประกอบทุกสูตรมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า 0.35% และค่าการพองตัวตามความหนาดำกว่า 2% เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 966-2547 และ JIS A 5905 พบว่าวัสดุเชิงประกอบส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน JIS A 5905 ในด้านความหนาแน่น การพองตัวตามความหนา ความต้านทานแรงดัด และโมดูลัสยืดหยุ่น ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลร่วมกับวัสดุชีวมวลจากปาล์มน้ำมันสามารถพัฒนาวัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้ และเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของเสียจากภาคอุตสาหกรรมตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน

คำสำคัญ: พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล, เส้นใยปาล์มน้ำมัน, กะลาปาล์มน้ำมัน, วัสดุเชิงประกอบ

Abstract: This research aimed to enhance the value of recycled polypropylene (PP) by incorporating oil palm biomass, namely palm kernel shell (PM) and oil palm fiber (OPF), to develop composite materials for wood substitute applications in furniture manufacturing. The composites were prepared using an internal mixer at 170 °C and 60 rpm, followed by hot-press molding at 170 °C for 20 min. The effects of biomass type and content on the physical and mechanical properties of the composites were investigated, including density, water absorption, thickness swelling, modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), and screw withdrawal strength. The results showed that increasing PM and OPF contents led to higher composite density and water absorption. The PP60PM40 formulation exhibited the highest density of 1.03 g/cm³ and the highest MOR among the composite formulations at 43.81 MPa. The PP60PM20OPF20 formulation showed the highest thickness swelling of 1.79%. Nevertheless, all composite formulations exhibited water absorption below 0.35% and thickness swelling below 2%, indicating excellent dimensional stability. Comparison with Thai Industrial Standard TIS 966-2547 and Japanese Industrial Standard JIS A 5905 revealed that most formulations satisfied the requirements of JIS A 5905 in terms of density, thickness swelling, MOR, and MOE. The findings demonstrate that recycled polypropylene reinforced with oil palm biomass has considerable potential for the development of sustainable wood substitute materials, while simultaneously adding value to agricultural residues and supporting circular economy practices.

Key words: Recycled Polypropylene, Oil Palm Fiber, Palm Kernel Shell, Polymer Composites

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาขยะพลาสติกเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ เนื่องจากพลาสติกมีความคงทนสูงและย่อยสลายได้ยาก ส่งผลให้เกิดการสะสมในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน โดยปริมาณขยะพลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการขยายตัวของเศรษฐกิจและการบริโภค โดยเฉพาะพลาสติกประเภทโพลีโพรพิลีน (PP) ซึ่งเป็นพลาสติกเทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้ในบรรจุภัณฑ์และผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภค เนื่องจากมีน้ำหนักเบา แข็งแรง ทนต่อสารเคมี และขึ้นรูปได้ง่าย แม้ว่า PP จะสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านการคัดแยกและกระบวนการรีไซเคิล ส่งผลให้ขยะพลาสติกจำนวนมากถูกทิ้งสะสมในสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศ การอุดตันของระบบระบายน้ำ และปัญหาไมโครพลาสติกที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสุขภาพมนุษย์ในระยะยาว [1] แนวทางที่ได้รับความสนใจในการจัดการปัญหาขยะพลาสติก คือการนำพลาสติกกลับมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบวัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) ร่วมกับวัสดุชีวมวลจากของเหลือทิ้ง

ทางการเกษตร เช่น เส้นใยปาล์ม น้ำมัน เส้นใยมะพร้าว ชังข้าวโพด และฟางข้าว ซึ่งเป็นวัสดุที่มีปริมาณมาก ราคาต่ำ น้ำหนักเบา และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ วัสดุเหล่านี้จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบ ช่วยเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2], [3], [4]

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้ผลิตน้ำมันปาล์มรายสำคัญของโลก ส่งผลให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มเป็นจำนวนมาก เช่น เส้นใยปาล์ม น้ำมัน (Oil Palm Fiber; OPF) และกะลาปาล์ม น้ำมัน (Palm Kernel Shell Mesh; PM) ดังแสดงในภาพที่ 1 วัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวมักถูกนำไปใช้ประโยชน์ในมูลค่าต่ำ เช่น เชื้อเพลิงชีวมวล หรือถูกกองทิ้งในพื้นที่โรงงาน ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาด้านการจัดการของเสีย และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว อย่างไรก็ตาม เส้นใยปาล์ม น้ำมันมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ทำให้มีคุณสมบัติด้านการเสริมแรงที่ดี ขณะที่กะลาปาล์ม น้ำมันมีปริมาณลิกนินสูงและมีลักษณะเป็นอนุภาคแข็ง จึงมี

ศักยภาพในการเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานของวัสดุเชิงประกอบ [3], [5]



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1 ของเสียจากโรงงานปาล์มน้ำมัน (ก) เส้นใยปาล์มน้ำมัน (ข) กะลาปาล์มน้ำมัน (บริษัท ลากทวิ อินดัสตรีส์ จำกัด)

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการใช้เส้นใยปาล์มน้ำมันหรือกะลาปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุเสริมแรงในพอลิเมอร์หลายชนิด เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และวัสดุเชิงประกอบพลาสติกไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) โดยพบว่าวัสดุชีวมวลจากปาล์มน้ำมันสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงและลดต้นทุนการผลิตได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่มักศึกษาวัสดุชีวมวลแต่ละชนิดแยกจากกัน หรือดำเนินการภายใต้ชนิดพอลิเมอร์ อัตราส่วนผสม และกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ส่งผลให้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเส้นใยปาล์มน้ำมันและกะลาปาล์มน้ำมันต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบทำได้

อย่างจำกัด นอกจากนี้ ยังพบว่ามีข้อมูลเกี่ยวกับการใช้พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล เป็นเมทริกซ์ร่วมกับวัสดุชีวมวลทั้งสองชนิดภายใต้สภาวะการผลิตเดียวกันค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะการประเมินสมบัติของวัสดุเทียบกับมาตรฐานวัสดุแผ่นที่ใช้ในงานเฟอร์นิเจอร์และงานตกแต่งภายใน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของชนิดและปริมาณวัสดุชีวมวลจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เส้นใยปาล์มน้ำมันและกะลาปาล์มน้ำมัน ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบจากพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ภายใต้กระบวนการผลิตเดียวกัน เพื่อประเมินศักยภาพของวัสดุสำหรับการใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้ อันจะเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียจากภาคอุตสาหกรรมและส่งเสริมการใช้ทรัพยากรตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) นอกจากนี้ สมบัติของวัสดุที่พัฒนาขึ้นยังถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 966-2547 แผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Fiberboards: MDF) [5] และมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS A 5905:2014 Fiberboards [6] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุแผ่นสำหรับงานเฟอร์นิเจอร์และงานตกแต่งภายในอย่างแพร่หลาย เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเชิงประกอบที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้ในอนาคต ทั้งนี้ งานวิจัยมุ่งเน้นการประเมินสมรรถนะของวัสดุโดยอ้างอิงเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าว มิได้ครอบคลุมการออกแบบ การผลิต หรือการทดสอบผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ต้นแบบโดยตรง

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 2.1 ศึกษาผลกระทบของชนิดและปริมาณวัสดุชีวมวลเส้นใยปาล์มน้ำมันและกะลาปาล์มน้ำมันต่อสมบัติวัสดุเชิงประกอบ
- 2.2 เพื่อพัฒนาวัสดุเชิงประกอบจากขยะพลาสติกผสมวัสดุชีวมวลสำหรับงานเฟอร์นิเจอร์

3. ขอบเขตการวิจัย

- 3.1 ใช้พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลจากขยะพลาสติกประเภทฝาเป็นวัสดุเนื้อพื้น และใช้ผงกะลาปาล์มน้ำมันกับเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นสารเสริมแรง โดยเส้นใยปาล์มน้ำมันร่อนผ่านตะแกรง

ขนาด 40 mesh และกะลาปาล์มน้ำมันร้อนผ่านตะแกรงขนาด 80 mesh

3.2 ศึกษาสูตรวัสดุเชิงประกอบจำนวน 10 สูตร โดยแปรปริมาณพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลร้อยละ 60-100 โดยน้ำหนัก และวัสดุชีวมวลร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนัก ทั้งในรูปของการเติมผงกะลาปาล์มน้ำมัน เส้นใยปาล์มน้ำมัน และการเติมรวมกัน

3.3 เตรียมวัสดุเชิงประกอบด้วยเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 170 °C และความเร็วรอบ 60 rpm จากนั้นขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยกระบวนการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 20 นาที

3.4 ทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกล ได้แก่ ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การพองตัวตามความหนา ความต้านทานแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น ความแข็งแบบชาร์ดี และแรงยึดเหนี่ยวของสกรู พร้อมเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 966-2547 และ JIS A 5905:2014 เพื่อประเมินศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้สำหรับงานเฟอร์นิเจอร์

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 เตรียมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและวัสดุชีวมวล ขยะพลาสติกกรีไซเคิลชนิดโพลีโพรพิลีน (Polypropylene ,PP) เลือกใช้จากขยะประเภทฝา ทำการบดย่อยให้มีขนาดเล็ก โดยนำทำความสะอาดและนำไปบดละเอียดด้วยเครื่องบดย่อยยี่ห้อ

GRINDER MACHINE ความเร็วรอบ 34,000 รอบ/นาที ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ (Matrix) หรือเป็นวัสดุเนื้อพื้นในการผสมวัสดุพลาสติกโพรพิลีนก่อนและหลังบดย่อยแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การเตรียมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล

เส้นใยปาล์มน้ำมันและกะลาปาล์มน้ำมัน ที่ใช้เป็นสารเสริมแรงในงานวิจัยนี้ได้รับจากบริษัท ลาภทวีอินดัสตริสส์ จำกัด โดยนำวัสดุทั้งสองชนิดมาบดย่อยด้วยเครื่องบดย่อย จากนั้นร่อนคัดแยกขนาดด้วยเครื่องร่อนเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอและเหมาะสมต่อการผลิตวัสดุเชิงประกอบ โดยเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อนผ่านตะแกรงขนาด 40 mesh และกะลาปาล์มน้ำมันร้อนผ่านตะแกรงขนาด 80 mesh เป็นเวลา 10 นาที ก่อนนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงร่วมกับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ทั้งนี้ ขั้นตอนการเตรียมวัสดุชีวมวล ตั้งแต่วัตถุดิบเริ่มต้น การบดย่อย การร่อนคัดแยกขนาด และวัสดุที่ผ่านการเตรียมแล้ว แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การเตรียมเส้นใยปาล์มน้ำมันและกะลาปาล์มน้ำมัน

4.2 ผสมและขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ พอลิโพรพิลีน รีไซเคิล ถูกนำมาผสมร่วมกับเส้นใยปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Fiber; OPF) หรือผงกะลาปาล์มน้ำมัน (Palm Kernel Shell; PM) ตามสัดส่วนที่กำหนดแสดงดังตารางที่ 1 โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ที่อุณหภูมิ 170 °C และความเร็วรอบ 60 rpm เวลาในการผสม 5 นาที จนได้วัสดุเชิงประกอบที่มีการกระจายตัวของสารเติมแต่งอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นนำวัสดุเชิงประกอบที่ได้ใส่ลงในแม่พิมพ์และขึ้นรูป

ด้วยเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 20 นาที แรงดันอัด 1,500 psi โดยทำการกดอัดจำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 3 วินาที เพื่อช่วยไล่อากาศและเพิ่มความสม่ำเสมอของแผ่นวัสดุ หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นภายใต้แรงกดเป็นเวลา 10 นาที ก่อนนำออกจากแม่พิมพ์เพื่อให้ได้แผ่นวัสดุเชิงประกอบสำหรับการใช้การตัดชิ้นทดสอบและศึกษาสมบัติต่าง ๆ ต่อไป ดังแสดงภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การผสมและขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ

ตารางที่ 1 สูตรการผสมและสัดส่วนปริมาณวัสดุเชิงประกอบ

Sample	สัดส่วนปริมาณ (wt%)		
	PP	PM	OPF
PP100	100	-	-
PP80 PM20	80	20	-
PP70 PM30	70	30	-
PP60 PM40	60	40	-
PP80 OPF20	80	-	20
PP70 OPF30	70	-	30
PP60 OPF40	60	-	40
PP80 PM10 OPF10	80	10	10
PP70 PM15 OPF15	70	15	15
PP60 PM20 OPF20	60	20	20

หมายเหตุ: PP คือ พอลิโพรพิลีน PM คือ กะลาปาล์ม OPF คือ เส้นใยปาล์มน้ำมัน

4.3 ทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกล การทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบประกอบด้วย การวัดความหนาแน่นและการพองตัวตามความหนาตามมาตรฐาน JIS A 5905 และการทดสอบการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM D570 ส่วนสมบัติทางกลประกอบด้วย การทดสอบความต้านทานแรงดัดและมอดูลัสยืดหยุ่น (MOR และ MOE) ตามมาตรฐาน ASTM D790 และการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของสกรูตามมาตรฐาน ASTM D1037 การทดสอบความแข็งแบบชอร์ดูโรมิเตอร์ (Shore Durometer) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 เพื่อประเมินความเหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุทดแทนไม้

4.3.1 การทดสอบความหนาแน่น (Density) ตามมาตรฐาน JIS A 5905:2014 โดยเตรียมชิ้นทดสอบตามขนาดที่กำหนด ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.01 กรัม และวัดความกว้าง ความยาว และความหนาของชิ้นทดสอบ

จากนั้นนำค่ามวลและปริมาตรที่คำนวณได้ไปหาค่าความหนาแน่นของวัสดุตามสมการ (1)

$$Density = \frac{M}{V} \times 10^6 \dots\dots\dots (1)$$

โดยที่

Density แทน ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m³)

M แทน มวลของชิ้นทดสอบ (g)

V แทน ปริมาตรของชิ้นทดสอบ (mm³)

4.3.2 การทดสอบการพองตัวตามความหนา (Thickness Swelling) ทดสอบตามมาตรฐาน JIS A 5905:2014 โดยเตรียมชิ้นทดสอบตามขนาดที่กำหนด วัดความหนาเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (*t*₁) จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำชิ้นทดสอบขึ้นจากน้ำ ซับน้ำส่วนเกินบนผิวออก และวัดความหนาหลังการแช่น้ำ (*t*₂) แล้วคำนวณค่าการพองตัวตามความหนาตามสมการ (2)

$$Thickness\ Swelling = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

โดยที่

Thickness Swelling แทน การพองตัวตามความหนา (%)

*t*₁ แทน ความหนาของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ (mm)

*t*₂ แทน ความหนาของชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ (mm)

4.3.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D570 โดยเตรียมชิ้นทดสอบขนาด 50 × 50 × 4 mm นำชิ้นทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (*W*₁) แล้วนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำชิ้นทดสอบขึ้นจากน้ำ ซับน้ำส่วนเกินบนผิวออก และชั่งน้ำหนักอีกครั้ง (*W*₂) จากนั้นคำนวณค่าการดูดซึมน้ำตามสมการ (3)

$$Water\ absorption = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

โดยที่

Water absorption แทน การดูดซึมน้ำ (%)

*W*₁ แทน น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ (g)

*W*₂ แทน น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ (g)

4.3.4 ทดสอบความต้านทานแรงดัด (Modulus of Rupture; MOR) และมอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity; MOE) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยใช้การทดสอบแรงดัดแบบสามจุด (Three-point bending test) ชิ้นทดสอบถูกวางบนแท่นรองรับและรับแรงกดที่กึ่งกลางของชิ้นงานจนกระทั่งเกิดการแตกหัก จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความต้านทานแรงดัดและมอดูลัสยืดหยุ่นตามสมการ (4) และ (5)

$$MOR = \frac{3FL}{2wt^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$MOE = \frac{L^3F}{4wt^3\delta} \dots\dots\dots (5)$$

โดยที่

MOR แทน ความต้านทานแรงดัด (MPa)

MOE แทน มอดูลัสยืดหยุ่น (MPa)

F แทน แรงสูงสุดก่อนชิ้นทดสอบแตกหัก (N)

L แทน ระยะห่างระหว่างแท่นรองรับ (mm)

w แทน ความกว้างของชิ้นทดสอบ (mm)

t แทน ความหนาของชิ้นทดสอบ (mm)

δ แทน ค่าการโก่งตัวของชิ้นทดสอบที่แรง *F* (mm)

4.3.5 ทดสอบการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของสกรู (Screw Withdrawal Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D1037 โดยเตรียมชิ้นทดสอบตามขนาดที่กำหนด และขันสกรูให้ตั้งฉากกับผิวชิ้นทดสอบ โดยกำหนดความลึกของการฝังสกรูประมาณ 2/3 ของความหนาชิ้นทดสอบ จากนั้นติดตั้งชิ้นทดสอบบนเครื่องทดสอบแรงดึงสากล (Universal Testing Machine; UTM) และดึงสกรูออกในแนวตั้งฉากกับผิววัสดุด้วยอัตราเร็วหัวกด 2 mm/min บันทึกค่าแรงสูงสุดก่อนสกรูหลุดออกจากชิ้นทดสอบ และนำมาคำนวณค่าแรงยึดเหนี่ยวของสกรูตามสมการ (6)

$$\text{Screw Withdrawal Strength} = \frac{F}{D \times L} \dots\dots\dots(6)$$

โดยที่

Screw Withdrawal Strength แทน แรงยึดเหนี่ยว
ของสกรู (MPa)

F แทน แรงดึงสูงสุดก่อนสกรูหลุดออกจาก
ชิ้นทดสอบ (N)

D แทน เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (mm)

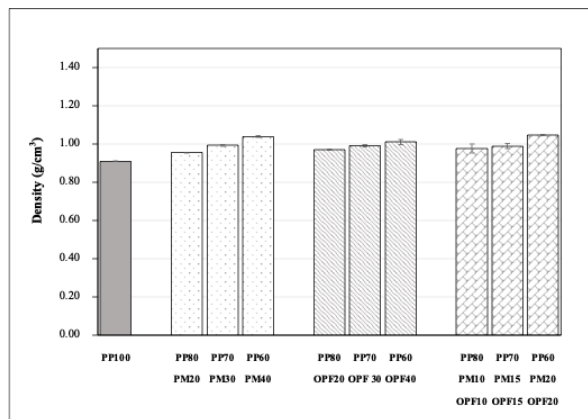
L แทน ความลึกของการฝังสกรู (mm)

4.3.6 การทดสอบความแข็งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบชอร์ดูโร-มิเตอร์ชนิด Shore D ชิ้นทดสอบถูกวางบนพื้นผิวเรียบและแข็ง จากนั้นกดหัวกดของเครื่องให้ตั้งฉากกับผิวชิ้นทดสอบจนสัมผัสเต็มพื้นที่ และอ่านค่าความแข็งหลังจากสัมผัสชิ้นทดสอบ 1 วินาที ทำการวัดอย่างน้อย 5 ตำแหน่ง บนชิ้นทดสอบ โดยแต่ละตำแหน่งอยู่ห่างกันและห่างจากขอบชิ้นงานไม่น้อยกว่า 6 mm แล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อรายงานเป็นค่าความแข็งของวัสดุ

5. ผลการวิจัย

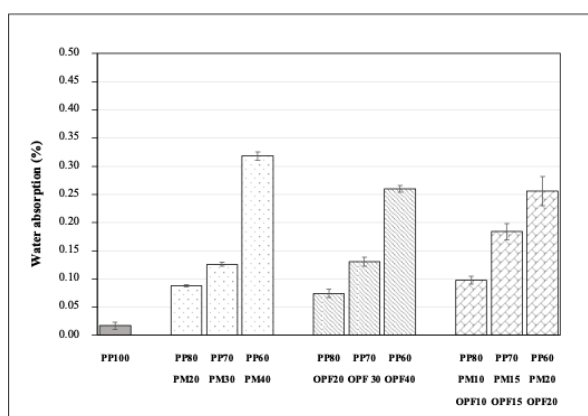
5.1 ศึกษาผลกระทบของชนิดและปริมาณวัสดุชีวมวลเส้นใยปาล์มน้ำมันและกะลาปาล์มต่อสมบัติวัสดุเชิงประกอบ มีดังนี้

5.1.1 ความหนาแน่น ผลการทดสอบความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบแสดงดังภาพที่ 5 พบว่า การเติมผงกะลาปาล์มน้ำมัน (PM) และเส้นใยปาล์มน้ำมัน (OPF) ส่งผลให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารเสริมแรงเพิ่มขึ้น โดยสูตร PP60/PM40 ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดประมาณ 1.03 g/cm³ ขณะที่พลาสติกพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ (PP100) มีค่าความหนาแน่นต่ำสุดประมาณ 0.90 g/cm³ สำหรับวัสดุเชิงประกอบแบบผสมระหว่าง PM และ OPF พบว่าการเพิ่มปริมาณสารเสริมแรงรวมส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยสูตร PP60/PM20/OPF20 มีค่าความหนาแน่นสูงสุดในกลุ่มนี้



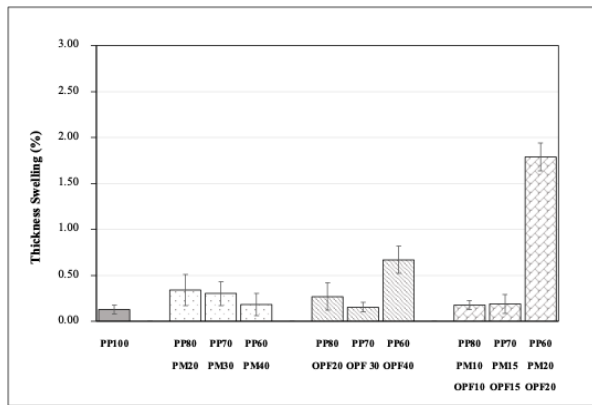
ภาพที่ 5 ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบที่มีการแปรปริมาณกะลาปาล์มและเส้นใยปาล์มน้ำมัน

5.1.2 การดูดซึมน้ำ ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำหลังแช่น้ำ 24 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 6 พบว่าการเติมวัสดุชีวมวลทุกชนิดส่งผลให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PP100 โดยสูตร PP60/PM40 มีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือสูตร PP60/OPF40 และสูตร PP60/PM20/OPF20



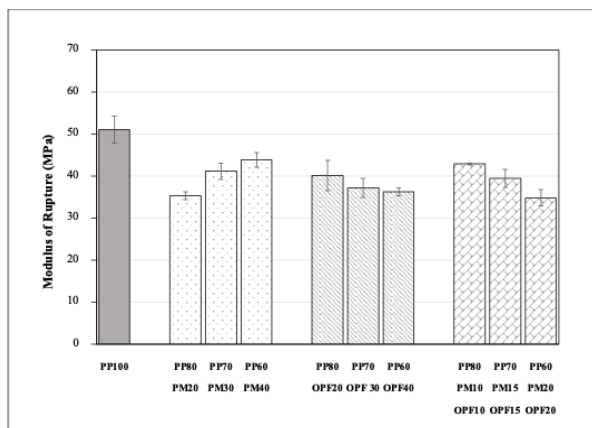
ภาพที่ 6 การดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบที่มีการแปรปริมาณกะลาปาล์มและเส้นใยปาล์มน้ำมัน

5.1.3 การพองตัวตามความหนา ผลการทดสอบการพองตัวตามความหนาหลังแช่น้ำ 24 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 7 พบว่าค่าการพองตัวของวัสดุเชิงประกอบส่วนใหญ่อยู่ในช่วงต่ำกว่า 1% อย่างไรก็ตาม สูตร PP60/PM20/OPF20 แสดงค่าการพองตัวสูงที่สุด 1.8% ในขณะที่สูตรอื่นมีค่าการพองตัวต่ำกว่าอย่างชัดเจน



ภาพที่ 7 การพองตัวตามความหนาของวัสดุเชิงประกอบที่มีการแปร ปริมาณกะลาปาล์มและเส้นใยปาล์ม น้ำมัน

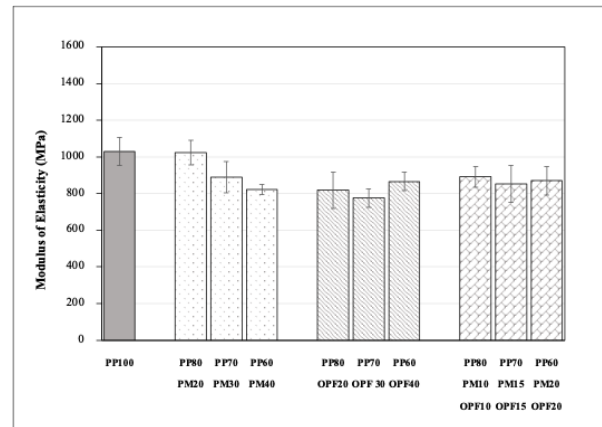
5.1.4 ความต้านทานแรงดัด (MOR) ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดแสดงดังภาพที่ 8 พบว่า PP100 มีความต้านทานแรงดัดสูงสุด 50 MPa เมื่อเติมสารเสริมแรงค่าความต้านทานแรงดัดมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณ PM จาก 20% เป็น 40% ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดัดเพิ่มขึ้นจาก 35 MPa เป็น 43 MPa ขณะที่สูตรที่มี OPF เพียงอย่างเดียวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย



ภาพที่ 8 ความต้านทานแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบที่มีการแปร ปริมาณกะลาปาล์มและเส้นใยปาล์ม น้ำมัน

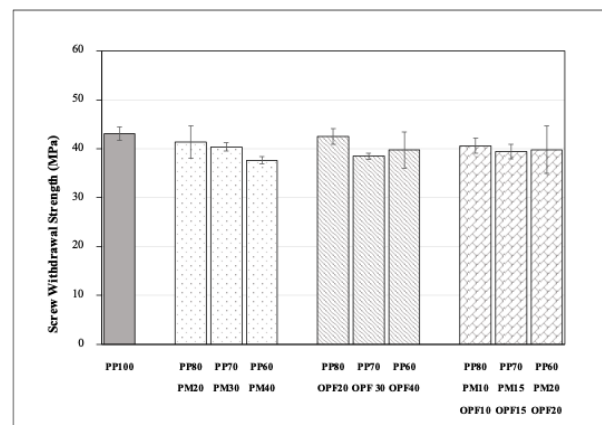
5.1.5 มอดูลัสยืดหยุ่น (MOE) ผลการทดสอบมอดูลัสยืดหยุ่นแสดงดังรูปที่ 9 พบว่า PP100 มีค่า MOE สูงสุด 1,030 MPa สำหรับกลุ่มที่เติม PM ค่า MOE ลดลงเมื่อ

เพิ่มปริมาณ PM โดยสูตร PP60/PM40 มีค่า MOE ต่ำสุด 821 MPa ส่วนกลุ่ม OPF และกลุ่มผสม PM/OPF มีค่าอยู่ในช่วง 770–890 MPa



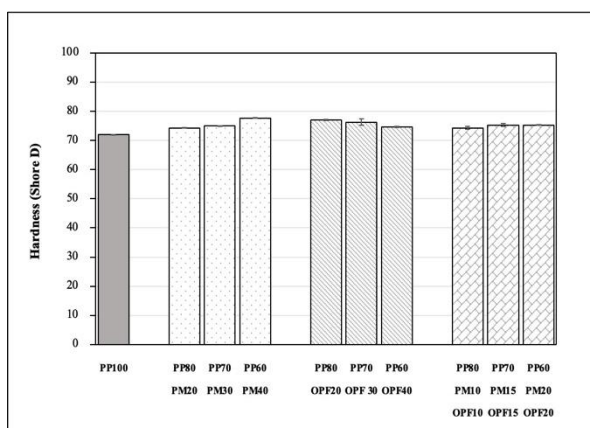
ภาพที่ 9 มอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบที่มีการแปร ปริมาณกะลาปาล์มและเส้นใยปาล์ม น้ำมัน

5.1.6 แรงยึดเหนี่ยวของสกรู ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของสกรูแสดงดังภาพที่ 10 พบว่าทุกสูตรมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 37–43 MPa โดย PP100 มีค่าแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด 43 MPa ขณะที่สูตรที่เติมสารเสริมแรงยังคงให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน แสดงถึงความสามารถในการยึดเกาะสกรูที่ดีของวัสดุเชิงประกอบ



ภาพที่ 10 แรงยึดเหนี่ยวสกรูของวัสดุเชิงประกอบที่มีการแปร ปริมาณกะลาปาล์มและเส้นใยปาล์ม น้ำมัน

5.1.7 ความแข็ง ผลการทดสอบความแข็งแสดงดังรูปที่ 11 พบว่า วัสดุเชิงประกอบทุกสูตรมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 72–77 Shore D โดยการเติมผงกะลาปาล์มน้ำมัน (PM) มีแนวโน้มทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเพิ่มปริมาณ PM จาก 20 เป็น 40 wt% ซึ่งสูตร PP60PM40 ให้ค่าความแข็งสูงที่สุดประมาณ 77 Shore D ขณะที่การเติมเส้นใยปาล์มน้ำมัน (OPF) และการเติม PM ร่วมกับ OPF ส่งผลให้ค่าความแข็งเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (PP100) โดยค่าความแข็งของทุกสูตรยังคงอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการเติมวัสดุชีวมวลในช่วงองค์ประกอบที่ศึกษายังไม่ส่งผลต่อความแข็งของวัสดุเชิงประกอบอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 11 ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบที่มีการแปรปริมาณกะลาปาล์มและเส้นใยปาล์มน้ำมัน

5.2 พัฒนวัสดุเชิงประกอบจากขยะพลาสติกผสมวัสดุชีวมวลสำหรับงานเฟอร์นิเจอร์

5.2.1 การเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบกับมาตรฐาน มอก. 966-2547 และ JIS A 5905 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบกับมาตรฐาน มอก. 966-2547 แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าทุกสูตรผ่านเกณฑ์ด้านการพองตัวตามความหนา (TSW) การดูดซึมน้ำ (WA) และความต้านทานแรงดัด (MOR) ขณะที่ไม่ผ่านเกณฑ์ด้านมอดูลัสยืดหยุ่น (MOE) และความหนาแน่น (Density) เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน JIS A 5905 ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าวัสดุเชิงประกอบส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดด้านการ

พองตัวตามความหนา (TSW) ความต้านทานแรงดัด (MOR) และมอดูลัสยืดหยุ่น (MOE) โดยมีเพียงสูตร PP70OPF30 ที่มีค่า MOE ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ขณะที่ทุกสูตรผ่านเกณฑ์ด้านความหนาแน่นตามมาตรฐาน JIS A 5905 ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวัสดุเชิงประกอบที่พัฒนาขึ้นมีสมบัติสอดคล้องกับข้อกำหนดของมาตรฐาน JIS A 5905

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 966-2547

สูตร	Density	WA	TSW	MOR	MOE
PP100	X	✓	✓	✓	X
PP80PM20	X	✓	✓	✓	X
PP70PM30	X	✓	✓	✓	X
PP60PM40	X	✓	✓	✓	X
PP80OPF20	X	✓	✓	✓	X
PP70OPF30	X	✓	✓	✓	X
PP60OPF40	X	✓	✓	✓	X
PP80PM10OPF10	X	✓	✓	✓	X
PP70PM15OPF15	X	✓	✓	✓	X
PP60PM20OPF20	X	✓	✓	✓	X

หมายเหตุ: ✓ = ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน,

X = ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม JIS A 5905

สูตร	Density	TSW	MOR	MOE
PP100	✓	✓	✓	✓
PP80PM20	✓	✓	✓	✓
PP70PM30	✓	✓	✓	✓
PP60PM40	✓	✓	✓	✓
PP80OPF20	✓	✓	✓	✓
PP70OPF30	✓	✓	✓	X
PP60OPF40	✓	✓	✓	✓
PP80PM10OPF10	✓	✓	✓	✓
PP70PM15OPF15	✓	✓	✓	✓

สูตร	Density	TSW	MOR	MOE
PP60PM20OPF20	✓	✓	✓	✓

6. สรุปผลและอภิปรายผล

6.1 สรุปผลการวิจัย การวิจัยนี้ศึกษาการใช้พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลร่วมกับผงกะลาปาล์มน้ำมัน (PM) และเส้นใยปาล์มน้ำมัน (OPF) เพื่อพัฒนาวัสดุเชิงประกอบสำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้ในงานเฟอร์นิเจอร์

6.1.1 ผลของชนิดและปริมาณวัสดุชีวมวลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ การเติม PM และ OPF ส่งผลให้ความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุชีวมวล โดยสูตร PP60PM40 ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 1.03 g/cm^3 และมีการดูดซึมน้ำสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม วัสดุเชิงประกอบทุกสูตรมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า 0.35% แสดงให้เห็นว่าวัสดุยังคงมีความสามารถในการต้านทานการดูดซึมน้ำได้ดี ค่าการพองตัวตามความหนาของวัสดุเชิงประกอบส่วนใหญ่อยู่ในระดับต่ำกว่า 1% โดยสูตร PP60PM20OPF20 ให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 1.79% ทั้งนี้วัสดุทุกสูตรมีค่าการพองตัวตามความหนาต่ำกว่า 2% แสดงให้เห็นถึงการคงรูปร่างที่ดีหลังการแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สำหรับสมบัติเชิงกล พบว่า PP100 ให้ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดประมาณ 50 MPa เมื่อเติมวัสดุชีวมวล ค่าความต้านทานแรงดัดโดยรวมมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม ในกลุ่มวัสดุเชิงประกอบ สูตร PP60PM40 ให้ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 43.81 MPa และให้ค่าสูงกว่าสูตรที่เติม OPF เพียงชนิดเดียวและสูตรที่เติม PM ร่วมกับ OPF ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 770-890 MPa และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุชีวมวล ขณะที่แรงยึดเหนี่ยวของสกรูของทุกสูตรมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 37-43 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับ PP100 แสดงให้เห็นว่าการเติมวัสดุชีวมวลไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการยึดเหนี่ยวของสกรู

6.1.2 การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบจากขยะพลาสติกและวัสดุชีวมวลสำหรับงานเฟอร์นิเจอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของวัสดุเชิงประกอบกับมาตรฐาน มอก. 966-2547

พบว่าวัสดุทุกสูตรผ่านเกณฑ์ด้านการดูดซึมน้ำ การพองตัวตามความหนา และความต้านทานแรงดัด แต่ไม่ผ่านเกณฑ์ด้านความหนาแน่นและมอดูลัสยืดหยุ่น เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน JIS A 5905 พบว่าวัสดุเชิงประกอบทุกสูตรผ่านเกณฑ์ด้านความหนาแน่น การพองตัวตามความหนา และความต้านทานแรงดัด ส่วนด้านมอดูลัสยืดหยุ่นพบว่าวัสดุเกือบทุกสูตรผ่านเกณฑ์ ยกเว้นสูตร PP70OPF30 จากผลการศึกษาทั้งหมด สูตร PP60PM40 เป็นสูตรที่มีศักยภาพสูงที่สุดในกลุ่มวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากให้ค่าความหนาแน่นและความต้านทานแรงดัดสูงสุด ขณะที่ยังคงมีการดูดซึมน้ำและการพองตัวตามความหนาอยู่ในระดับต่ำ จึงมีความเหมาะสมเบื้องต้นสำหรับนำไปพัฒนาต่อเป็นวัสดุทดแทนไม้สำหรับงานเฟอร์นิเจอร์และงานตกแต่งภายใน

6.2 อภิปรายผลการวิจัย

6.2.1 ผลของชนิดและปริมาณวัสดุชีวมวลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ การเพิ่มปริมาณ PM และ OPF ส่งผลให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสูตรที่มีปริมาณ PM สูงให้ค่าความหนาแน่นมากกว่าสูตรที่มี OPF ในสัดส่วนเดียวกัน ซึ่งอาจอธิบายได้จาก PM มีลักษณะเป็นอนุภาคแข็งและมีขนาดเล็กกว่า OPF จึงอาจสามารถจัดเรียงตัวภายในเมทริกซ์ได้แน่นกว่า ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาลักษณะทางจุลภาคของวัสดุ จึงไม่สามารถยืนยันการกระจายตัวหรือการลดลงของช่องว่างภายในโครงสร้างได้โดยตรง [6] การดูดซึมน้ำและการพองตัวตามความหนาที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมวัสดุชีวมวล เป็นผลมาจากองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของ PM และ OPF โดยเฉพาะเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่สามารถสร้างพันธะกับโมเลกุลน้ำได้ เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุชีวมวลจึงทำให้วัสดุมีตำแหน่งที่สามารถจับกับน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ช่องว่างระหว่างเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนกับวัสดุชีวมวลอาจเป็นเส้นทางให้น้ำแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างของวัสดุได้ง่ายขึ้น [7], [8], [9], [10], [11], [12] อย่างไรก็ตาม ค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า 0.35% และค่าการพองตัวตามความหนาต่ำกว่า 2% ของวัสดุทุกสูตรแสดงให้เห็นว่าเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลซึ่งมีสมบัติ

ไม่ชอบน้ำสามารถห่อหุ้มอนุภาคและเส้นใยชีวมวลได้ในระดับหนึ่ง จึงช่วยจำกัดการแทรกซึมของน้ำและรักษาเสถียรภาพทางมิติของวัสดุได้ดี การเติมวัสดุชีวมวลส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดัดของวัสดุส่วนใหญ่ต่ำกว่า PP100 ซึ่งเป็นผลที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง ส่วนสาเหตุที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดัดลดลงนั้น อาจเกี่ยวข้องกับ ความแตกต่างด้านสภาพผิวระหว่างพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีขั้วกับวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่มีขั้ว ทำให้การยึดเกาะระหว่างเฟสและการถ่ายโอนแรงมีประสิทธิภาพลดลง อย่างไรก็ตาม สมมติฐานดังกล่าวยังไม่ได้รับการยืนยันจากการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค เช่น SEM หรือการวิเคราะห์พื้นผิวการแตกหักเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง PM และ OPF พบว่า PM ให้ค่าความต้านทานแรงดัดสูงกว่า OPF ในทุกระดับของการเติมชีวมวล โดยเฉพาะสูตร PP60PM40 ซึ่งให้ค่า MOR สูงที่สุดในกลุ่มวัสดุเชิงประกอบ ขณะที่สูตรที่เติม OPF มีแนวโน้มให้ค่า MOR ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ผลดังกล่าวอาจสัมพันธ์กับลักษณะของ PM ที่เป็นอนุภาคแข็งและมีปริมาณลิกนินสูง ซึ่งสามารถรองรับแรงอัดและแรงดัดได้ดีกว่า ในขณะที่ OPF มีลักษณะเป็นเส้นใยที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงกว่า จึงอาจเกิดการเรียงตัวหรือการกระจุกตัวระหว่างการผสมได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพการรับและถ่ายโอนแรงลดลง ทั้งนี้ กลไกดังกล่าวเป็นเพียงข้อสันนิษฐานที่อ้างอิงจากแนวโน้มของผลการทดลองและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง [13-14] นอกจากนี้ อนุภาค PM ขนาด 80 mesh อาจมีการกระจายตัวในเมทริกซ์ได้สม่ำเสมอกว่าเส้นใย OPF ขนาด 40 mesh ในทางตรงกันข้าม การเพิ่ม OPF ทำให้ค่าความต้านทานแรงดัดมีแนวโน้มลดลง อาจเกิดจากการรวมตัวของเส้นใย การเปียกผิวของเส้นใยด้วยพอลิโพรพิลีนไม่สมบูรณ์ และการเกิดช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ โดยเฉพาะเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดจุดรวมความเค้นและทำให้วัสดุเสียหายได้ง่ายขึ้นภายใต้แรงดัด ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่ลดลงเมื่อเติม PM และ OPF สะท้อนให้เห็นว่าการเติมวัสดุชีวมวลในสภาวะที่ไม่มีสารช่วยยึดประสานอาจยังไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัจจัยสำคัญอาจมา

จากการยึดเกาะระหว่างเฟสและการกระจายตัวของวัสดุชีวมวล ดังนั้น การใช้สารช่วยยึดประสาน เช่น Maleic Anhydride-Grafted Polypropylene อาจช่วยปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างพอลิโพรพิลีนกับวัสดุชีวมวลและเพิ่มสมบัติเชิงกลของวัสดุได้ สำหรับแรงยึดเหนี่ยวของสกรูที่มีค่าใกล้เคียงกันในทุกสูตร แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบยังคงสามารถต้านทานแรงดึงออกของสกรูได้ แม้ว่าจะมีการเติม PM หรือ OPF สูงถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก สมบัตินี้มีความสำคัญต่อการนำวัสดุไปประกอบเป็นเฟอร์นิเจอร์ เนื่องจากวัสดุต้องสามารถรองรับการยึดติดด้วยสกรูหรืออุปกรณ์ยึดจับต่าง ๆ ได้ ผลการทดสอบความแข็งแบบชาร์ดี (Shore D Hardness) พบว่าค่าความแข็งของวัสดุทุกสูตรอยู่ในช่วงประมาณ 72–77 Shore D โดยมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ PP100 แสดงให้เห็นว่าการเติม PM และ OPF ในช่วงองค์ประกอบที่ศึกษายังไม่ส่งผลต่อความแข็งของวัสดุเชิงประกอบอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม สูตรที่มี PM ในปริมาณสูงมีแนวโน้มให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจสัมพันธ์กับลักษณะของ PM ที่เป็นอนุภาคแข็งและความแข็งมากกว่าเส้นใยพอลิเมอร์ ดังนั้น ความแตกต่างของค่าความแข็งที่พบยังอยู่ในช่วงแคบ จึงสะท้อนว่าการเติมวัสดุชีวมวลภายใต้สภาวะการผลิตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่มีผลต่อความแข็งของเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลอย่างเด่นชัด

6.2.2 ศักยภาพของวัสดุเชิงประกอบสำหรับใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้ในงานเฟอร์นิเจอร์ การที่วัสดุเชิงประกอบส่วนใหญ่ผ่านข้อกำหนดของมาตรฐาน JIS A 5905 ด้านความหนาแน่น การพองตัวตามความหนา ความต้านทานแรงดัดและมอดูลัสยืดหยุ่น แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่พัฒนาขึ้นมีสมบัติพื้นฐานใกล้เคียงกับวัสดุแผ่นใยไม้บางประเภท และมีศักยภาพสำหรับนำไปพัฒนาเป็นวัสดุทดแทนไม้ในงานเฟอร์นิเจอร์ที่ไม่รับภาระสูง เช่น แผ่นตกแต่ง แผ่นปิดผิวชั้นวางของหรือส่วนประกอบภายในเฟอร์นิเจอร์ อย่างไรก็ตาม วัสดุทุกสูตรยังไม่ผ่านเกณฑ์ความหนาแน่นและมอดูลัสยืดหยุ่นของมาตรฐาน มอก. 966-2547 จึงไม่ควรสรุปว่าวัสดุสามารถใช้ทดแทนแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลางได้

โดยสมบูรณ์ แต่ควรพิจารณาว่าเป็นการประเมินศักยภาพเบื้องต้นโดยใช้มาตรฐานดังกล่าวเป็นเกณฑ์อ้างอิง เนื่องจากวัสดุที่พัฒนาขึ้นเป็นวัสดุเชิงประกอบเทอร์มอพลาสติก มีใช้แผ่นใยไม้อัดที่ผลิตจากเส้นใยไม้และกาวประสานโดยตรง สูตร PP60PM40 มีความเหมาะสมมากที่สุดในกลุ่มวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากให้ค่าความต้านทานแรงดัดสูง มีความหนาแน่นมาก และยังคงมีเสถียรภาพทางมิติที่ดี อย่างไรก็ตาม ก่อนนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์จริง ควรมีการศึกษาสมบัติเพิ่มเติม ได้แก่ ความทนทานต่อแรงกระแทก การคืบ การสึกหรอ การทนต่อสภาพอากาศ การลามไฟ และความคงทนของการยึดสกรู รวมทั้งควรทดลองผลิตชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ต้นแบบเพื่อประเมินสมรรถนะภายใต้สภาวะการใช้งานจริง

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะในการวิจัย ควรศึกษาการใช้สารช่วยยึดประสานระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับวัสดุชีวมวล รวมถึงศึกษาสมบัติด้านความทนทานและการใช้งานระยะยาว เพื่อเพิ่มศักยภาพของวัสดุเชิงประกอบสำหรับการใช้งานจริง

7.2 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ วัสดุเชิงประกอบสูตร PP60PM40 มีศักยภาพสำหรับการพัฒนาเป็นวัสดุทดแทนไม้ในงานเฟอร์นิเจอร์และงานตกแต่งภายในที่ไม่รับภาระสูง โดยควรมีการผลิตชิ้นงานต้นแบบและทดสอบการใช้งานจริงก่อนนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Pilapitiya, P. N. T. and Ratnayake, A. S. 2024. "The world of plastic waste: A review," *Cleaner Materials*, 11: p. 100220. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>

- [2] Panthapulakkal, S. and Sain, M. 2007. "Agro-residue reinforced high-density polyethylene composites: Fiber characterization and analysis of composite properties," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(6): pp. 1445-1454. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.01.015>
- [3] Aisyah, H. A. and et al. 2024. "Oil palm fiber hybrid composites: A recent review," *Journal of Renewable Materials*, 12(10): pp. 1661-1689. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32604/jrm.2024.055217>
- [4] Gairola, S. P. and et al. 2025. "Analyze the mechanical properties of rice straw fiber mixed with polymer composite: A review," *Next Research*, p. 101125. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.101125>
- [5] *Medium Density Fibreboards (MDF)*, Thai Industrial Standard 966-2547, 2004. (in Thai)
- [6] *Fiberboards*, Japanese Industrial Standard A 5905:2014, 2014.
- [7] Aisyah, H. A. and et al. 2026. "Enhancements in oil palm fiber for composite material development," *Journal of Renewable Materials*, 14(3): pp. 1-23. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32604/jrm.2025.02025-0141>
- [8] Cheewawuttipong, W., Homkhiew, C. and Rawangwong, S. 2022. "A comparative study on the effect of oil palm fiber contents and types on properties of rubberwood sawdust-polypropylene composites," *RMUTSV Research Journal*, 14(1): pp. 31-46. [Online]. Available: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsvrj/article/view/242810> (in Thai)

- [9] Fang, T. W. and et al. 2017. "Water absorption and thickness swelling of oil palm empty fruit bunch (OPEFB) and seaweed composite for soil erosion mitigation," *Journal of Physical Science*, 28(2): pp. 1-17. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21315/jps2017.28.2.1>
- [10] Almeida-Naranjo, C. E. and et al. 2022. "Water absorption behavior of oil palm empty fruit bunch (OPEFB) and oil palm kernel shell (OPKS) as fillers in acrylic thermoplastic composites," *Materials*, 15(14): pp. 1-17. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ma15144854>
- [11] Shibata, S., Senaha, I. and Abrial, H. 2014. "Effect of time-dependent moisture absorption on surface roughness of bagasse and oil palm fibers/polypropylene composites," *BioResources*, 9(3): pp. 4430-4440. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15376/biores.9.3.4430-4440>
- [12] Lee, C. L. and et al. 2023. "Characterisation of polypropylene composite reinforced with chemi-thermomechanical pulp from oil palm trunk via injection moulding process," *Polymers*, 15(6): pp. 1-21. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym15061400>
- [13] Kayaba, A. M. and et al. 2025. "Synergistic effects of micro- and macro-sized palm kernel shell fillers on the tensile properties of HDPE composites," *Royal Society Open Science*, 12(7): pp. 1-9. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1098/rsos.241911>
- [14] Chima, E. and et al. 2025. "Development of composite materials using agricultural waste: Emphasis on palm kernel shell (PKS) as reinforcing agent – A contextual review," *SSR*
- Journal of Arts, Humanities and Social Sciences*, 2(10): pp. 24-34. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17476226>

การเปรียบเทียบวิธีประมาณกำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มตอกจากผลทดสอบที่ไม่ถึงจุดวิบัติ COMPARISON OF ESTIMATION METHODS FOR ULTIMATE BEARING CAPACITY OF DRIVEN PILES BASED ON NON-FAILED LOAD TESTS

พัทธดนย์ ทองด้วง^{1*}, ภาณุ พร้อมพุทธานุกร²

Phattadon Thongduang^{1*}, Panu Promputthangkoon²

¹ นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Graduate Student, Master of Engineering Program, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Lecturer, Master of Engineering Program, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ Corresponding author; E-mail Address: phattadonpoom88@gmail.com

วันที่รับบทความ: 28 มิถุนายน 2569 ; วันที่ทบทวนบทความ: 11 กรกฎาคม 2569 ; วันที่ตอบรับบทความ: 28 สิงหาคม 2569 ;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 31 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มมักใช้เสาเข็มทดสอบ เพื่อประเมินพฤติกรรมของเสาเข็มภายใต้สภาพชั้นดินจริง และในทางปฏิบัติมักทำการทดสอบถึงระดับน้ำหนักที่กำหนดซึ่งยังไม่แสดงจุดวิบัติของเสาเข็มอย่างชัดเจน จึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีการตีความผลการทดสอบเพื่อประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินและเปรียบเทียบวิธีประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกจากข้อมูลภาคสนามของโครงการก่อสร้างทางหลวง แยกทางหลวงหมายเลข 4 – ด้านสะเดาแห่งที่ 2 ตอน 1 จังหวัดสงขลา โดยใช้ข้อมูลเสาเข็มทดสอบจำนวน 5 ต้น ประกอบด้วยข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน ข้อมูลการตอกเสาเข็ม และผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตในสนาม การวิเคราะห์ดำเนินการด้วย 1) วิธีสถิตยศาสตร์ 2) วิธีตีความผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตหลายวิธีซึ่งนำไปสู่ 3) วิธีแบบผสม และ 4) วิธีพลศาสตร์ ผลการศึกษาพบว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่ได้จากแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันตามหลักการวิเคราะห์และข้อมูลตั้งต้นของแต่ละวิธี โดยวิธีสถิตยศาสตร์ให้ค่าประมาณค่อนข้างต่ำและมีลักษณะค่อนข้างอนุรักษ์นิยมซึ่งให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยอยู่ในช่วง 122.75–142.95 ตัน ขณะที่วิธีแบบผสมให้ค่าประมาณในช่วง 132.46–177.84 ตัน จึงสามารถใช้เป็นทางเลือกในการประเมินร่วมกับวิธีอื่น ส่วนวิธีพลศาสตร์ให้ค่าสูงที่สุด ซึ่งสะท้อนอิทธิพลของสมมติฐานด้านพลังงานและสภาพการตอกเสาเข็ม โดย Hiley formula ให้ค่าอยู่ในช่วง 206.54–273.67 ตัน และ Engineering news formula ให้ค่าอยู่ในช่วง 181.82–210.53 ตัน ดังนั้น การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกไม่ควรพิจารณาจากวิธีใดวิธีหนึ่งเพียงวิธีเดียว แต่ควรใช้หลายวิธีร่วมกันเพื่อประกอบการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมภายใต้ข้อจำกัดของข้อมูลภาคสนาม

คำสำคัญ: เสาเข็มตอก, การทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิต, วิธีสถิตยศาสตร์, กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย

Abstract: Pile load testing is commonly conducted using test piles to evaluate pile behavior under actual soil conditions. In practice, these tests are often performed only up to a specified proof load level at which the ultimate failure point is not clearly observed, thereby requiring interpretation methods to estimate the ultimate bearing capacity. This study aims to assess and compare methods for estimating the ultimate bearing capacity of driven piles and to propose an approach for joint interpretation of the results. Field data from five test piles in the Highway No. 4–Sadao Border Checkpoint 2 Interchange Project (Section 1), Songkhla Province, were analyzed. The dataset comprised soil investigation results, pile driving records, and field static pile load test results. The evaluation comprised four approaches: (1) static method, (2) interpretation of static load test results using various methods, (3) a proposed combined method based on selected interpretation methods, and (4) dynamic method. The results indicated that the estimated ultimate bearing capacities varied according to the analytical principles and input data of each approach. The static analytical method generally produced relatively low and conservative estimates, ranging from 122.75 to 142.95 tons. The proposed combined method produced intermediate estimates ranging from 132.46 to 177.84 tons serving as a complementary approach when used with other methods. Dynamic methods yielded higher estimates, reflecting the influence of energy assumptions and pile driving conditions. the Hiley formula produced values ranging from 206.54 to 273.67 tons, whereas the Engineering news formula yielded values ranging from 181.82 to 210.53 tons. These findings indicate that the ultimate bearing capacity of driven piles should not be evaluated using a single method alone. Instead, multiple methods should be considered together to support engineering judgment under the limitations of field data.

Keywords: Driven Piles, Static Pile Load Test, Static Method, Ultimate Bearing Capacity

1. บทนำ

ฐานรากเสาเข็มเป็นองค์ประกอบสำคัญของโครงสร้างที่ทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักของโครงสร้างลงสู่ชั้นดินที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักเพียงพอ ดังนั้นการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มจึงมีความสำคัญต่อความมั่นคงและความปลอดภัยของโครงสร้าง การพิจารณากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มจึงควรอาศัยทั้งข้อมูลการสำรวจชั้นดินและผลการทดสอบในสนามประกอบกันเพื่อความปลอดภัย การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีสถิตยศาสตร์ วิธีพลศาสตร์ และการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในสนาม ซึ่งแต่ละวิธีมีหลักการและข้อสมมติแตกต่างกัน

วิธีสถิตยศาสตร์อาศัยข้อมูลชั้นดินและพารามิเตอร์ทางปฐพีวิศวกรรม วิธีทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตสะท้อนพฤติกรรมการรับน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็มภายใต้สภาพชั้นดินจริงได้โดยตรง แต่ในทางปฏิบัติ การทดสอบมักดำเนินการถึงระดับน้ำหนักที่กำหนดตามข้อกำหนดของโครงการ ซึ่งไม่ได้ถึงจุดวิกฤติของเสาเข็มอย่างชัดเจน ส่งผลให้ต้องใช้วิธีการตีความกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวเพื่อประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ขณะที่วิธีพลศาสตร์อาศัยข้อมูลการตอกเสาเข็มและแนวคิดด้านพลังงานในการประเมิน

อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากแต่ละวิธีมักแตกต่างกันตามหลักการและสมมติฐานที่ใช้ จึงควรมีการเปรียบเทียบผลจาก

หลายวิธีเพื่อให้ได้ค่าประเมินที่เหมาะสมและสอดคล้องกับสภาพภาคสนาม จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มจากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบสถิต (Static Pile Load Test) พบว่า วิธีตีความที่แตกต่างกันสามารถให้ค่าประมาณแตกต่างกันอย่างชัดเจน แม้ใช้ข้อมูลการทดสอบชุดเดียวกัน [1] ในทำนองเดียวกันการตีความกราฟ Load-settlement ด้วยวิธีต่างกันสามารถให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยบางวิธีมีแนวโน้มให้ค่าค่อนข้างสูง บางวิธีให้ค่าค่อนข้างต่ำ และบางวิธีเหมาะสำหรับใช้เป็นค่าประกอบการเปรียบเทียบมากกว่าการใช้เป็นค่าหลักเพียงวิธีเดียว [2], [3], [4], [5], [6]

สำหรับกรณีผลการทดสอบที่ยังไม่ถึงจุดวิบัติหรือ (Non-failed load test) พบว่า ความแม่นยำของวิธีการประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation) ขึ้นอยู่กับลักษณะของกราฟ Load-settlement จำนวนจุดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ และระดับน้ำหนักสูงสุดที่ทดสอบเมื่อเทียบกับกำลังรับน้ำหนักจริง [7], [8] พบว่า วิธี Extrapolation แต่ละวิธีมีความแม่นยำแตกต่างกัน และเมื่อใช้ข้อมูลช่วงท้ายของกราฟมากขึ้น ผลการประมาณค่ามีแนวโน้มแม่นยำขึ้นและมีการกระจายตัวลดลง ขณะที่ [9], [10] ชี้ให้เห็นว่า หากใช้ข้อมูลเพียงบางส่วนของกราฟ หรือข้อมูลที่ยังอยู่ห่างจากจุดวิบัติค่าที่ได้จากการประมาณอาจมีความแปรปรวนสูงขึ้น และบางวิธีอาจไม่เหมาะสมหากข้อมูลยังไม่ผ่านช่วงเปลี่ยนพฤติกรรมของกราฟอย่างชัดเจน ในส่วนของการเปรียบเทียบผลจากวิธีวิเคราะห์หลายแนวทาง [11], [12], [13], [14], [15], [16] สะท้อนให้เห็นว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ได้จากวิธีสถิตยศาสตร์ วิธีพลศาสตร์ และผลการทดสอบในสนามอาจแตกต่างกันตามชนิดของเสาเข็ม สภาพชั้นดิน วิธีทดสอบ ข้อมูลการตอกเสาเข็ม และสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ โดยหลายงานเสนอว่าการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มควรพิจารณาข้อมูลหลายแหล่งร่วมกันไม่ควรอาศัยผลจากวิธีใดวิธีหนึ่งเพียงวิธีเดียว นอกจากนี้ในชั้นดินเหนียวกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกอาจมี

แนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาหลังการตอกอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์การฟื้นคืนกำลังของเสาเข็ม (Pile Setup) [15], [16], [17] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการศึกษาในโครงการนี้ไม่มีข้อมูลการทดสอบซ้ำตามช่วงเวลา (Restrike/Retest) ปัจจุบัน Pile Setup จึงถูกนำมาพิจารณาในลักษณะการวิเคราะห์ความไวเชิงสมมติฐาน (Sensitivity Analysis) เพื่อเป็นประเด็นอภิปรายประกอบพฤติกรรมของเสาเข็มในดินเหนียวเท่านั้น มิได้มุ่งเน้นการประเมินเชิงปริมาณโดยตรงจากสภาพสนาม [18], [19]

งานวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินและเปรียบเทียบวิธีประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกจากข้อมูลภาคสนามของโครงการก่อสร้างทางหลวง แยกทางหลวงหมายเลข 4 – ด้านสะเดาแห่งที่ 2 ตอน 1 จังหวัดสงขลา โดยใช้ข้อมูลจากเสาเข็มทดสอบ 5 ต้น เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบผลจากวิธีสถิตยศาสตร์ วิธีตีความผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตหลายวิธีซึ่งนำไปสู่การประเมินแบบผสม และวิธีพลศาสตร์

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 ศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก

2.2 ประเมินวิธีต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกจากข้อมูลการทดสอบจริง

2.3 เปรียบเทียบความแตกต่างของค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่ได้จากแต่ละวิธี และเสนอแนะแนวทางในการเลือกใช้วิธีวิเคราะห์

2.4 พิจารณานวทางการวิเคราะห์ผลจากหลายวิธีเพื่อใช้ประกอบการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มจากข้อมูลภาคสนาม

3. ขอบเขตการวิจัย

3.1 งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเฉพาะการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก โดยวิเคราะห์ ข้อมูลจากโครงการก่อสร้างทางหลวง แยกทางหลวงหมายเลข 4 – ด้านสะเดาแห่งที่ 2 ตอน 1 จังหวัดสงขลา จำนวน 5 ต้น

ประกอบไปด้วยข้อมูลผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring Log) [20] ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนาม (Static Pile Load Test) [21] และข้อมูลการตอกเสาเข็ม

3.2 การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ใช้วิธีการหลัก 3 วิธี ได้แก่ วิธีสถิตยศาสตร์ (Static Method) วิธีทดสอบในสนาม Pile Load Test และวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Method) และนำเสนอวิธีแบบผสม (Combined method for Estimating Ultimate Pile Capacity)

3.3 งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของ เสาเข็มจากวิธีต่าง ๆ ภายใต้ข้อมูลของโครงการศึกษา มิได้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดเป็นค่ามาตรฐาน ทัวไปสำหรับเสาเข็มตอกในทุกสภาพชั้นดินหรือทุกโครงการ

จากขอบเขตดังกล่าว ผู้วิจัยนำข้อมูลภาคสนามมาวิเคราะห์เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกจากหลายวิธี เพื่อพิจารณาแนวโน้ม ความแตกต่าง และความเหมาะสมของแต่ละวิธีสำหรับใช้ประกอบการประเมินเชิงวิศวกรรมภายใต้ข้อมูลของโครงการศึกษา

4. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลภาคสนามของโครงการก่อสร้างทางหลวง แยกทางหลวงหมายเลข 4 – ด้านสะเดาแห่งที่ 2 ตอน 1 จังหวัดสงขลา เพื่อประเมินและเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกจากวิธีวิเคราะห์ต่าง ๆ ได้แก่ วิธีสถิตยศาสตร์ วิธีตีความผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิต วิธีแบบผสม และวิธีพลศาสตร์โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้



ภาพที่ 1 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในสนาม

4.1 การรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยข้อมูลเสาเข็มทดสอบจำนวน 5 ต้น ได้แก่ TP-1 ถึง TP-5 โดยข้อมูลที่นำมาใช้วิเคราะห์ประกอบด้วย 1) ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน เพื่อใช้พิจารณาลักษณะชั้นดินและค่าพารามิเตอร์ทางปฐพีวิศวกรรม 2) ข้อมูลการตอกเสาเข็ม ได้แก่ น้ำหนักลูกตุ้ม ระยะยก และระยะจมของเสาเข็มจากการตอกช่วงท้าย และ 3) ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตในสนาม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็ม

ตารางที่ 1 รายละเอียดของเสาเข็มทดสอบ 5 ต้น

เสาเข็มทดสอบ	TP-1	TP-2	TP-3	TP-4	TP-5
น้ำหนักลูกตุ้ม (ตัน)	6	6	6	6	6
ระยะยก (เมตร)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ระยะจมในดิน (เมตร)	7.30	4.53	6.55	6.70	9.00
ระยะจม 10 ครั้ง					
สุดท้าย เซนติเมตร)	8	4	4	3.5	5

ที่มา: บริษัท เจ เอ พี วิศวกรรม จำกัด, 2564

ตารางที่ 2 สรุปพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับวิธีสถิตยศาสตร์

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	หน่วย
ความลึกของชั้นดิน	Depth	m
จำนวนครั้งการตอกเพื่อใช้	SPT-N	blows/ft
เป็นดัชนีความแน่นของดิน		
หน่วยน้ำหนักของดิน	γ	ton/m ³
กำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ	S_u	ton/m ²
ค่าสัมประสิทธิ์ยึดเกาะ	α	-

ที่มา: ผู้วิจัยเรียบเรียงจากรายงานผลการเจาะสำรวจดินของโครงการ

ตารางที่ 3 รายละเอียดผลการทดสอบของเสาเข็ม

รายละเอียด	การเคลื่อนตัวของเสาเข็ม (มิลลิเมตร)				
	TP-1	TP-2	TP-3	TP-4	TP-5
ค่าการทรุดตัวที่					
60 ต้น	0.76	1.65	1.47	2.24	1.93
ค่าการทรุดตัวที่					
120 ต้น	3.76	6.62	6.61	7.76	14.19
ค่าการคืบตัว	1.39	3.65	3.80	2.85	7.87
ค่าการทรุดตัว					
ถาวร	2.37	2.97	2.81	4.91	6.32

ที่มา: ผู้วิจัยเรียบเรียงจากรายงานการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม ของโครงการ

4.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ (Static Method) การวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ดำเนินการโดยใช้ข้อมูลจากการเจาะสำรวจชั้นดินและค่าพารามิเตอร์ทางวิศวกรรมของดินตามตารางที่ 2 โดยแรงต้านทานตามผิวเสาเข็มคำนวณด้วยวิธีแอลฟา (α -method) ซึ่งพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนไม่ระบายน้ำของดินกับแรงยึดเกาะระหว่างดินและผิวเสาเข็ม สำหรับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มคำนวณจากผลรวมของแรงต้านทานตามผิวเสาเข็มและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม แล้วหักด้วยน้ำหนักของเสาเข็ม ดังสมการ

$$Q_{ult} = Q_f + Q_e - W_p \dots\dots\dots(1)$$

$$Q_f = \sum \alpha S_u A_s \dots\dots\dots(2)$$

$$Q_e = N_c S_u A_p \dots\dots\dots(3)$$

โดยที่

Q_{ult} แทน กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม

Q_f แทน แรงต้านทานตามผิวเสาเข็ม

Q_e แทน แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

W_p แทน น้ำหนักของเสาเข็ม

α แทน ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ (Adhesion Factor)

S_u แทน ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

A_s แทน พื้นที่ผิวเสาเข็มในชั้นดิน

N_c แทน สัมประสิทธิ์กำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็ม

A_p แทน พื้นที่หน้าตัดของปลายเสาเข็ม

นอกจากนี้ งานวิจัยได้พิจารณาอิทธิพลของ Pile setup ประกอบการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ เนื่องจากเสาเข็มตอกในชั้นดินเหนียวอาจมีกำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาหลังการตอก โดยเฉพาะในส่วนของแรงต้านทานตามผิวเสาเข็ม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้มีข้อมูลการทดสอบซ้ำหลายช่วงเวลาหลังการตอก จึงพิจารณาการฟื้นคืนกำลังของเสาเข็มในลักษณะเชิงเปรียบเทียบ โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มขึ้นของแรงต้านทานตามผิวเสาเข็ม แล้วนำมาใช้ปรับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยจากวิธีสถิตยศาสตร์โดย $\lambda_{setup} = 1.00$ กรณีอ้างอิง (Base Case), 1.25 กรณีเพิ่มเล็กน้อย (Conservative) และ 1.50 กรณีเพิ่มในระดับปานกลาง (Moderate) ดังสมการที่ 4

$$Q_{ult,setup} = \lambda_{setup} Q_{skin} + Q_{end} - W_p \dots\dots\dots(4)$$

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิต (Static Pile Load Test) ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตของเสาเข็มแต่ละต้นถูกนำมาจัดทำเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุด จากนั้นตีความค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยด้วยวิธีต่าง ๆ จำนวน 9 วิธี ได้แก่ Davisson Offset Limit, Brinch Hansen, Mazurkiewicz, Chin-Kondner, De Beer, Decourt, Van der Veen, Fuller and Hoy และ Butler and Hoy [22-31] การใช้หลายวิธีมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าที่ได้จากหลักการตีความที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะกรณีที่เกิดการทดสอบยังไม่แสดงจุดวิบัติของเสาเข็มอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4 วิธีตีความผลการทดสอบแบบสถิต

ชื่อวิธีตีความ	กลุ่มวิธีในการตีความ
Davisson Offset Limit	เกณฑ์การทรุดตัว/เส้นอ้างอิง
Brinch Hansen 80% Criterion	แปลงรูปข้อมูล/ประมาณค่า
Chin-Kondner	แปลงรูปข้อมูล/ประมาณค่า

ชื่อวิธีตีความ	กลุ่มวิธีในการตีความ
Decourt	แปลงรูปข้อมูล/ประมาณค่า
Van der Veen	แปลงรูปข้อมูล/ประมาณค่า
Mazurkiewicz	เชิงกราฟิก
De Beer	เชิงกราฟิกจากกราฟ log-log
Fuller and Hoy	เชิงกราฟิก/เส้นสัมผัส
Butler and Hoy	เชิงกราฟิก/เส้นสัมผัสและจุดตัด

4.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบผสม (Combined Method for Estimating Ultimate Pile Capacity)

การวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบผสมเป็นการนำผลการตีความค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากวิธีที่มีความเหมาะสมมาพิจารณาร่วมกัน เพื่อลดการพึ่งพาจากวิธีใดวิธีหนึ่งเพียงวิธีเดียว โดยพิจารณาคัดเลือกวิธีจากความเหมาะสมของผลลัพธ์ ความสอดคล้องกับพฤติกรรมการทรุดตัวและความสามารถในการใช้ตีความข้อมูลการทดสอบของโครงการศึกษา

4.4.1 เกณฑ์การคัดเลือกวิธีและการให้คะแนน การคัดเลือกวิธีที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์แบบผสมพิจารณาจากเกณฑ์ 4 ด้าน ได้แก่ 1) ความเหมาะสมกับกรณีที่ผลทดสอบยังไม่ถึงจุดวิบัติ 2) ความสอดคล้องกับพฤติกรรมการทรุดตัวจากกราฟ Load-settlement 3) ความเสถียรของผลลัพธ์ และ 4) ความชัดเจนของกราฟหรือความเหมาะสมของการแปลงรูปข้อมูล แต่ละเกณฑ์กำหนดคะแนนตั้งแต่ 1 ถึง 5 โดยคะแนนสูงแสดงถึงความเหมาะสมมากกว่า จากนั้นนำคะแนนรวมของแต่ละวิธีไปคำนวณเป็นค่าน้ำหนักสำหรับใช้ในการวิเคราะห์แบบผสม

ผลที่ได้ใช้เป็นค่าประมาณเชิงเปรียบเทียบสำหรับประกอบการพิจารณาความเหมาะสมของวิธีวิเคราะห์ภายใต้ข้อมูลของโครงการศึกษา โดยใช้สมการที่ 5

$$Q_{u,CM} = \sum_{i=1}^n w_i Q_i \dots \dots \dots (5)$$

โดยที่

$Q_{u,CM}$ แทน ค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มตามวิธีแบบผสม

Q_i แทน ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มจากวิธีที่ i

w_i แทน ค่าน้ำหนักของวิธีที่ i

n แทน จำนวนวิธีที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ผล

ทั้งนี้ ค่าน้ำหนักของแต่ละวิธีกำหนดภายใต้เงื่อนไข

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1.00 \dots \dots \dots (6)$$

เพื่อให้การกำหนดค่าน้ำหนักมีเหตุผลรองรับจึงนำคะแนนรวมของแต่ละวิธีมาแปลงเป็นค่าน้ำหนักตามสัดส่วนของคะแนนรวมทั้งหมด ดังสมการที่ 7

$$w_i = \frac{Score_i}{\sum_{i=1}^n Score_i} \dots \dots \dots (7)$$

โดยที่

$Score_i$ แทน คะแนนรวมของวิธีที่ i

$\sum Score_i$ แทน ผลรวมคะแนนของทุกวิธีที่นำมาวิเคราะห์

4.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Method)

การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ดำเนินการโดยใช้ข้อมูลการตอกเสาเข็มของเสาเข็มทดสอบแต่ละต้น ได้แก่ น้ำหนักลูกตุ้ม ระยะยก และระยะจมของเสาเข็มจากการตอกช่วงท้าย เพื่อนำมาประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มด้วยสูตรพลศาสตร์ในการศึกษานี้ใช้ Hiley Formula เป็นสูตรที่พิจารณาประสิทธิภาพของระบบตอก การสูญเสียพลังงาน และการยุบตัวเชิงยืดหยุ่นของระบบตอกเสาเข็มและ Engineering news formula พิจารณาจากพลังงานของลูกตุ้มและระยะจมของเสาเข็มต่อการตอกหนึ่งครั้ง

Hiley formula

$$Q_u = \left[\frac{e_h W H}{\left(s + \frac{C_c + C_p + C_q}{2} \right)} \right] \left[\frac{W + n^2 P}{W + P} \right] \dots \dots \dots (8)$$

โดยที่

Q_u แทน กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม

e_h แทน ประสิทธิภาพของค้อนตอก

n	แทน Coefficient of Restitution
C_c	แทน Elastic Compression of Cap Block and Pile Cap
C_p	แทน Elastic Compression of Pile
C_q	แทน Elastic Compression of Soil
s	แทน ระยะที่หัวเสาเข็มจมต่อการตอกหนึ่งครั้งโดยคิดเฉลี่ยจากการตอก 10 ครั้งสุดท้าย
W	แทน น้ำหนักของลูกตุ้ม
H	แทน ระยะยก
P	แทน น้ำหนักเสาเข็ม
A	แทน พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม
L	แทน ความยาวเสาเข็ม

Engineering news formula

$$Q_u = \frac{W \cdot h}{(s+25)} \dots \dots \dots (9)$$

โดยที่

Q_u	แทน กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม
W	แทน น้ำหนักของลูกตุ้ม
h	แทน ระยะยกของลูกตุ้ม
s	แทน ระยะที่หัวเสาเข็มยุบตัวต่อการตอกหนึ่งครั้งโดยคิดเฉลี่ยการตอก 10 ครั้งสุดท้าย

สมการนี้มักจะเป็นที่นิยมใช้ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเมื่อตอกถึงระดับที่ต้องการแล้วค่าที่ได้จะเป็นค่าโดยประมาณ

ค่าที่ได้จากสูตรพลศาสตร์อาจได้รับอิทธิพลจากสมมติฐานด้านพลังงาน ประสิทธิภาพของระบบตอก ระยะจมของเสาเข็ม และสภาพการตอกในสนาม จึงต้องนำไปเปรียบเทียบกับอีกหลายวิธี

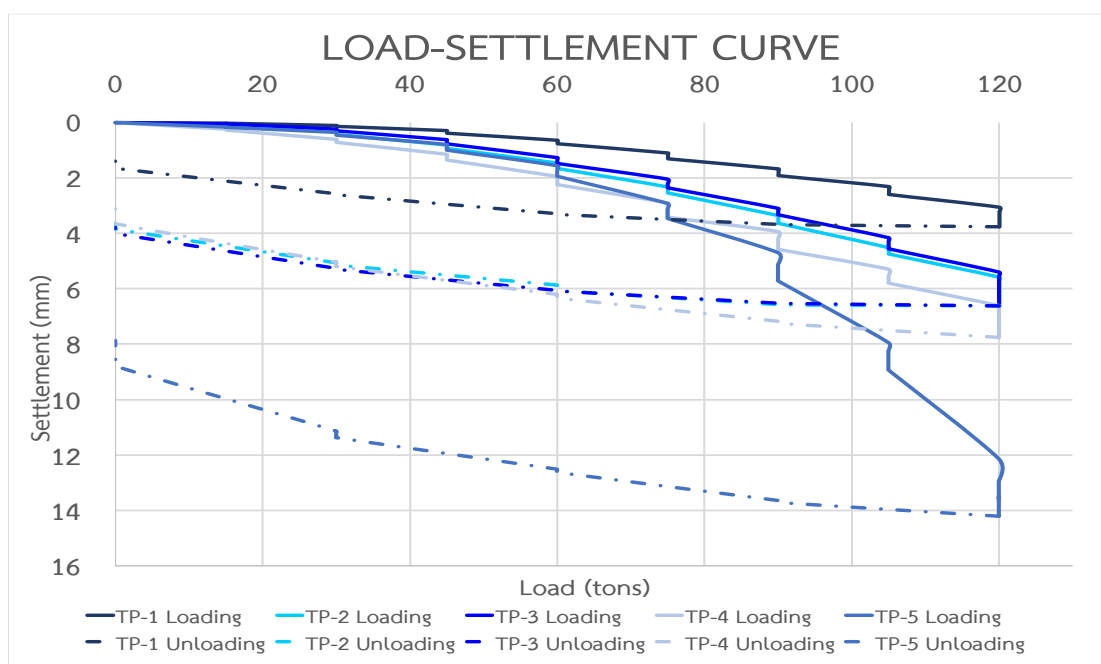
4.6 การเปรียบเทียบและสรุปผลการวิเคราะห์ จากการคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มจากวิธีสถิตยศาสตร์ วิธีตีความผลการทดสอบกำลังรับ

น้ำหนักแบบสถิต วิธีแบบผสม และวิธีพลศาสตร์แล้ว ผู้วิจัยนำผลที่ได้จากแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบระหว่างเสาเข็มทดสอบแต่ละต้น เพื่อพิจารณาช่วงค่าประมาณแนวโน้มความแตกต่าง และความสอดคล้องของผลลัพธ์จากแต่ละวิธี จากนั้นจึงนำผลการเปรียบเทียบมาใช้ประกอบการพิจารณานำเสนอวิธีประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกภายใต้ข้อมูลภาคสนามของโครงการศึกษา

5. ผลการวิจัย

5.1 ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิต (Static Pile Load Test) การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตดำเนินการตามขั้นตอนที่ระบุในรายงานการทดสอบของโครงการ ซึ่งรายงานระบุว่าอ้างอิง ASTM 1143-83 และใช้วิธี Standard load test โดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเป็นลำดับขั้นจนถึงร้อยละ 200 ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ หรือ 120 ตัน ทั้งนี้มาตรฐาน ASTM ที่เกี่ยวข้องในปัจจุบันคือ ASTM D1143/D1143M-26 [32]

ผลการทดสอบถูกนำมาจัดทำเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวในภาพที่ 2 และสรุปตารางที่ 3 เพื่อใช้พิจารณาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการตีความ



ภาพที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว (Load-Settlement Curve) ของเสาเข็มทดสอบ TP-1 ถึง TP-5 แยกตามช่วงเพิ่มน้ำหนัก (เส้นทึบ) และช่วงถอนน้ำหนัก (เส้นประ)

จากภาพที่ 2 แสดงพฤติกรรมการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบ TP-1 ถึง TP-5 ทั้งในช่วงเพิ่มน้ำหนัก (Loading Phase) และช่วงถอนน้ำหนักบรรทุก (Unloading Phase) โดยที่ระดับน้ำหนักทดสอบสูงสุด 120 ตัน เสาเข็ม TP-1 มีค่าการทรุดตัวต่ำที่สุดเท่ากับ 3.76 มิลลิเมตร TP-2, TP-3 และ TP-4 มีค่าการทรุดตัวอยู่ในช่วง 6.61–7.76 มิลลิเมตร ขณะที่ TP-5 มีค่าการทรุดตัวสูงที่สุดเท่ากับ 14.19 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มแต่ละต้นมีพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงบรรทุกแตกต่างกันตามสภาพชั้นดินและระดับความลึกที่ฝัง อย่างไรก็ตาม กราฟ Load-settlement ในช่วง Loading ยังไม่ปรากฏจุดเลี้ยวเบนที่แสดงถึงการวิบัติอย่างเด่นชัด ทั้งนี้ ในการนำข้อมูลไปประเมินและตีความค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยด้วยวิธีต่าง ๆ ในการศึกษาจะใช้เฉพาะข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวในช่วงเพิ่มน้ำหนัก (Loading phase) เป็นหลัก ตามระเบียบวิธีวิเคราะห์

5.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตยศาสตร์ (Static Method) และการพิจารณา Pile Setup ผลการ

วิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตยศาสตร์พบว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มทดสอบอยู่ในช่วง 122.75–142.95 ตัน โดย TP-3 ให้ค่าสูงที่สุด เท่ากับ 142.95 ตัน ขณะที่ TP-4 ให้ค่าค่อนข้างต่ำเท่ากับ 122.75 ตัน แสดงให้เห็นว่าสภาพชั้นดินและความลึกฝังของเสาเข็มแต่ละตำแหน่งมีผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักที่คำนวณได้

ตารางที่ 5 การคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีสถิตยศาสตร์

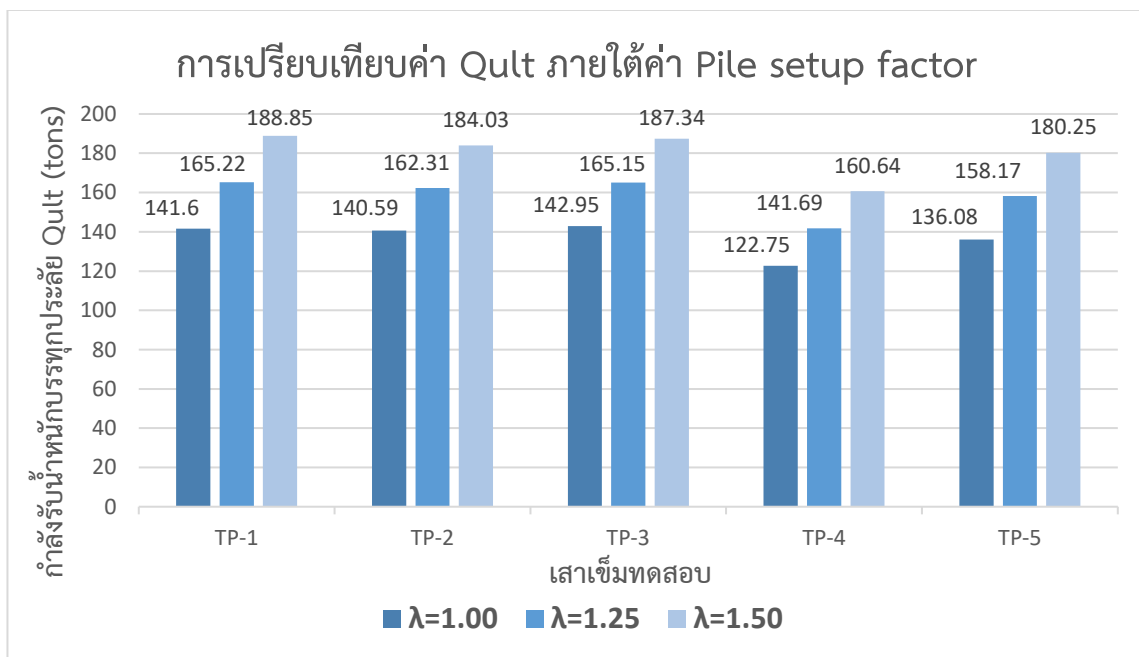
เสาเข็ม	Q_f (ตัน)	Q_e (ตัน)	W_p (ตัน)	Q_{ult} (ตัน)
TP-1	94.49	49.92	2.80	141.60
TP-2	86.88	55.45	1.74	140.59
TP-3	88.78	56.69	2.52	142.95
TP-4	75.77	49.55	2.57	122.75
TP-5	88.34	51.19	3.46	136.08

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของ Pile setup ในเชิงเปรียบเทียบ โดยกำหนดค่า $\lambda_{setup} = 1.00$ 1.25 และ 1.50 พบว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มทุกต้นเพิ่มขึ้น

ตามค่า λ เนื่องจากมีผลต่อแรงต้านทานตามผิวเสาเข็มเป็นหลัก อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์เชิงสมมติฐานเพื่อพิจารณาแนวโน้มของการฟื้นคืนกำลังของเสาเข็ม เท่านั้น ไม่ใช่ค่าที่ได้จากการทดสอบการฟื้นคืนกำลังของเสาเข็มโดยตรง

ตารางที่ 6 ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากวิธีสถิตยศาสตร์และการพิจารณา Pile Setup

เสาเข็ม	$\lambda=1.00$	$\lambda=1.25$	$\lambda=1.50$
ทดสอบ	(ตัน)	(ตัน)	(ตัน)
TP-1	141.60	165.22	188.85
TP-2	140.59	162.31	184.03
TP-3	142.95	165.15	187.34
TP-4	122.75	141.69	160.64
TP-5	136.08	158.17	180.25



ภาพที่ 3 เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากวิธีสถิตยศาสตร์ภายใต้ค่า Pile Setup Factor

5.3 ผลการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากวิธีตีความ Static Pile Load Test 9 วิธี จากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตและกราฟ Load – settlement curve กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มนำมาประมาณค่าด้วยวิธีต่าง ๆ จำนวน 9 วิธี พบว่าค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่ได้มีความแตกต่างกันตามหลักการตีความของแต่ละวิธี แม้ใช้ข้อมูลการทดสอบชุดเดียวกัน โดยผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากวิธีตีความผล Static Pile Load Test 9 วิธี

วิธีตีความ	TP-1 (ตัน)	TP-2 (ตัน)	TP-3 (ตัน)	TP-4 (ตัน)	TP-5 (ตัน)
Davisson	266.67	150.97	160.23	141.38	105.83
Offset Limit					
Brinch Hansen	130.14	N/A	155.35	N/A	146.49
Mazurkiewicz	143.00	144.00	142.00	148.00	130.00
Chin-Kondner	130.55	143.77	134.32	166.56	132.18
De Beer	66.03	74.50	60.87	28.83	59.36
Decourt	165.65	186.52	174.63	214.90	138.38
Van der Veen	153.50	164.50	156.00	181.00	129.50
Fuller and Hoy	119.83	122.83	120.75	128.93	118.60

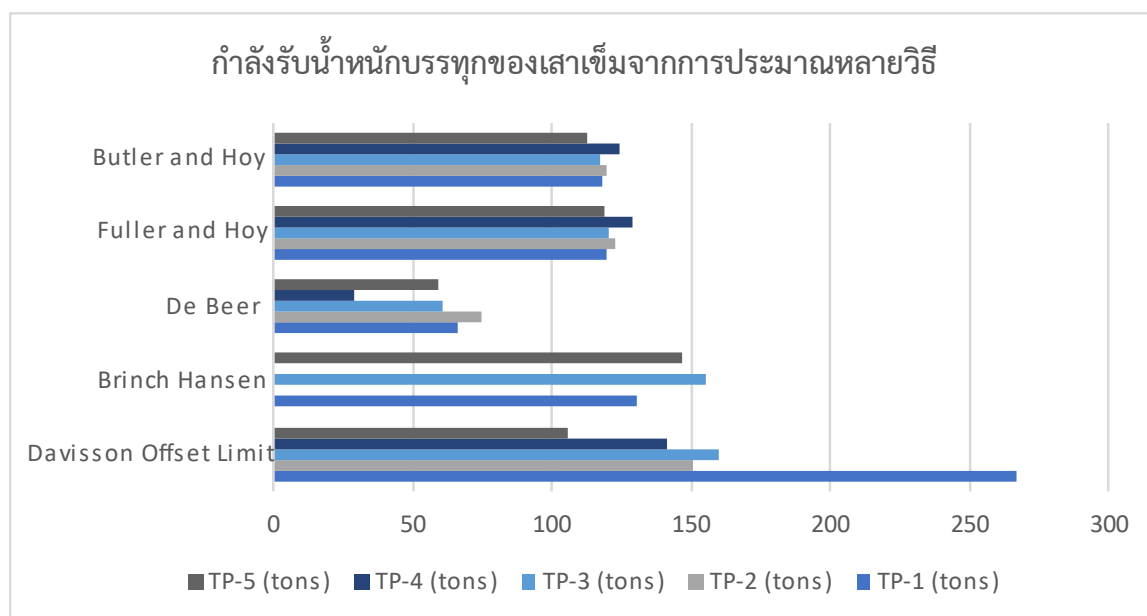
วิธีตีความ	TP-1 (ตัน)	TP-2 (ตัน)	TP-3 (ตัน)	TP-4 (ตัน)	TP-5 (ตัน)
Butler and Hoy	117.91	119.49	117.52	124.56	112.29

จากตารางที่ 7 พบว่าวิธีตีความผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตแต่ละวิธีให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแตกต่างกันตามหลักการวิเคราะห์ของแต่ละวิธี วิธี Davisson ให้ค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับวิธีอื่น เนื่องจากกราฟ Load-settlement ของเสาเข็มทดสอบส่วนใหญ่ยังมีการทรุดตัวไม่ถึงเกณฑ์ตามวิธี Davisson ทำให้ค่าที่ได้ต้องอาศัยการต่อเส้นอ้างอิงไปตัดกับกราฟการทรุดตัว ซึ่งอาจให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยสูงกว่าพฤติกรรมจริงของเสาเข็ม โดยเฉพาะในกรณีที่กราฟยังไม่แสดงพฤติกรรมวิบัติชัดเจน อย่างไรก็ตาม สำหรับ TP-5 ซึ่งมีค่าการทรุดตัวค่อนข้างสูงกลับให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยต่ำกว่าต้นอื่น เนื่องจากการทรุดตัวเกิดขึ้นรวดเร็วเกินเกณฑ์การพิจารณา

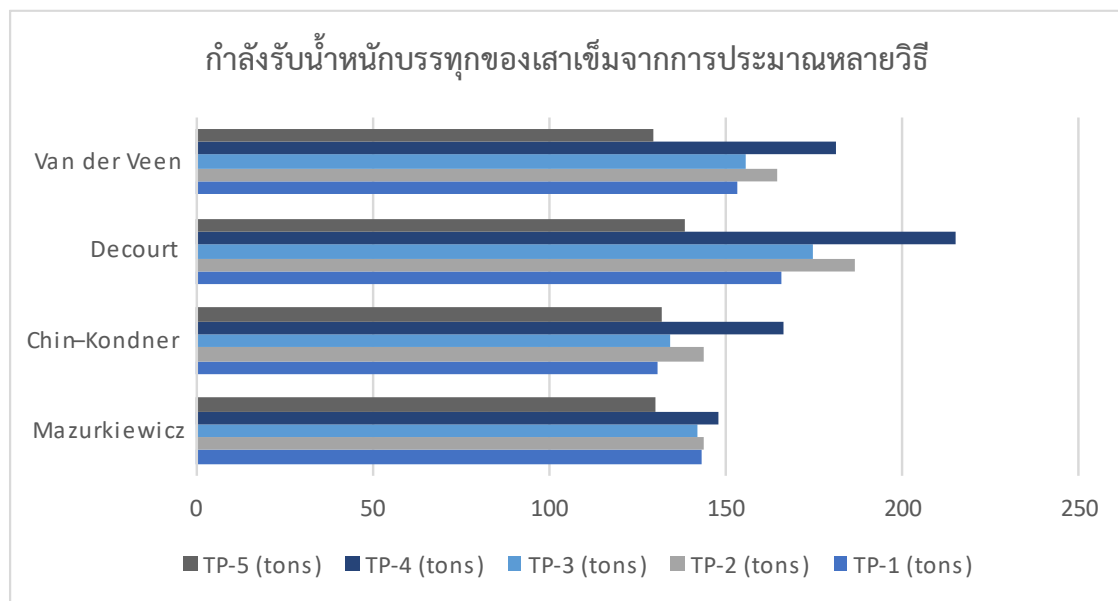
สำหรับวิธี Brinch Hansen ให้ค่าค่อนข้างเกาะกลุ่มกับหลายวิธี แต่ไม่สามารถหาค่าได้ใน TP-2 และ TP-4 เนื่องจากแปลงรูปกราฟแล้วมีแนวโน้มความชันเป็นลบ

ทำให้ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของวิธี จึงไม่สามารถตีความผลได้ตามเกณฑ์ที่กำหนด ส่วนวิธี De Beer ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยต่ำกว่าวิธีอื่นเนื่องจากวิธีดังกล่าวอาศัยการกำหนดจุดตัดของแนวโน้มเชิงเส้นสองช่วงบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวผลการทดสอบเสาเข็มในงานวิจัยนี้ยังไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างเด่นชัด โดยการเปลี่ยนแปลงความชันเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้จุดตัดที่ได้จากการกำหนดแนวโน้มช่วงต้นและช่วงปลายเกิดขึ้นที่ระดับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยต่ำ ในขณะที่วิธี Fuller and Hoy และ Butler and Hoy ค่าที่ตีความได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับระดับน้ำหนักทดสอบสูงสุด 120 ตัน ภายใต้ลักษณะกราฟ Load-settlement ที่ยังไม่แสดงจุดวิบัติอย่างชัดเจน

ส่วนวิธี Mazurkiewicz, Chin-Kondner, Decourt และ Van der Veen ให้ค่าที่เกาะกลุ่มกันในช่วงใกล้เคียงกัน แสดงถึงความสอดคล้องของแนวโน้มผลลัพธ์จากวิธีที่อาศัยการตีความจากรูปกราฟและการแปลงข้อมูลเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยตามตาราง



ภาพที่ 4 เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากวิธีตีความ Static pile load test 9 วิธี (กลุ่มที่ 1 ค่าประมาณการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยผันผวนจากข้อมูลโครงการ)



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากวิธีตีความ Static pile load test 9 วิธี (กลุ่มที่ 2 ค่าประมาณการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยสามารถนำไปประเมินวิธีแบบผสม)

5.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบผสม (Combined Method for Estimating Ultimate Pile Capacity)

ในงานวิจัยนี้จึงเสนอการวิเคราะห์ผลจากหลายวิธีร่วมกัน ภายใต้แนวคิด วิธีประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มแบบผสม หรือ Combined Method for Estimating Ultimate Pile Capacity โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่าประมาณที่สะท้อนแนวโน้มของข้อมูลภาคสนามและลดข้อจำกัดจากการพิจารณาผลด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง สำหรับการวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยพิจารณาเลือกวิธีที่สามารถให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้ครบถ้วน มีความสอดคล้องกับข้อมูล Load-settlement และได้รับเลือกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ วิธี Mazurkiewicz, วิธี Chin-Kondner, วิธี Decourt และวิธี Van der Veen ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยตามวิธีแบบผสมคำนวณจากค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของวิธีที่คัดเลือก โดยพิจารณาค่าน้ำหนักจากความเหมาะสมของแต่ละวิธีภายใต้เงื่อนไขของข้อมูลในงานวิจัยนี้ จากสูตรที่ 5 ถึง 7 และมีเกณฑ์คะแนนและค่าน้ำหนักดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 เกณฑ์คะแนนและค่าน้ำหนักของวิธีที่ใช้ในวิธีแบบผสม

วิธีวิเคราะห์	1	2	3	4	คะแนนรวม	ค่าน้ำหนัก
Mazurkiewicz	4	4	4	3	15	0.2239
Chin-Kondner	5	4	4	5	18	0.2687
Decourt	4	4	3	5	16	0.2388
Van der Veen	5	4	4	5	18	0.2687
รวม					67	1.00

หมายเหตุ: พิจารณาจากเกณฑ์ 4 ด้าน ได้แก่ 1) ความเหมาะสมกับกรณีที่ผลทดสอบยังไม่ถึงจุดวิกฤติ 2) ความสอดคล้องกับพฤติกรรมการทรุดตัวจากกราฟ Load-settlement 3) ความเสถียรของผลลัพธ์ และ 4) ความชัดเจนของกราฟหรือความเหมาะสมของการแปลงรูปข้อมูล ทั้งนี้ค่าที่แสดงในตารางอาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากการปัดเศษทศนิยม

เมื่อนำมาคำนวณร่วมกับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยจากแต่ละวิธี พบว่าค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยตามวิธีแบบผสมมีค่าอยู่ในช่วง 132.46–177.84 ตัน ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุก
ประลัยของเสาเข็มด้วยวิธีแบบผสม

เสาเข็ม	1 (ตัน)	2 (ตัน)	3 (ตัน)	4 (ตัน)	$Q_{u,CM}$ (ตัน)
TP-1	32.01	35.07	39.55	41.24	147.89
TP-2	32.24	38.63	44.54	44.20	159.61
TP-3	31.79	36.09	41.70	41.92	151.50
TP-4	33.13	44.75	51.31	48.63	177.84
TP-5	29.10	35.51	33.04	34.79	132.46

หมายเหตุ: 1) Mazurkiewicz, 2) Chin-Kondner, 3) Decourt, 4) Van der Veen ค่าที่แสดงในตารางอาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากการปัดเศษทศนิยม 2 ตำแหน่ง

จากตารางที่ 9 ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มตามวิธีแบบผสมมีค่าอยู่ในช่วง 132.46–177.84 ตัน โดย TP-4 ให้ค่าสูงที่สุดเท่ากับ 177.84 ตัน ส่วน TP-5 ให้ค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 132.46 ตัน ผลดังกล่าวสะท้อนแนวโน้มโดยรวมของวิธีที่คัดเลือกมาใช้ในการวิเคราะห์ผล โดยไม่เอนเอียงไปตามค่าสูงหรือต่ำผิดปกติจากวิธีใดวิธีหนึ่งเพียงวิธีเดียว

วิธีแบบผสมที่เสนอในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางหนึ่งในการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มจากข้อมูล Static pile load test ที่ยังไม่แสดงจุดวิบัติอย่างชัดเจน โดยค่าที่ได้ควรตีความเป็นค่าประมาณเชิงวิศวกรรมเพื่อนำไปปรับใช้ภายใต้เงื่อนไขของข้อมูลโครงการศึกษา มิใช่ค่ามาตรฐานทั่วไปที่สามารถนำไปใช้แทนการทดสอบภาคสนามหรือการวิเคราะห์เฉพาะโครงการอื่นได้โดยตรง

5.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Method) ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์จาก Hiley Formula และ Engineering News Formula แสดงในตารางที่ 11 พบว่า Hiley Formula ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยอยู่ในช่วง 206.54–273.67 ตัน ส่วน Engineering News Formula ให้ค่าอยู่ในช่วง 181.82–

210.53 ตัน โดยค่าที่ได้จาก Hiley Formula สูงกว่า Engineering News Formula ในเสาเข็มทุกต้น

ตารางที่ 10 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณสมการ Hiley formula

ตัวแปร	TP-1	TP-2	TP-3	TP-4	TP-5
W	58.86 kN	58.86 kN	58.86 kN	58.86 kN	58.86 kN
H	1.00 m	1.00 m	1.00 m	1.00 m	1.00 m
s	0.0080 m	0.0040 m	0.0040 m	0.0035 m	0.0050 m
e_h	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
n	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
P	27.50 kN	16.95 kN	24.49 kN	25.24 kN	33.90 kN
C_p	0.0033 m	0.0044 m	0.0037 m	0.0039 m	0.0033 m
C_q	0.0025 m	0.0025 m	0.0025 m	0.0025 m	0.0025 m
C_c	0.0114 m	0.0125 m	0.0125 m	0.0125 m	0.0125 m

ตารางที่ 11 ผลการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุก
ประลัยของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์

เสาเข็ม	Hiley formula (ตัน)	Engineering news formula (ตัน)
TP-1	206.54	181.82
TP-2	273.67	206.90
TP-3	262.46	206.90
TP-4	269.82	210.53
TP-5	230.90	200.00

จากตารางที่ 11 พบว่า Hiley Formula ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยสูงกว่า Engineering News Formula ในเสาเข็มทุกต้น เนื่องจาก Hiley Formula พิจารณาปัจจัยประกอบหลายด้านขณะที่ Engineering News formula เป็นสูตรอย่างง่าย ดังนั้นผลจากวิธีพลศาสตร์ควรใช้เป็นข้อมูลประกอบการเปรียบเทียบ ไม่ควรใช้เป็นค่าตัดสินเพียงวิธีเดียว

5.6 การเปรียบเทียบและสรุปผลการวิเคราะห์
ผู้วิจัยนำผลลัพธ์จากแต่ละแนวทางมาเปรียบเทียบร่วมกันเพื่อพิจารณาความแตกต่างของค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จากแต่ละวิธี และเพื่อประเมินแนวโน้มความ

เหมาะสมของผลลัพธ์ภายใต้ข้อมูลภาคสนามของโครงการศึกษา

หลังจากการวิเคราะห์ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มด้วยวิธีต่าง ๆ การเปรียบเทียบดังกล่าวมีความสำคัญ เนื่องจากแต่ละวิธีอาศัยหลักการและข้อมูลตั้งต้นแตกต่างกัน วิธีสถิติศาสตร์ประเมินจากพารามิเตอร์ของชั้นดิน วิธีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบสถิต สะท้อนพฤติกรรมการรับน้ำหนักและการหลุดตัวจากการทดสอบในสนาม วิธีพลศาสตร์อาศัยข้อมูลการตอกเสาเข็มและสมมติฐานด้านพลังงาน ส่วนวิธีแบบผสมเป็นการพิจารณาผลตีความจาก

กราฟ Load-settlement หลายวิธีร่วมกันโดยใช้ค่าน้ำหนักตามเกณฑ์ความเหมาะสมที่กำหนด

จากผลวิธีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบสถิตยืนยันว่าเสาเข็มทดสอบทุกต้นสามารถรับน้ำหนักได้ถึง 120 ตัน โดยไม่เกิดการวิบัติอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ค่าดังกล่าวเป็นเพียงน้ำหนักสูงสุดของการทดสอบ ไม่ใช่ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยโดยตรง ดังนั้น การเปรียบเทียบผลจากหลายวิธีจึงช่วยให้เห็นช่วงค่าประมาณ แนวโน้มของผลลัพธ์ และข้อจำกัดของแต่ละวิธีได้ชัดเจนยิ่งขึ้นแสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มจากวิธีต่าง ๆ

เสาเข็ม	วิธีสถิติศาสตร์ (ตัน)	วิธีแบบผสม (ตัน)	Hiley formula (ตัน)	Engineering news formula(ตัน)
TP-1	141.60	147.89	206.54	181.82
TP-2	140.59	159.61	273.67	206.90
TP-3	142.95	151.49	262.46	206.90
TP-4	122.75	177.84	269.82	210.53
TP-5	136.08	132.46	230.90	200.00

จากตารางที่ 12 พบว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มที่ได้จากแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนตามหลักการวิเคราะห์และข้อมูลตั้งต้นของแต่ละวิธี โดยวิธีสถิติศาสตร์ให้ค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 122.75–142.95 ตัน สะท้อนลักษณะการประเมินที่ค่อนข้างอนุรักษ์นิยม ส่วนวิธีแบบผสมให้ค่าอยู่ในช่วง 132.46–177.84 ตัน ซึ่งอยู่ในระดับกึ่งกลางเมื่อเทียบกับวิธีอื่น เนื่องจากการนำผลจากวิธีตีความที่คัดเลือกแล้วมาพิจารณาร่วมกัน ขณะที่วิธีพลศาสตร์ให้ค่าสูงกว่าวิธีอื่น โดย Hiley Formula ให้ค่าอยู่ในช่วง 206.54–273.67 ตัน และ Engineering news formula ให้ค่าอยู่ในช่วง 181.82–210.53 ตัน

เมื่อพิจารณาหลักการของแต่ละวิธี พบว่า วิธีสถิติศาสตร์เป็นการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากหลักการพื้นฐานทางปฐพีวิศวกรรม เพื่อนำมาคำนวณแรงต้านทานตามผิวเสาเข็มและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มหักลบด้วยน้ำหนักเสาเข็ม ผลที่ได้จึงเป็น

ค่าประมาณเชิงทฤษฎีที่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ดินและสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ

ส่วนวิธีตีความผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิติศาสตร์ เป็นการใช้ข้อมูลจากพฤติกรรมจริงของเสาเข็มในสนาม โดยพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการหลุดตัว ผลที่ได้จึงสะท้อนพฤติกรรมการรับน้ำหนักจากการทดสอบจริงมากกว่าวิธีสถิติศาสตร์ แต่ค่าที่ประเมินได้ยังขึ้นอยู่กับความชัดเจนของกราฟ Load-settlement และระดับน้ำหนักสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบ

สำหรับวิธีพลศาสตร์เป็นการประมาณกำลังรับน้ำหนักจากพลังงานที่ใช้ในการตอกเสาเข็มผลจากวิธีพลศาสตร์จึงได้รับอิทธิพลจากสมมติฐานด้านพลังงานและสภาพการตอกในสนามเป็นสำคัญ

ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มตอกไม่ควรพิจารณาจากวิธีใดวิธีหนึ่งเพียงวิธีเดียว

เนื่องจากแต่ละวิธีมีสมมติฐาน ข้อจำกัด และความไวต่อข้อมูลภาคสนามแตกต่างกัน ควรใช้หลายวิธีประกอบกัน ผู้วิจัยจึงนำเสนอการพิจารณาร่วมกับวิธีแบบผสม การประเมินมีความรอบด้านและใช้ประกอบการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมมากขึ้น

6. สรุปผลและอภิปรายผล

6.1 สรุปผลการวิจัย

6.1.1 เสาเข็มทดสอบ TP-1 ถึง TP-5 ดำเนินการถึงน้ำหนักทดสอบสูงสุด 120 ตัน โดยเสาเข็มทุกต้นยังไม่แสดงจุดวิบัติอย่างชัดเจน จึงจำเป็นต้องใช้วิธีตีความเพื่อประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย

6.1.2 พฤติกรรมการทรุดตัวของเสาเข็มแต่ละต้นมีความแตกต่างกัน แม้ทำการทดสอบเดียวกัน ความแตกต่างดังกล่าวอาจสัมพันธ์กับตำแหน่งของจุดทดสอบและความแปรผันของสภาพชั้นดินในพื้นที่

6.1.3 วิธีสถิติศาสตร์ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยอยู่ในช่วง 122.75–142.95 ตัน โดยมีแนวโน้มให้ค่าค่อนข้างต่ำและอนุรักษ์นิยม เนื่องจากการคำนวณจากพารามิเตอร์ชั้นดินและสมมติฐานทางปฐพีวิศวกรรมซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่พบว่าวิธีสถิติศาสตร์มักให้ค่าประเมินต่ำกว่าผลทดสอบจริงในสนาม [12], [13]

6.1.4 การพิจารณา Pile setup ในเชิงเปรียบเทียบพบว่า เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มขึ้นของแรงต้านทานตามผิวเสาเข็มเพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์เชิงสมมติฐาน ไม่ใช่ค่าที่ได้จากการทดสอบ Pile setup โดยตรง

6.1.5 การตีความผล Static pile load test ด้วยวิธีต่าง ๆ พบว่าแต่ละวิธีให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแตกต่างกันตามหลักการวิเคราะห์ โดยบางวิธีให้ค่าสูง บางวิธีให้ค่าต่ำ และบางวิธีไม่สามารถประเมินค่าได้ โดยเฉพาะกรณีกราฟ Load-settlement ยังไม่แสดงจุดวิบัติอย่างชัดเจน

6.1.6 วิธี Mazurkiewicz, Chin-Kondner, Decourt และ Van der Veen เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในวิธีแบบผสม มีความสอดคล้องกับแนวโน้มของกราฟ Load-settlement ในโครงการศึกษา

6.1.7 วิธีแบบผสมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยอยู่ในช่วง 132.46–177.84 ตัน ซึ่งเป็นค่าประมาณในระดับกึ่งกลางเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ช่วยลดผลกระทบจากค่าสูงหรือต่ำผิดปกติของวิธีใดวิธีหนึ่งจากวิธีตีความเป็นแนวทางประกอบการประเมินเชิงวิศวกรรม

6.1.8 วิธีพลศาสตร์ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยสูงกว่าวิธีอื่น โดย Hiley formula ให้ค่าอยู่ในช่วง 206.54–273.67 ตัน และ Engineering News Formula ให้ค่าอยู่ในช่วง 181.82–210.53 ตัน จึงควรใช้เป็นข้อมูลประกอบการเปรียบเทียบและพิจารณาค่าตัวประกอบความปลอดภัย (Safety Factor) ร่วมด้วยก่อนนำไปใช้ในการออกแบบสอดคล้องกับข้อสรุปของ [11], [14]

6.2 อภิปรายผลและสรุป การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มไม่ควรพิจารณาจากค่าน้ำหนักทดสอบสูงสุดเพียงอย่างเดียว แต่ต้องพิจารณาอัตราการทรุดตัวร่วมด้วย

สำหรับแนวทางการวิเคราะห์ผลจากหลายวิธีร่วมกันงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางแบบผสม โดยนำผลจากวิธีตีความที่เหมาะสมมาพิจารณาร่วมกันด้วยค่าน้ำหนัก เพื่อช่วยลดอิทธิพลของวิธีใดวิธีหนึ่ง และเป็นแนวทางเบื้องต้นในการประกอบการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมภายใต้ข้อจำกัดของข้อมูลภาคสนาม การพิจารณาวิธีแบบผสมร่วมกับวิธีอื่นจึงเป็นแนวทางเบื้องต้นที่ช่วยให้การประเมินมีความรอบด้านขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเสาเข็มในการศึกษานี้ไม่ได้ทดสอบจนถึงสภาวะวิบัติจริง จึงไม่มีค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยในสนามมาสอบเทียบความแม่นยำโดยตรง การเลือกใช้วิธีตีความจึงเป็นการคัดเลือกตามความสอดคล้องกับแนวโน้มของกราฟทดสอบในพื้นที่ศึกษาเท่านั้น

6.3 ข้อจำกัดของงานวิจัย

6.3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกจำนวน 5 ต้น จากโครงการก่อสร้างในพื้นที่แห่งเดียว ซึ่งสภาพชั้นดินอาจมีลักษณะเฉพาะทางปฐพีกลศาสตร์เฉพาะพื้นที่

6.3.2 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ Pile Setup ในงานวิจัยนี้เป็นการประเมินและวิเคราะห์ความไวเชิงทฤษฎีจากค่าพารามิเตอร์สมมติเบื้องต้น มิใช่ค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงอย่างต่อเนื่องในโครงการ

6.3.3 ข้อมูลผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ สถิติศาสตร์ดำเนินการถึงระดับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดตามการออกแบบ 120 ตัน ซึ่งยังไม่ถึงสภาวะวิบัติจริงในสนาม ค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยที่ได้จากแต่ละวิธีตีความจึงเป็นการประมาณค่าโดยการต่อขยายแนวโน้มของกราฟ (Extrapolation)

6.3.4 เนื่องจากผู้วิจัยไม่มีการทดสอบพลศาสตร์ขั้นสูงในสนาม เช่น การทดสอบวิเคราะห์คลื่นความเค้น (PDA) หรือการวิเคราะห์สัญญาณตอบสนอง (CAPWAP) รวมถึงไม่มีข้อมูลการทดสอบซ้ำตามระยะเวลาหลังการตอก (Restrike/Retest) ข้อมูลด้านพลศาสตร์จึงจำกัดอยู่กับการคำนวณจากสูตรการตอกเสาเข็มและบันทึกการตอกเสาเข็มเท่านั้น

6.3.5 อย่างไรก็ตาม วิธีแบบผสมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเชิงแนวคิดเพื่อลดความเอนเอียง (Bias) จากการเลือกใช้วิธีใดวิธีหนึ่งเพียงลำพัง โดยยังไม่ได้ผ่านการสอบเทียบ (Calibration) ร่วมกับฐานข้อมูลการทดสอบขนาดใหญ่หรือข้อมูลการทดสอบจนถึงจุดวิบัติ

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

7.1.1 ไม่ควรใช้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากสูตรการตอกทางพลศาสตร์ Engineering news formula หรือ Hiley formula เพียงลำพังในการกำหนดกำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้จำเป็นต้องมีการสอบเทียบร่วมกับการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิต (Static Load Test)

การทดสอบการวิเคราะห์คลื่นความเค้น (PDA) หรือการวิเคราะห์สมการคลื่น (Wave Equation Analysis) เสมอ

7.1.2 ควรเพิ่มจำนวนข้อมูลเสาเข็มทดสอบให้ครอบคลุมหลายพื้นที่ หลายโครงการ และหลากหลายสภาพชั้นดิน เพื่อให้สามารถประเมินความเหมาะสมและความแม่นยำของแต่ละวิธีได้อย่างครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

7.1.3 ควรมีข้อมูลการทดสอบ Static Pile Load test ที่ดำเนินการจนถึงสภาวะวิบัติอย่างชัดเจน เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเปรียบเทียบและตรวจสอบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่ได้จากวิธีประมาณค่าต่าง ๆ

7.1.4 ควรศึกษาผลของ Pile Setup โดยดำเนินการทดสอบเสาเข็มในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน หลังการตอก เช่น 1 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของแรงต้านทานตามผิวเสาเข็มอย่างเป็นระบบ

7.1.5 ควรนำแนวทางการวิเคราะห์แบบผสมไปทดสอบกับข้อมูลจากโครงการอื่นเพิ่มเติม เพื่อปรับปรุงเกณฑ์การให้น้ำหนักและประเมินความเหมาะสมของวิธีดังกล่าวในบริบทที่หลากหลายมากขึ้น

7.2 ข้อเสนอแนะขอบเขตการใช้งานของวิธีแบบผสม

7.2.1 ประเภทและขนาดเสาเข็มในโครงการคือ เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จรูปประเภทเสาเข็มตอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.40x0.40 m ระยะฝังจมในดิน 4.50 – 9.00 m พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มจากแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มร่วมกับกำลังรับน้ำหนักแบกทานที่ปลายเสาเข็ม

7.2.2 สภาพชั้นดิน สอดคล้องกับสภาพชั้นดินตอนบนที่เป็นชั้นดินเหนียว ดินเหนียวปนทรายและดินลูกรัง ค่า SPT-N อยู่ในช่วง 6 -39 blows/ft วางตัวทับบนชั้นดินลูกรังปนกรวดแน่นถึงแน่นมาก ค่า SPT-N อยู่ในช่วง 30 - 66 blows/ft เป็นชั้นที่ปลายเสาเข็มหยั่งอยู่

7.2.3 คุณภาพข้อมูลของการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์ตามมาตรฐาน ASTM D1143 ต้องมีความต่อเนื่อง สม่ำเสมอ และไม่มีความคลาดเคลื่อนเชิงกลจากการวัด

7.2.4 ประยุกต์ใช้กับผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์ที่ยังไม่ถึงจุดวิบัติโดยการตีความหลายวิธีร่วมกับกราฟ Load-settlement ในลักษณะข้อมูลเส้นกราฟในช่วงเพิ่มน้ำหนัก (Loading Phase) ต้องเริ่มแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนความชันอย่างชัดเจน เพื่อให้ฟังก์ชันการคำนวณของแต่ละวิธีสามารถแปลงสมการและต่อขยายแนวโน้ม (Extrapolation) ได้อย่างเสถียร

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัท ที.พี.ซี คอนกรีตโปรดักส์ จำกัด บริษัท เจเอพี วิศวกรรม จำกัด และบริษัท โอเอ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลภาคสนาม ข้อมูลการตอกเสาเข็ม ข้อมูลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม และข้อมูลประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์และจัดทำบทความวิจัยฉบับนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Fellenius, B. H. 1980. "The analysis of results from routine pile load tests," *Ground Engineering*, 13(6): pp. 19–31.
- [2] de França, D. C. and Viana, A. H. 2011. "Failure load analysis methods based on instrumented large diameter bored pile load tests," In *Proceedings of the 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Toronto, Canada: Canadian Geotechnical Society, pp. 1–8.
- [3] Abd Elsamee, W. N. 2012. "Evaluation of the ultimate capacity of friction piles," *Engineering*, 4(11): pp. 778–789. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4236/eng.2012.411100>

- [4] Olgun, M., Yenginar, Y. and Hanati, A. 2017. "Interpreting load-settlement curves of pile foundations by graphical methods," *Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture*, 1(2): pp. 1–10.
- [5] Birid, K. C. 2018. "Evaluation of ultimate pile compression capacity from static pile load test results," In *Advances in Analysis and Design of Deep Foundations*, Cham, Switzerland: Springer, pp. 1–14. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-61642-1_1
- [6] Adel, R. and Shakir, R. R. 2022. "Evaluation of static pile load test results of ultimate bearing capacity by interpreting methods," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 961: p. 012013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/961/1/012013>
- [7] Shariatmadari, N., Karimpour-Fard, M. and Tabarsa, A. 2007. "Ultimate bearing capacity of piles from full scale load test interpretations," In *Proceedings of the Sri Lankan Geotechnical Society International Conference on Soil and Rock Engineering*, Colombo, Sri Lanka: Sri Lankan Geotechnical Society, pp. 211–218.
- [8] Król, M. and Rybak, J. 2013. "Accuracy of extrapolation methods for non-failed static load tests," In *Proceedings of the 11th Slovak Geotechnical Conference*, Bratislava, Slovakia: Slovak University of Technology in Bratislava, pp. 285–294.
- [9] Alselami, N. A. 2020. "New methods for interpret the ultimate axial load capacity of driven square concrete piles," Ph.D. dissertation, Department of Civil and

- Environmental Engineering, University of Missouri-Columbia, Columbia, MO, USA.
- [10] Yimsiri, S. and Ratananikom, W. 2025. "Evaluation of ultimate pile capacity based on non-failed load tests: A case study of piles in Bangkok subsoil," *KSCE Journal of Civil Engineering*, 29(7): p. 100153. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.kscej.2024.100153>
- [11] Tucker, L. M. and Briaud, J.-L. 1988. *Analysis of the Pile Load Test Program at the Lock and Dam 26 Replacement Project*. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- [12] Budi, G. S., Kosasi, M. and Wijaya, D. H. 2015. "Bearing capacity of pile foundations embedded in clays and sands layer predicted using PDA test and static load test," *Procedia Engineering*, 125: pp. 406–410. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.101>
- [13] Ratananikom, W. 2018. "Evaluation of bearing capacity of piles by static method," Research report. Chonburi, Thailand: Burapha University. (in Thai)
- [14] Makrrojrit, W. and et al. 2021. "Comparison of pile load capacity from pile load tests and driving formula in sandy soil," In *Proceedings of the 26th National Convention on Civil Engineering (NCCE 26)*, Bangkok, Thailand: Engineering Institute of Thailand. (in Thai)
- [15] Randolph, M. F., Carter, J. P. and Wroth, C. P. 1979. "Driven piles in clay—the effects of installation and subsequent consolidation," *Géotechnique*, 29(4): pp. 361–393. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.4.361>
- [16] Chen, C. S., Liew, S. S. and Tan, Y. C. 1999. "Time effects on the bearing capacity of driven piles," In *Proceedings of the 11th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, Korea: Korean Geotechnical Society, pp. 175–178.
- [17] Komurka, V. E., Wagner, A. B. and Edil, T. B. 2003. *Estimating Soil/Pile Set-Up*. Madison, WI: Wisconsin Highway Research Program.
- [18] Hosseini, M. A. and Rayhani, M. 2017. "Evolution of pile shaft capacity over time in marine soils," *International Journal of Geo-Engineering*, 8: p. 12. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0049-8>
- [19] Pholkainuwatra, P., Eua-apiwatch, S. and Yimsiri, S. 2022. "Experimental study of pile set-up of driven piles in Bangkok clay," *Engineering and Applied Science Research*, 49(1): pp. 96–102. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14456/easr.2022.11>
- [20] OA Co., Ltd. 2018. "Soil investigation report for highway project," Project report. (in Thai)
- [21] JAP Engineering Co., Ltd. 2021. "Pile load test report for 5 piles, highway project," Project report. (in Thai)
- [22] Davisson, M. T. 1972. "High capacity piles," In *Proceedings of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction*, Chicago, IL, USA: ASCE Illinois Section, pp. 81–112.
- [23] Hansen, J. B. 1963. "Discussion on hyperbolic stress-strain response, cohesive soils,"

- Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(SM4): pp. 241–242.
- [24] Mazurkiewicz, B. K. 1972. "Test loading of piles according to Polish regulations," Research report No. 35. Stockholm, Sweden: Royal Swedish Academy of Engineering Sciences.
- [25] Kondner, R. L. 1963. "Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(SM1): pp. 115–143.
- [26] Chin, F. K. 1970. "Estimation of the ultimate load of piles from tests not carried to failure," In *Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering*, Singapore, pp. 81–90.
- [27] De Beer, E. E. 1968. "Experimental contribution to the study of bearing capacity of sand," *Annales des Travaux Publics de Belgique*, 69(1): pp. 44–88.
- [28] Décourt, L. 1999. "Behavior of foundations under working load conditions," In *Proceedings of the 11th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Foz do Iguaçu, Brazil, 4: pp. 453–488.
- [29] Van der Veen, C. 1953. "The bearing capacity of a pile," In *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, Switzerland, 2: pp. 84–90.
- [30] Fuller, F. M. and Hoy, H. E. 1970. "Pile load tests including quick-load test method," *Highway Research Record*, 333: pp. 74–86.
- [31] Butler, H. D. and Hoy, H. E. 1976. *Users Manual for the Texas Quick-Load Method for Foundation Load Testing*, Report No. FHWA-IP-77-8. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- [32] ASTM International. 2026. *ASTM D1143/D1143M-26 Standard Test Methods for Deep Foundation Elements under Static Axial Compressive Load*. West Conshohocken, PA: ASTM International. [Online]. Available: https://doi.org/10.1520/D1143_D1143M-26

การเปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนแบบโดเมนเวลาของสปินเดิลเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก ตามรูปแบบเส้นทางการแกะสลักไม้

COMPARISON OF TIME-DOMAIN VIBRATION SIGNATURES OF A MINI CNC SPINDLE UNDER DIFFERENT WOOD CARVING TOOL PATHS

เสรี หนูหลง¹, ธนะรัตน์ รัตนกุล^{1*}, กันต์ธมน สุขกระจ่าง¹, วีรชัย มัญญารักษ์¹

Saree Nulong¹, Tanarat Rattanakool^{1*}, Kantamon Sukkrajang¹,

Weerachai Madtharak¹

¹ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

¹ Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Tanarat.ra@sku.ac.th

วันที่รับบทความ: 30 กรกฎาคม 2569 ; วันที่ทบทวนบทความ: 11 สิงหาคม 2569 ; วันที่ตอบรับบทความ: 28 สิงหาคม 2569 ;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 31 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนแบบโดเมนเวลาของสปินเดิลเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กภายใต้รูปแบบเส้นทางการแกะสลักไม้ที่ต่างกัน และศึกษาผลของการปรับเรียบสัญญาณต่อการรักษาลักษณะของสัญญาณดิบ การทดลองใช้ไม้ตะเคียนรากเป็นชิ้นงาน ดอกกัด HSS แบบ 2 ฟัน ขนาด 3 มิลลิเมตร โดยกำหนดความเร็วรอบสปินเดิล 10,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 150 มิลลิเมตรต่อนาที และความลึกในการตัด 5 มิลลิเมตร เส้นทางการแกะสลักประกอบด้วยเส้นตรง วงกลม และสามเหลี่ยม สัญญาณความเร่งการสั่นสะเทือนถูกตรวจวัดบริเวณสปินเดิลแยกตามทิศทางแนวแกน แนวนอน และแนวตั้ง ข้อมูลแต่ละเงื่อนไขมีจำนวน 2,048 จุด ในช่วงเวลา 0.080 วินาที วิเคราะห์ด้วยค่า RMS, Peak, Peak-to-Peak และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV) รวมทั้งปรับเรียบสัญญาณด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (MA) และการปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย (SES) และประเมินความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบกับสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบด้วยค่า MAE, RMSE และ NRMSE ผลการศึกษาพบว่าเส้นทางแบบเส้นตรงให้ค่า RMS สูงที่สุดในทั้งสามทิศทาง โดยมีค่า 7.875, 8.120 และ 8.644 g ในแนวแกน แนวนอน และแนวตั้งตามลำดับ และมีค่า CV ค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 3.701–11.532% แสดงถึงระดับการสั่นสะเทือนที่สูงแต่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ขณะที่เส้นทางแบบวงกลมมีความแปรปรวนของสัญญาณสูง โดยมีค่า CV อยู่ในช่วง 46.778–72.974% ส่วนเส้นทางแบบสามเหลี่ยมมีความสม่ำเสมอในแนวแกนและแนวนอน แต่มีความแปรปรวนสูงในแนวตั้ง โดยมีค่า CV 58.617% สำหรับค่า MAE, RMSE และ NRMSE แสดงระดับการเบี่ยงเบนของสัญญาณที่เกิดขึ้นหลังการปรับเรียบ และใช้เพื่ออธิบายผลของระดับการปรับเรียบ ไม่ได้ใช้เป็นเกณฑ์เพียงอย่างเดียวในการตัดสินวิธีปรับเรียบที่เหมาะสมที่สุด ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่ารูปแบบเส้นทางการแกะสลักและทิศทางการวัดให้ลักษณะลายเส้นการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลาที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: การสั่นสะเทือน, โดเมนเวลา, เครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก, เส้นทางการแกะสลัก

Abstract: This study aimed to compare the time-domain vibration signatures of a mini-CNC spindle under different wood-carving tool paths and to investigate the effect of signal smoothing on preserving the characteristics of the original vibration signal. Hopea wood was used as a workpiece, and a 3 mm two-flute HSS cutter was employed. The cutting parameters were fixed at a spindle speed of 10,000 rpm, a feed rate of 150 mm/min, and a cutting depth of 5 mm. Three carving tool paths were investigated: straight line, circle, and triangle. Acceleration vibration signals were measured at the spindle separately in the axial, horizontal, and vertical directions. Each experimental condition consisted of 2,048 data points acquired over 0.080 s. The signals were analyzed using RMS, Peak, Peak-to-Peak, and coefficient of variation (CV). Signal smoothing was performed using Moving Average (MA) and Simple Exponential Smoothing (SES), while MAE, RMSE, and NRMSE were used to quantify the differences between the raw and smoothed signals. The results showed that the straight-line tool path produced the highest RMS values in all three measurement directions, with values of 7.875, 8.120, and 8.644 g in the axial, horizontal, and vertical directions, respectively. Its CV values were relatively low, ranging from 3.701% to 11.532%, indicating a high but comparatively stable response to vibration. In contrast, the circular tool path exhibited greater signal variability, with CV values ranging from 46.778% to 72.974%. The triangular tool path showed relatively stable vibration in the axial and horizontal directions but high variability in the vertical direction, with a CV of 58.617%. The smoothing-error metrics reflected the degree of deviation introduced by signal smoothing and were therefore interpreted as measures of signal distortion rather than as sole criteria for selecting an optimal smoothing method. The results demonstrate that different tool paths and measurement directions produce distinguishable time-domain vibration characteristics in the mini-CNC spindle.

Keywords: Vibration, Time Domain, Mini CNC Machine, Carving Tool Path

1. บทนำ

เครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก (Mini CNC) เป็นเทคโนโลยีการตัดเฉือนที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการแปรรูปและสร้างสรรค์ชิ้นงานไม้ โดยเฉพาะในงานแกะสลักไม้ที่ต้องการความละเอียดและลวดลายที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญประการหนึ่งในกระบวนการแกะสลักไม้ด้วยเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กคือ การสั่นสะเทือน (Vibration) ของสปินเดิลที่เกิดขึ้นระหว่างการตัดเฉือน ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพความเรียบของพื้นผิวชิ้นงาน ความแม่นยำทางมิติ รวมถึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ดอกกัดเกิดการสึกหรอก่อนกำหนดหรือแตกหักเสียหาย การติดตามและวิเคราะห์ลายเซ็นการสั่นสะเทือน (Vibration Signature) ที่เกิดขึ้นบนสปินเดิล จึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินพฤติกรรม

พลศาสตร์ของเครื่องจักร เพื่อนำไปสู่การเข้าใจพฤติกรรม การสั่นสะเทือนและวางแผนทางปรับปรุงกระบวนการตัดเฉือนให้มีเสถียรภาพสูงสุด ที่ผ่านมา งานวิจัยด้านการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในกระบวนการกัดไม้ส่วนใหญ่ มุ่งเน้นการศึกษากับวัสดุไม้กึ่งสังเคราะห์ เช่น แผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (MDF) หรือวัสดุผสมไม้พลาสติก (WPC) เนื่องจากมีความสม่ำเสมอของเนื้อวัสดุสูง [1], [2] ทว่าในทางปฏิบัติ กระบวนการแกะสลักไม้มักดำเนินการบนไม้ธรรมชาติ (Natural Wood) ซึ่งมีโครงสร้างความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Anisotropic and Heterogeneous) อันเนื่องมาจากทิศทางเส้นไม้ ความหนาแน่น และความชื้นที่แปรผัน ส่งผลให้ลักษณะแรงตัดเฉือนและลายเซ็นการสั่นสะเทือนมีความซับซ้อนและผันผวนมากกว่า

นอกจากนี้ งานวิจัยส่วนใหญ่มักศึกษาเฉพาะการตัดเฉือนในแนวเส้นตรงเดี่ยว [3], [4] แต่ในการแกะสลักไม้จริง เส้นทางเดินของเครื่องมือ (Tool Path) จำเป็นต้องเคลื่อนที่ครอบคลุมรูปแบบเรขาคณิตที่หลากหลาย เช่น เส้นตรง วงกลม และสามเหลี่ยม ซึ่งทำให้ทิศทางและขนาดของแรงกระทำต่อสปินเดิลในแกนแนวตั้ง แนวนอน และแนวแกนเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา การศึกษาและวิเคราะห์หลายเส้น การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริงตามรูปแบบเส้นทางเดินดอกกัดที่แตกต่างกันจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้ ในการประมวลผลสัญญาณการสั่นสะเทือนโดเมนเวลาที่มีความผันผวนสูง การประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลา (Time Series Analysis) เช่น วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average: MA) และวิธีปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย (Simple Exponential Smoothing: SES) สามารถช่วยเรียบสัญญาณ (Signal Smoothing) เพื่อสกัดและแสดงลักษณะลายเส้นการสั่นสะเทือนเด่นในแต่ละแกนการเคลื่อนที่ที่มีความชัดเจนยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่นำเทคนิคดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนแบบ 3 แกน ของสปินเดิลเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก ขณะแกะสลักไม้ธรรมชาติ ตามรูปแบบเส้นทางเดินดอกกัดที่หลากหลาย ยังมีอยู่อย่างจำกัด

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นนำเสนอวิธีการเปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนของสปินเดิลเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก ภายใต้เส้นทางแกะสลักไม้ธรรมชาติที่มีรูปทรงแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ เส้นตรง วงกลม และสามเหลี่ยม ภายใต้เงื่อนไขการตัดคงที่ โดยตรวจวัดสัญญาณแยกตามทิศทางแนวแกน แนวนอน และแนวตั้ง และพิจารณาทั้งระดับและความแปรปรวนของสัญญาณด้วย RMS, Peak, Peak-to-Peak และ CV ร่วมกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณหลังการปรับเรียบด้วย MA และ SES แนวทางดังกล่าวช่วยอธิบายลักษณะการตอบสนองของสปินเดิลที่สัมพันธ์กับรูปแบบเส้นทางแกะสลักได้จากข้อมูลในโดเมนเวลา

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อเปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนแบบโดเมนเวลาของสปินเดิลเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กภายใต้เส้นทางแกะสลักไม้ 3 รูปแบบ ได้แก่ เส้นตรง วงกลม และสามเหลี่ยม

2.2 เพื่อวิเคราะห์ระดับและความแปรปรวนของสัญญาณการสั่นสะเทือนในแต่ละเส้นทางและทิศทางการวัด โดยใช้ค่า RMS, Peak, Peak-to-Peak และ CV

2.3 เพื่อศึกษาผลของวิธี MA และ SES ต่อการปรับเรียบสัญญาณการสั่นสะเทือน โดยใช้ค่า MAE, RMSE และ NRMSE เป็นตัวชี้วัดระดับความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ

3. ขอบเขตการวิจัย

3.1 ขอบเขตด้านเครื่องจักรและวัสดุ งานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้เครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก (Mini CNC) ที่มีสเปกพื้นที่ทำงาน 200 x 200 x 60 มิลลิเมตร และใช้สปินเดิลขนาดกำลังไฟฟ้า 300 W วัสดุชิ้นงานที่ใช้ทดสอบการตัดเฉือน คือ ไม้ตะเคียนราก (Hopea) [5] ซึ่งเป็นไม้จากธรรมชาติ เครื่องมือตัดที่ใช้ในการแกะสลักคือ ดอกกัด HSS [6] แบบ 2 F [7] ขนาด 3 มิลลิเมตร [8]

3.2 ขอบเขตด้านเงื่อนไขการตัดเฉือนและรูปแบบชิ้นงาน การทดลองกำหนดพารามิเตอร์คงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบของสปินเดิลที่ 10,000 rpm [9], [10] อัตราป้อนที่ 150 mm/min [11] และความลึกในการตัดที่ 5 มิลลิเมตร [1] รูปแบบของเส้นทางแกะสลักไม้ถูกกำหนดไว้ 3 รูปแบบ คือ รูปเส้นตรง (ความยาว 40 มิลลิเมตร) รูปวงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร) และรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า (มุม 60 องศา ความยาว 40 มิลลิเมตร)

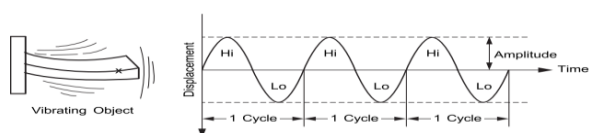
3.3 ขอบเขตด้านการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือน มุ่งเน้นการเก็บข้อมูลลักษณะสัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปแบบโดเมนเวลา (Time domain) โดยพิจารณาจากค่าแอมพลิจูดความเร่ง (g) ติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือนที่บริเวณสปินเดิลเพื่อวัดค่าใน 3 แกนทิศทางแยกกัน ได้แก่ แนวตั้ง แนวนอน และแนวแกน กำหนดขอบเขตข้อมูลดิบ (Raw Data) สำหรับ

การวิเคราะห์ที่จำนวน 2,048 จุด ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0.00 ถึง 0.080 วินาที

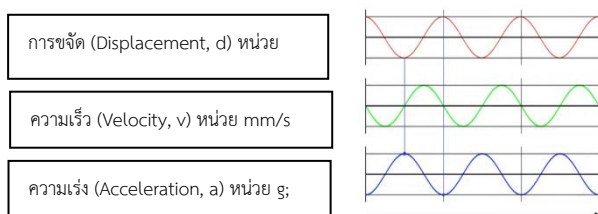
3.4 ขอบเขตด้านการวิเคราะห์ข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูลมุ่งเน้นการเปรียบเทียบลายเซ็นการสั่นสะเทือนแบบโดเมนเวลา โดยใช้ตัวชี้วัด ได้แก่ RMS, Peak, Peak-to-Peak และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation: CV) นอกจากนี้ ข้อมูลสัญญาณยังถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการปรับเรียบสัญญาณ ได้แก่ ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average: MA) ที่ MA 3 จุด MA 5 จุด [12] และการปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย (Simple Exponential Smoothing: SES) ที่ อัลฟา 0.1 [13] และ 0.5 [14] การประเมินความคลาดเคลื่อนของสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบพิจารณาจากค่า MAE, RMSE และ NRMSE โดยเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณดิบกับสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ

3.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.5.1 การสั่นสะเทือน การสั่นสะเทือน คือ การเคลื่อนที่ของวัตถุรอบ ๆ จุดสมดุลในช่วงเวลาหนึ่งของการเคลื่อนที่ ไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนที่รอบจุดสมดุลนั้นจะเกิดขึ้นในแบบการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาหรือจะเป็นการแกว่งรอบจุดสมดุลตามการเคลื่อนที่เป็นเวลา (Time Domain) โดยองค์ประกอบของการสั่นสะเทือน ภาพที่ 1 และ ภาพที่ 2



ภาพที่ 1 ลักษณะองค์ประกอบของการสั่นสะเทือน [15]



ภาพที่ 2 การขจัด ความเร็วและความเร่งของแรงสั่นสะเทือน [16]

ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการเคลื่อนที่ ความเร็ว และความเร่ง ดังสมการที่ 1 - 3

$$a = A \sin \omega t ; a = A \dots \dots \dots (1)$$

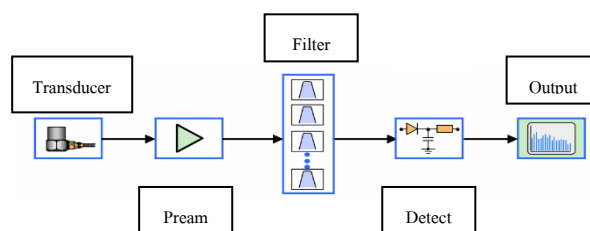
$$v = \int a dt = -\frac{A}{\omega} \cos \omega t ; v = \frac{A}{\omega} = \frac{A}{2\pi f} \dots \dots (2)$$

$$d = \int \int a dt dt = -\frac{A}{\omega^2} \sin \omega t ; d = \frac{A}{\omega^2} = \frac{A}{4\pi f^2} \dots \dots (3)$$

โดยที่

- A แทน ค่าขนาดการสั่นสะเทือน
- f แทน ความถี่ของการสั่น
- ω แทน อัตราเร็วเชิงมุม
- d แทน การขจัด
- a แทน ความเร่ง
- v แทน ความเร็ว
- t แทน เวลา

3.5.2 การวัดการสั่นสะเทือน เป็นการแปลงรูปแบบสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อแสดงผลในอุปกรณ์ในรูปแบบของตัวเลขหรือกราฟ ซึ่งประกอบไปด้วย อุปกรณ์วัดค่าการสั่นสะเทือน (Transducer) การขยายสัญญาณ (Preamplifier) การกรองสัญญาณ (Filter) วงจรปรับแต่งสัญญาณและแปลสัญญาณ (Detector) และการแสดงผล (Output) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กระบวนการวัดการสั่นสะเทือน [17]

3.5.3 การวิเคราะห์ลายเซ็นสัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา เป็นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณตามเวลาโดยตรง โดยไม่ต้องแปลงสัญญาณไปยังโดเมนความถี่ วิธีนี้เหมาะสำหรับการศึกษาระดับของสัญญาณ ลักษณะการแกว่ง ความแปรปรวน และรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในช่วงเวลาที่สนใจ [15], [16] ซึ่งสามารถอธิบายลักษณะการกระจายของสัญญาณ ดังนี้

3.5.3.1 ค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยใช้แสดงค่ากลางของสัญญาณในช่วงเวลาที่พิจารณา คำนวณได้ดังสมการที่ 4

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \dots\dots\dots(4)$$

โดยที่

$\bar{x}$ แทน ค่าเฉลี่ยของสัญญาณ

x_i แทน ค่าความแรงของการสั่นสะเทือน

N แทน จำนวนข้อมูลทั้งหมด

3.5.3.2 ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง หรือ Root Mean Square (RMS) เป็นตัวชี้วัดระดับการสั่นสะเทือนโดยรวมของสัญญาณ คำนวณได้ดังสมการที่ 5

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \dots\dots\dots(5)$$

3.5.3.3 ค่าสูงสุด ค่าสูงสุด หรือ Peak ใช้พิจารณาขนาดการสั่นสะเทือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่วิเคราะห์ โดยคำนวณได้ดังสมการที่

$$Peak = \max_{1 \leq i \leq N} |x_i| \dots\dots\dots(6)$$

3.5.3.4 ค่าพิคทูพิก ค่าพิคทูพิก หรือ Peak-to-Peak (P2P) ใช้แสดงช่วงการแกว่งทั้งหมดของสัญญาณ โดยคำนวณจากผลต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสัญญาณ ดังสมการที่

$$P2P = x_{max} - x_{min} \\ = \max(x_i) - \min(x_i) \dots\dots\dots(7)$$

3.5.4 การวิเคราะห์สัญญาณแบบแบ่งช่วงเวลา ด้วยการแบ่งสัญญาณดิบออกเป็นช่วงย่อยที่มีจำนวนข้อมูลเท่ากัน เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณภายในช่วงการวัดเดียวกัน แทนที่จะใช้ค่าทางสถิติจากสัญญาณทั้งชุดเพียงค่าเดียว [15], [16] หากสัญญาณดิบมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด N จุด และแบ่งเป็น K ช่วงย่อย โดยแต่ละช่วงมีข้อมูล n จุด ความสัมพันธ์ระหว่าง N , K และ n ดังสมการที่ 8

$$K = \frac{N}{n}; \text{ เมื่อ } N \text{หารด้วย } n \text{ ลงตัว} \dots\dots\dots(8)$$

โดยสัญญาณในช่วงย่อยที่ k สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 9

$$W_k = \{x_{(k-1)n+1}, x_{(k-1)n+2}, \dots, x_{kn}\} \dots\dots\dots(9)$$

เมื่อ $k = 1, 2, \dots, K$

จากนั้นคำนวณค่า RMS ของแต่ละช่วงย่อย ดังสมการที่ 10

$$RMS_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{k,j}^2} \dots\dots\dots(10)$$

โดยที่

RMS_k แทน ค่า RMS ของช่วงย่อยที่ k

$x_{k,j}$ แทน ค่าความแรงของสัญญาณ

ลำดับที่ j ในช่วงย่อยที่ k

n แทน จำนวนข้อมูลในแต่ละช่วง

K แทน จำนวนช่วงย่อยทั้งหมด

ค่าเฉลี่ยของค่า RMS จากทุกช่วงย่อยคำนวณ ดังสมการที่ 11

$$\overline{RMS} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K RMS_k \dots\dots\dots(11)$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า RMS จากทุกช่วงย่อยคำนวณ ดังสมการที่ 12

$$SD_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (RMS_k - \overline{RMS})^2} \dots\dots\dots(12)$$

การศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์แบบแบ่งช่วงเวลาเพื่อพิจารณาความสม่ำเสมอของลายเส้นการสั่นสะเทือนในแต่ละเส้นทางการแกว่งและแต่ละทิศทางการวัด

3.5.5 สัมประสิทธิ์ ความแปรปรวน หรือ Coefficient of Variation (CV) เป็นตัวชี้วัดความแปรปรวนสัมพัทธ์ของข้อมูลเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ย ใช้สำหรับเปรียบเทียบความสม่ำเสมอของข้อมูลระหว่างเงื่อนไขที่มีระดับค่าเฉลี่ยแตกต่างกัน ดังสมการที่ 13 [18]

$$CV = \frac{SD_{RMS}}{RMS} \times 100 \dots\dots\dots(13)$$

โดยที่

CV แทน สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่า RMS ระหว่างช่วงย่อย

SD_{RMS} แทน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า RMS ระหว่างช่วงย่อย

$\overline{RMS}$ แทน ค่าเฉลี่ยของค่า RMS ระหว่างช่วงย่อย

3.5.6 การปรับเรียบสัญญาณด้วยอนุกรมเวลา ด้วยการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย (Simple Moving Average : MA) ดังสมการที่ 14 [19]

$$F_t = \frac{A_{t-1} + A_{t-2} + A_{t-3} + \dots + A_{t-n}}{n} \dots\dots\dots(14)$$

โดยที่

n แทน จำนวนหน่วยเวลาที่ต้องการ

A_t แทน ค่าสัญญาณดิบ ในหน่วยเวลาที่ t

F_t แทน ค่าสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบในหน่วยเวลาที่ t

การปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย (Simple Exponential Smoothing) ดังสมการที่ 15 [19]

$$F_t = F_{t-1} + \alpha(A_{t-1} - F_{t-1}) \dots\dots\dots(15)$$

โดยที่

F_t แทน ค่าสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบในหน่วยเวลา t

A_t แทน ค่าสัญญาณดิบ ในหน่วยเวลา t

F_{t-1} แทน ค่าสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบในหน่วยเวลา $t-1$

A_{t-1} แทน ค่าสัญญาณดิบ ในหน่วยเวลา $t-1$

α แทน ค่าคงที่ปรับเรียบ 0 ถึง 1

3.5.7 ตัวชี้วัดความคลาดเคลื่อนของสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ มีจุดมุ่งหมายพิจารณาความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ ดังนี้

3.5.7.1 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์

ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error : MAE) คำนวณจากค่าเฉลี่ยของผลต่างสัมบูรณ์ระหว่างสัญญาณดิบกับสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ ดังสมการที่ 16 [18]

$$MAE = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} |e_i| = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} |x_i - \hat{x}_i| \dots\dots(16)$$

โดยที่

x_i แทน ค่าสัญญาณดิบ

$\hat{x}_i$ แทน ค่าสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ ณ ลำดับข้อมูลที่ i

N_e แทน จำนวนคู่ข้อมูลที่สามารเปรียบเทียบได้ระหว่างสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ

3.5.7.2 รากที่สองของค่าเฉลี่ยความ

คลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Square Error :RMSE) ค่า RMSE มีความไวต่อค่าความคลาดเคลื่อนที่มีขนาดมาก เนื่องจากมีการยกกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนก่อนนำมาเฉลี่ยคำนวณได้ ดังสมการที่ 17 [18]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} (x_i - \hat{x}_i)^2} \dots\dots\dots(17)$$

3.5.7.3 รากที่สองของค่าเฉลี่ยความ

คลาดเคลื่อนกำลังสองแบบปรับมาตรฐาน (Normalized Root Mean Square Error: NRMSE) ใช้เพื่อปรับค่า RMSE ให้อยู่ในรูปที่สามารถเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่มีระดับหรือช่วงแอมพลิจูดแตกต่างกันได้ [18] ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ปรับมาตรฐานด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณดิบ โดยคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณดิบได้ ดังสมการที่ 18

$$SD_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \dots\dots\dots(18)$$

ดังนั้น ค่า NRMSE คำนวณได้ดังสมการที่ 19

$$NRMSE = \frac{RMSE}{SD_x} \dots\dots\dots(19)$$

โดยที่

SD_x แทน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณดิบ

สำหรับค่า NRMSE ที่ต่ำกว่า แสดงถึงสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับความแปรปรวนของสัญญาณดิบต่ำกว่า

4. วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการเปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนแบบโดเมนเวลาของสปินเดิลเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก ตามรูปแบบเส้นทางการแกะสลักไม่มีรายละเอียด ดังนี้

4.1 รูปแบบและขั้นตอนการวิจัย ขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก รายละเอียด ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอน	รายละเอียดการดำเนินงาน
1	เตรียมเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก สปินเดิล วัสดุไม้ตะเคียนราก และดอกกัด HSS ขนาด 3 มิลลิเมตร
2	กำหนดเส้นทางการแกะสลัก 3 รูปแบบ ได้แก่ เส้นตรง วงกลม และสามเหลี่ยม โดยใช้เงื่อนไขการตัดคงที่
3	ติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือนบริเวณสปินเดิล และเก็บสัญญาณแยกตามทิศทาง แนวแกนแนวนอน และแนวตั้ง
4	ตรวจสอบข้อมูล จัดกลุ่มข้อมูล และแบ่งสัญญาณแต่ละชุดออกเป็นช่วงย่อย
5	วิเคราะห์ค่า Mean, SD, RMS, Peak, Peak-to-Peak, CV และประเมิน MA/SES ด้วย MAE, RMSE และ NRMSE

4.2 เครื่องจักร วัสดุ เครื่องมือตัด และอุปกรณ์วัด การทดลองดำเนินการด้วยเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กที่มีพื้นที่ทำงาน 200 x 200 x 60 มิลลิเมตร ใช้สปินเดิลขนาดกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ วัสดุชิ้นงานคือไม้ตะเคียนราก ซึ่งเป็นไม้ธรรมชาติชนิดเดียว เครื่องมือตัดเป็นดอกกัด HSS แบบ 2 ฟัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนดำเนินการที่บริเวณสปินเดิล โดยบันทึก

สัญญาณในรูปของความเร่งการสั่นสะเทือน หน่วย g ดังภาพที่ 4 และตารางที่ 2



(ก) เครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก (ข) บริเวณสปินเดิลและดอกกัด

ภาพที่ 4 เครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กและบริเวณสปินเดิลสำหรับการทดลอง

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสปินเดิลและเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก

สปินเดิล		ซีเอ็นซีขนาดเล็ก	
องค์ประกอบ	ขนาด	องค์ประกอบ	ขนาด
กำลังไฟฟ้า	300 W	พื้นที่ทำงาน	200 x 200 x 60 mm
ความเร็วรอบ	12000 rpm	ความเคลื่อนที่สูงสุดแกน X Y Z	1500 mm/min
แรงดันไฟฟ้า	กระแสตรง 48 Volt	ความแม่นยำการเดินซ้ำ	0.1 mm

4.3 เงื่อนไขการตัดเฉือนและรูปแบบเส้นทางการแกะสลัก การทดลองกำหนดพารามิเตอร์การตัดคงที่ตลอดการทดลอง ได้แก่ ความเร็วรอบสปินเดิล 10,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 150 มิลลิเมตรต่อนาที และความลึกในการตัด 5 มิลลิเมตร เพื่อให้การเปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนจากรูปแบบเส้นทางการแกะสลักเป็นหลัก ดังภาพที่ 5 และเงื่อนไขการตัดเฉือน ดังตารางที่ 3



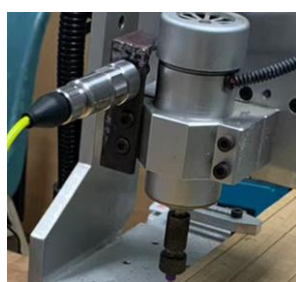
(ก) เส้นตรง (ข) วงกลม (ค) สามเหลี่ยม

ภาพที่ 5 รูปแบบเส้นทางการแกะสลักไม้ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการตัดเฉือนและรูปแบบเส้นทางการแกะสลัก

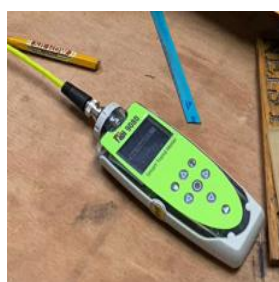
ตัวแปร	ค่าที่กำหนดในการทดลอง
ความเร็วรอบสปินเดิล	10,000 รอบต่อนาที
อัตราป้อน	150 มิลลิเมตรต่อนาที
ความลึกในการตัด	5 มิลลิเมตร
เส้นทางแบบเส้นตรง	ความยาว 40 มิลลิเมตร
เส้นทางแบบวงกลม	เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร
เส้นทางแบบสามเหลี่ยม	สามเหลี่ยมด้านเท่า มุม 60 องศา ความยาวด้าน 40 มิลลิเมตร

4.4 การติดตั้งหัววัดและการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือน ด้วยการวัดสัญญาณความเร่งการสั่นสะเทือนในระหว่างกระบวนการแกะสลักไม้ ข้อมูลที่ใช้สำหรับการศึกษาดังกล่าวจะเก็บข้อมูลด้วยสัญญาณที่บันทึกจำนวน 1 ชุด (N = 1) โดยมีทั้งหมด 9 ชุดข้อมูล จาก 3 รูปแบบเส้นทางการแกะสลักและ 3 ทิศทางการวัด การวัดแต่ละทิศทางการดำเนินการแยกกันและไม่ได้วัดพร้อมกันทั้งสามทิศทาง ทั้งนี้การแบ่งสัญญาณแต่ละชุดออกเป็น 8 ช่วงย่อยในขั้นตอนการวิเคราะห์เป็นการแบ่งข้อมูลภายในชุดสัญญาณเดียวกัน (within-record segmentation) เพื่อศึกษาความแปรปรวนตามเวลา ดังภาพที่ 6 โดยมีแผนการจัดกลุ่มข้อมูลการสั่นสะเทือน ดังตารางที่ 4



(ก) การติดตั้งหัววัด

การสั่นสะเทือน



(ข) TPI 9080

Smart Trend Meter

ภาพที่ 6 การติดตั้งหัววัดความเร่งบริเวณสปินเดิล

ตารางที่ 4 แผนการจัดกลุ่มข้อมูลการสั่นสะเทือน

รายการ	รายละเอียด
ทิศทางการวัด	3 ทิศทาง ได้แก่ แนวแกน แนวนอน และแนวตั้ง

รายการ	รายละเอียด
จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้	9 ชุดข้อมูล จาก 3 เส้นทาง x
วิเคราะห์	3 ทิศทางการวัด
จำนวนข้อมูลต่อชุด	2,048 จุด
ช่วงเวลาของสัญญาณต่อชุด	0.080 วินาที
อัตราการสุ่มสัญญาณ	25,600 เฮิร์ตซ์
หน่วยของสัญญาณ	หน่วย g

4.5 การเตรียมข้อมูลสัญญาณ ข้อมูลสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์ในแต่ละเงื่อนไขกำหนดให้มีจำนวนเท่ากัน 2,048 จุด ที่อัตราการสุ่มสัญญาณ 25,600 เฮิร์ตซ์ จึงครอบคลุมช่วงเวลา 0.080 วินาทีต่อชุด การกำหนดจำนวนข้อมูลเท่ากันในทุกเงื่อนไขมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบตัวชี้วัดของสัญญาณภายใต้ขนาดข้อมูลเดียวกัน โดยข้อมูลดังกล่าวเป็นช่วงสัญญาณที่บันทึกไว้ระหว่างกระบวนการแกะสลัก ไม่ได้ใช้แทนพฤติกรรมของสัญญาณตลอดระยะเวลาการตัดทั้งหมด จากนั้นข้อมูล 2,048 จุดถูกแบ่งแบบไม่ซ้อนทับออกเป็น 8 ช่วงย่อย ช่วงละ 256 จุด เพื่อคำนวณ RMS ของแต่ละช่วงและประเมินความแปรปรวนของ RMS ด้วยค่า CV รายละเอียดดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การแบ่งช่วงข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ RMS แบบแบ่งช่วงเวลา

รายการ	รายละเอียด
จำนวนข้อมูลต่อชุด	2,048 จุด
จำนวนช่วงย่อย	8 ช่วง
จำนวนข้อมูลต่อช่วงย่อย	256 จุด
เวลาต่อช่วงย่อย	ประมาณ 0.010 วินาที
ค่าที่คำนวณในแต่ละช่วง	RMS ของสัญญาณความเร่งการสั่นสะเทือน
ค่าที่ใช้ประเมิน	ค่าเฉลี่ย RMS, SD ของ RMS, RMS ต่ำสุด, RMS สูงสุด และ CV

4.6 การวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนเวลา ด้วยการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนหลัก และใช้โปรแกรมภาษา Python และโปรแกรม Excel ในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

4.6.1 การคำนวณค่าทางสถิติจากสัญญาณดิบ ทั้งชุด เพื่อเปรียบเทียบระดับและช่วงการแกว่งของสัญญาณ

4.6.2 การวิเคราะห์แบบแบ่งช่วงเวลาใช้เพื่อประเมินความแปรปรวนของระดับการสั่นสะเทือนภายในชุดข้อมูลเดียวกัน โดยแบ่งสัญญาณจำนวน 2,048 จุดออกเป็น 8 ช่วงย่อย แบบไม่ซ้อนทับ ช่วงละ 256 จุด และคำนวณค่า RMS ของแต่ละช่วง จากนั้นหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV) ของค่า RMS ทั้ง 8 ช่วง โดยค่า CV ต่ำแสดงถึงความสม่ำเสมอของระดับการสั่นสะเทือน ขณะที่ค่า CV สูงสะท้อนความแปรปรวนระหว่างช่วงเวลา ส่วนค่า Peak และ Peak-to-Peak ใช้อธิบายค่าสูงสุดและช่วงการแกว่งของสัญญาณ แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับ Ye และคณะ ซึ่งใช้ RMS ของแต่ละช่วงย่อยและ CV ของ RMS sequence ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงของการสั่นสะเทือนในกระบวนการ machining [20] และสอดคล้องกับการแบ่ง vibration signal เป็น window ก่อนสกัดคุณลักษณะในโดเมนเวลา เช่น RMS ที่กล่าวถึงโดย Fang และคณะ [21] และ Kumar และคณะ [22]

4.7 การปรับเรียบสัญญาณและการประเมินความคลาดเคลื่อน โดยสัญญาณการสั่นสะเทือนดิบในโดเมนเวลาจำนวน 2,048 จุด ต่อเงื่อนไขการทดลอง ครอบคลุมช่วงเวลา 0.080 วินาที หรือคิดเป็นอัตราการสุ่มสัญญาณประมาณ 25,600 เฮิร์ตซ์ โดยข้อมูลดังกล่าวเป็นช่วงสัญญาณที่บันทึกระหว่างกระบวนการแกะสลักไม้ภายใต้รูปแบบเส้นทางที่กำหนด ทั้งนี้ การวิเคราะห์ไม่ได้ใช้สัญญาณตลอดกระบวนการแกะสลักทั้งหมด แต่ใช้ช่วงข้อมูลสั้นที่เลือกมาเป็นตัวแทนของสัญญาณการสั่นสะเทือนในเงื่อนไขนั้น ๆ ถูกนำมาปรับเรียบด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average: MA) และการปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย (Simple Exponential Smoothing: SES) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณภายใต้ระดับการปรับเรียบที่แตกต่างกัน และประเมินระดับความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบกับสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบด้วยค่า MAE, RMSE และ NRMSE

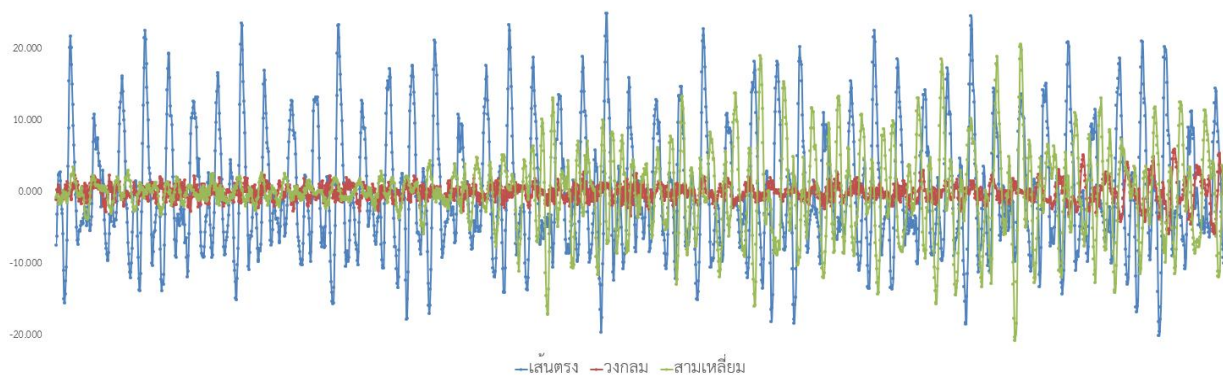
5. ผลการวิจัย

ผลการเปรียบเทียบลายเซ็นการสั่นสะเทือนแบบโดเมนเวลาของสปินเดิลเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กตามรูปแบบเส้นทางการแกะสลักไม้ มีรายละเอียด ดังนี้

5.1 ผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา โดยข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนของแต่ละเงื่อนไขมีจำนวน 2,048 จุด ที่อัตราการสุ่มสัญญาณ 25,600 Hz ตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา แสดงดังภาพที่ 7 และผลการคำนวณค่าทางสถิติของสัญญาณ ได้แก่ Mean, SD, RMS, Peak และ Peak-to-Peak ดังตารางที่ 6

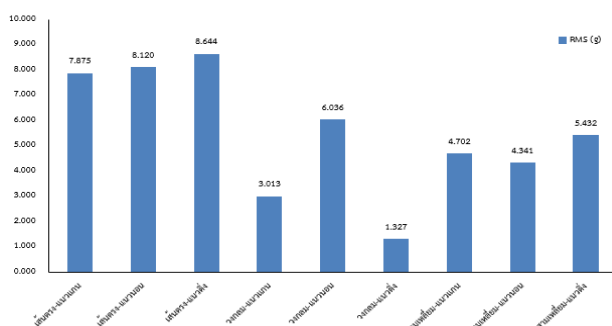
ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน

เส้นทาง	ทิศทาง	Mean (g)	SD (g)	RMS (g)	Peak (g)	Peak- to-Peak (g)
เส้นตรง	แนวแกน	0.001	7.877	7.875	26.464	47.610
เส้นตรง	แนวนอน	0.001	8.122	8.120	25.256	45.659
เส้นตรง	แนวตั้ง	0.000	8.646	8.644	25.028	45.019
วงกลม	แนวแกน	0.001	3.013	3.013	17.435	32.551
วงกลม	แนวนอน	0.001	6.037	6.036	30.600	52.939
วงกลม	แนวตั้ง	0.001	1.328	1.327	6.069	11.829
สามเหลี่ยม	แนวแกน	0.000	4.703	4.702	17.414	29.662
สามเหลี่ยม	แนวนอน	0.001	4.342	4.341	14.912	27.434
สามเหลี่ยม	แนวตั้ง	0.001	5.433	5.432	20.704	41.374



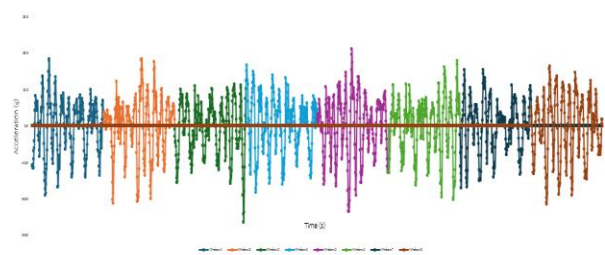
ภาพที่ 7 สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลาของสปินเดิลภายใต้เส้นทางการแกะสลักต่างกัน โดยแสดงตัวอย่างในทิศทางแนวดิ่ง

จากตารางที่ 6 พบว่า ค่าเฉลี่ยของสัญญาณในทุกเงื่อนไขมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงถึงลักษณะของสัญญาณความเร่งที่แกว่งตัวรอบค่ากลาง เมื่อพิจารณาค่า RMS ดังภาพที่ 8 พบว่า เส้นทางแบบเส้นตรงมีค่า RMS สูงที่สุดในทั้งสามทิศทาง โดยมีค่า RMS อยู่ ในช่วง 7.875–8.644 g รองลงมาคือ เส้นทางแบบสามเหลี่ยม ซึ่งมีค่า RMS อยู่ในช่วง 4.341–5.432 g ส่วนเส้นทางแบบวงกลมมีค่า RMS แตกต่างกันมาก ระหว่างทิศทางการวัด โดยเฉพาะแนวดิ่งที่มีค่า RMS ต่ำที่สุดเท่ากับ 1.327 g เมื่อพิจารณาค่า Peak-to-Peak ตามรูปแบบเส้นทางและทิศทางการวัด แสดงว่าสัญญาณในเงื่อนไขนี้มีการแกว่งสูง แม้ว่าค่า RMS โดยรวมจะต่ำกว่าเส้นทางแบบเส้นตรงก็ตาม ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการพิจารณาเฉพาะค่า RMS อาจไม่เพียงพอในการอธิบายลักษณะสัญญาณทั้งหมด จึงควรพิจารณาค่า Peak และ Peak-to-Peak ร่วมด้วย



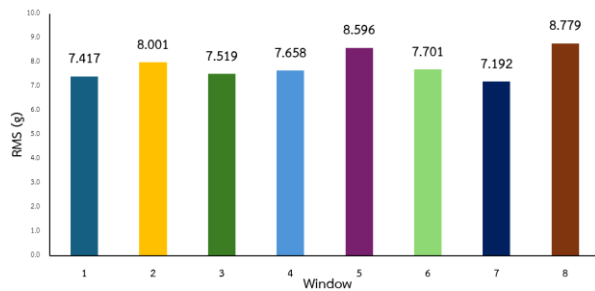
ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบค่า RMS ของสัญญาณการสั่นสะเทือน

5.2 ผลการวิเคราะห์แบบแบ่งช่วงเวลา เพื่อประเมินความสม่ำเสมอของสัญญาณภายในช่วงการวัดเดียวกัน ข้อมูลสัญญาณแต่ละชุดถูกแบ่งออกเป็น 8 ช่วงย่อย ช่วงละ 256 จุด และตัวอย่าง ดังภาพที่ 9 จากนั้นคำนวณค่า RMS ของแต่ละช่วงย่อย ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 9 ตัวอย่างการแบ่งสัญญาณการสั่นสะเทือนจำนวน 2,048 จุด ออกเป็น 8 ช่วง ช่วงละ 256 จุด เพื่อการวิเคราะห์แบบแบ่งช่วงเวลาของเส้นตรง-แนวแกน

จากภาพที่ 9 แสดงสัญญาณการสั่นสะเทือนที่แบ่งออกเป็น 8 ช่วงย่อย โดยแต่ละช่วงมีจำนวน 256 จุด พบว่ารูปแบบสัญญาณของแต่ละช่วงมีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดในลักษณะใกล้เคียงกัน แม้จะมีความแตกต่างของระดับการสั่นสะเทือนในบางช่วง สะท้อนว่าสัญญาณของเส้นทางแบบเส้นตรงในแนวแกนมีลักษณะค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดช่วงข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์



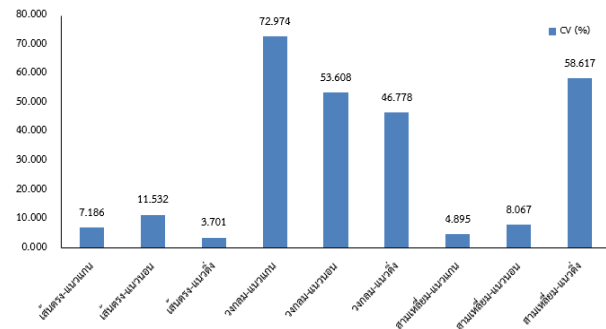
ภาพที่ 10 ค่า RMS ของสัญญาณการสั่นสะเทือนในแต่ละช่วงย่อยจำนวน 8 ช่วง ของเส้นตรงแนวแกน

จากภาพที่ 10 ค่า RMS ของทั้ง 8 ช่วงมีค่าเท่ากับ 7.417, 8.001, 7.519, 7.658, 8.596, 7.701, 7.192 และ 8.779 g ตามลำดับ โดยมีค่า RMS เฉลี่ยที่ 7.858 g และมีค่า CV ประมาณ 7.186 % แสดงให้เห็นว่าระดับการสั่นสะเทือนระหว่างช่วงย่อยมีความแปรปรวนค่อนข้างต่ำ โดยช่วงที่ 8 ให้ค่า RMS สูงที่สุดที่ 8.779 g ขณะที่ช่วงที่ 7 ให้ค่าต่ำที่สุดที่ 7.192 g ซึ่งสนับสนุนว่าการสั่นสะเทือนของเส้นทางแบบเส้นตรงในแนวแกนมีระดับค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงสัญญาณ

จากนั้นนำมาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 7 ส่วนการเปรียบเทียบค่า CV ของแต่ละเงื่อนไขแสดงดังภาพที่ 12

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ RMS แบบแบ่งช่วงเวลา

เส้นทาง	ทิศทาง	RMS เฉลี่ย (g)	SD ของ RMS (g)	RMS ต่ำสุด (g)	RMS สูงสุด (g)	CV (%)
เส้นตรง	แนวแกน	7.858	0.565	7.192	8.779	7.186
เส้นตรง	แนวนอน	8.073	0.931	6.921	9.258	11.532
เส้นตรง	แนวตั้ง	8.639	0.320	8.294	9.170	3.701
วงกลม	แนวแกน	2.488	1.816	1.061	5.777	72.974
วงกลม	แนวนอน	5.395	2.892	1.779	8.949	53.608
วงกลม	แนวตั้ง	1.216	0.569	0.936	2.608	46.778
สามเหลี่ยม	แนวแกน	4.697	0.230	4.337	4.940	4.895
สามเหลี่ยม	แนวนอน	4.328	0.349	3.826	4.895	8.067
สามเหลี่ยม	แนวตั้ง	4.763	2.792	1.145	8.291	58.617



ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน CV ของ RMS แบบแบ่งช่วงเวลา

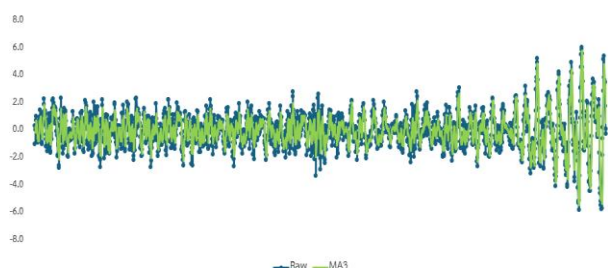
จากตารางที่ 7 และภาพที่ 12 พบว่า เส้นทางแบบเส้นตรงมีค่า RMS เฉลี่ยสูงและมีค่า CV ต่ำ โดยเฉพาะทิศทางแนวตั้งที่มีค่า CV เท่ากับ 3.701 % แสดงว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนมีความสม่ำเสมอระหว่างช่วงเวลาที่ค่อนข้างสูง ส่วนเส้นทางแบบสามเหลี่ยมในแนวแกนและแนวนอนมีค่า CV ต่ำเช่นกัน คือ 4.895% และ 8.067% ตามลำดับ แสดงถึงลักษณะสัญญาณที่ค่อนข้างสม่ำเสมอในสองทิศทางดังกล่าว ในทางกลับกัน เส้นทางแบบวงกลมมีค่า CV สูงในทุกทิศทาง โดยเฉพาะแนวแกนที่มีค่า CV เท่ากับ 72.974% และแนวนอนเท่ากับ 53.608 % แสดงว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของเส้นทางแบบวงกลมมีความแปรปรวนระหว่างช่วงเวลาสูงกว่าเส้นทางแบบเส้นตรงและสามเหลี่ยม นอกจากนี้ เส้นทางแบบสามเหลี่ยมในแนวตั้งมีค่า CV เท่ากับ 58.617 % แสดงว่าการสั่นสะเทือนในทิศทางนี้มีความแปรปรวนสูง แม้ว่าเส้นทางแบบสามเหลี่ยมในแนวแกนและแนวนอนจะมีความสม่ำเสมอก็ตาม

5.3 ผลการปรับเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือน การปรับเทียบสัญญาณดำเนินการด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่และการปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย โดยใช้ค่า MAE, RMSE และ NRMSE เพื่ออธิบายระดับความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบกับสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ ค่าเหล่านี้จึงสะท้อนระดับการเบี่ยงเบนของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการปรับเรียบ เพื่อให้การนำเสนอผลมีความกระชับ จึงแสดงผลของ MA3 ดังตารางที่ 8 เป็นตัวแทนของการปรับเรียบด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ เพื่อแสดงระดับความแตกต่างระหว่าง

สัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบภายใต้หน้าต่างขนาด 3 จุด ทั้งนี้ ผลจาก MA5 และ SES ที่ค่า α เท่ากับ 0.1 และ 0.5 ใช้ประกอบการศึกษาผลของระดับการปรับเรียบต่อสัญญาณ และตัวอย่างการเปรียบเทียบสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบด้วยวิธี MA3 แสดงดังภาพที่ 13

ตารางที่ 8 ค่าความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบด้วยวิธี MA3 ในแต่ละเงื่อนไข

เส้นทาง	ทิศทาง	MAE (g)	RMSE (g)	NRMSE
เส้นตรง	แนวแกน	2.020	2.551	0.324
เส้นตรง	แนวนอน	1.744	2.350	0.289
เส้นตรง	แนวตั้ง	1.904	2.419	0.280
วงกลม	แนวแกน	1.015	1.413	0.469
วงกลม	แนวนอน	1.469	2.308	0.382
วงกลม	แนวตั้ง	0.568	0.706	0.532
สามเหลี่ยม	แนวแกน	1.511	1.959	0.417
สามเหลี่ยม	แนวนอน	1.353	1.705	0.393
สามเหลี่ยม	แนวตั้ง	1.179	1.632	0.300



ภาพที่ 13 ตัวอย่างการเปรียบเทียบสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบด้วยวิธี MA3 กรณีเส้นทางวงกลมแนวตั้งที่ให้ผลความคลาดเคลื่อนต่ำสุด

จากตารางที่ 8 พบว่า การปรับเรียบสัญญาณด้วยวิธี MA3 ให้ระดับความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบแตกต่างกันตามรูปแบบเส้นทางและทิศทางการวัด โดยค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.706–2.551 g และค่า NRMSE อยู่ในช่วง 0.280–0.532 กรณีเส้นทางแบบ

วงกลมในแนวตั้งมีค่า RMSE ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.706 g ขณะที่เส้นทางแบบเส้นตรงในแนวแกนมีค่า RMSE สูงที่สุดเท่ากับ 2.551 g ทั้งนี้ ค่า MAE, RMSE และ NRMSE ใช้เพื่อสะท้อนระดับการเบี่ยงเบนระหว่างสัญญาณดิบกับสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ

6. สรุปและอภิปรายผล

6.1 สรุปผล ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เส้นทางและการสั่นทั้งสามรูปแบบมีลักษณะลายเซ็นการสั่นสะเทือนแบบโดเมนเวลาที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาค่า RMS พบว่าเส้นทางแบบเส้นตรงมีระดับการสั่นสะเทือนโดยรวมสูงที่สุดในทั้งสามทิศทาง โดยมีค่า RMS อยู่ในช่วง 7.875–8.644 g ขณะที่เส้นทางแบบสามเหลี่ยมมีค่า RMS อยู่ในระดับปานกลาง และเส้นทางแบบวงกลมมีค่า RMS แตกต่างกันไปมากระหว่างทิศทางการวัด โดยเฉพาะแนวตั้งที่มีค่า RMS ต่ำที่สุด

ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของการตรวจติดตามสัญญาณการสั่นสะเทือนในกระบวนการกัด ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้ระบุว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถใช้สะท้อนพฤติกรรมของกระบวนการตัดและสภาวะการทำงานของเครื่องจักรได้ [2], [23], [24] โดยเฉพาะในงานกัดวัสดุไม้หรือวัสดุฐานไม้ Hortobágyi และคณะได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์การกัดสามารถส่งผลต่อขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ [2]

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์แบบแบ่งช่วงเวลา พบว่า เส้นทางแบบเส้นตรงมีค่า CV ต่ำในทุกทิศทาง โดยเฉพาะแนวตั้งที่มีค่า CV เท่ากับ 3.701% แสดงว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนมีความสม่ำเสมอระหว่างช่วงเวลาค่อนข้างสูง ในขณะที่เส้นทางแบบวงกลมมีค่า CV สูงในทุกทิศทาง โดยเฉพาะแนวแกนและแนวนอน ซึ่งมีค่า CV เท่ากับ 72.974% และ 53.608% ตามลำดับ แสดงถึงความแปรปรวนของสัญญาณระหว่างช่วงเวลาที่สูงกว่าเส้นทางรูปแบบอื่น

สำหรับเส้นทางแบบสามเหลี่ยม พบว่าแนวแกนและแนวนอนมีค่า CV ต่ำ แสดงถึงความสม่ำเสมอของ

สัญญาณในสองทิศทางดังกล่าว อย่างไรก็ตาม แนวตั้งของเส้นทางแบบสามเหลี่ยมมีค่า CV เท่ากับ 58.617% แสดงว่าสัญญาณในทิศทางนี้มีความแปรปรวนสูงเมื่อเทียบกับแนวแกนและแนวนอน

ด้านการปรับเรียบสัญญาณ พบว่าวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ขนาด 3 จุด หรือ MA3 ให้ระดับความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบแตกต่างกันตามรูปแบบเส้นทางและทิศทางการวัด โดยค่า MAE, RMSE และ NRMSE สะท้อนระดับการเบี่ยงเบนของสัญญาณภายหลังการปรับเรียบ ทั้งนี้ การใช้หน้าต่างเฉลี่ยที่มีขนาดเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้สัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบมีความแตกต่างจากสัญญาณดิบเพิ่มขึ้น ดังนั้น ตัวชี้วัดดังกล่าวจึงใช้เพื่ออธิบายระดับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดจากการปรับเรียบ

6.2 อภิปรายผล ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า รูปแบบเส้นทางและการแกะสลักทั้งสามแบบให้ลักษณะลายเส้นการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจอธิบายได้จากลักษณะการเคลื่อนที่ของดอกกัดและการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแรงตัดระหว่างกระบวนการแกะสลัก แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Petrovic และคณะ ซึ่งระบุว่าในงาน CNC wood machining รูปแบบเส้นทางกัดมีความสัมพันธ์กับมุมสัมผัสระหว่างดอกกัดกับชิ้นงาน ระยะกินลึกแนวแกนและแนวรัศมี รูปแบบอัตราป้อน และความแปรปรวนของแรงตัด [25] โดยเส้นทางแบบเส้นตรงมีระดับการสั่นสะเทือนโดยรวมค่อนข้างสูง แต่มีความสม่ำเสมอของสัญญาณมากกว่าเมื่อพิจารณาจากค่า CV ที่ต่ำ สะท้อนว่าสปินเดิลมีการตอบสนองในระดับสูงแต่ค่อนข้างคงที่ ขณะที่เส้นทางแบบวงกลมมีการเปลี่ยนทิศทางอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของทิศทางแรงตัดและการตอบสนองของสปินเดิล ตลอดช่วงการกัด จึงอาจสัมพันธ์กับค่า CV สูงในหลายทิศทาง ส่วนเส้นทางแบบสามเหลี่ยมมีลักษณะอยู่ระหว่างเส้นตรงและวงกลม โดยแนวแกนและแนวนอนมีความสม่ำเสมอค่อนข้างดี แต่แนวตั้งมีค่า CV สูง ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนทิศทางของดอกกัดบริเวณมุมของเส้นทาง อย่างไรก็ตาม การอธิบายดังกล่าวเป็นการ

ตีความจากข้อมูลในโดเมนเวลา จึงยังไม่สามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์เชิงสาเหตุได้อย่างสมบูรณ์

นอกจากนี้ ค่าการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดมีความแตกต่างกันตามทิศทางการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน โดยเส้นทางเดียวกันสามารถให้ค่า RMS, Peak-to-Peak และ CV แตกต่างกันในแต่ละทิศทาง เช่น เส้นทางแบบวงกลมมีค่า RMS ในแนวนอนสูงกว่าแนวตั้ง ขณะที่เส้นทางแบบสามเหลี่ยมมีค่า CV ในแนวตั้งสูงกว่าแนวแกนและแนวนอน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดที่ว่าตำแหน่งและทิศทางการตรวจวัดมีผลต่อค่าการสั่นสะเทือนที่ตรวจจับได้ [24] และสอดคล้องกับงานของ Ma และคณะ ซึ่งใช้คุณลักษณะของสัญญาณความเร่งในโดเมนเวลา เช่น ค่าเฉลี่ย ค่า Peak และค่า RMS เพื่ออธิบายลักษณะของสัญญาณจากกระบวนการตัด [23] ดังนั้น การศึกษานี้จึงพิจารณาข้อมูลแต่ละทิศทางแยกจากกัน เนื่องจากไม่ได้วัดสัญญาณพร้อมกันทั้งสามแกน ซึ่งช่วยให้การตีความผลสอดคล้องกับข้อมูลที่ตรวจวัดจริงมากขึ้น

การใช้ตัวชี้วัดหลายตัวร่วมกัน ได้แก่ RMS, Peak, Peak-to-Peak และ CV ช่วยให้อธิบายลักษณะของสัญญาณได้ครอบคลุมกว่าการใช้ค่า RMS เพียงค่าเดียว โดย RMS สะท้อนระดับการสั่นสะเทือนโดยรวม Peak และ Peak-to-Peak แสดงแอมพลิจูดสูงสุดและช่วงการแกว่งของสัญญาณ ส่วน CV ใช้อธิบายความสม่ำเสมอหรือความแปรปรวนระหว่างช่วงเวลา ตัวอย่างเช่น เส้นทางแบบวงกลมในแนวนอนมีค่า Peak-to-Peak สูง แม้ค่า RMS จะต่ำกว่าเส้นทางแบบเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าตัวชี้วัดแต่ละชนิดสะท้อนคุณลักษณะของสัญญาณต่างกัน แนวทางนี้สอดคล้องกับงานของ García Plaza และคณะ ซึ่งระบุว่าการสกัดคุณลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถนำไปใช้ในการติดตามสภาพกระบวนการ CNC ได้ [26]

สำหรับการปรับเรียบสัญญาณ พบว่า ผลการปรับเรียบแสดงให้เห็นว่าขนาดหน้าต่างของ MA และค่าพารามิเตอร์ของ SES มีความสัมพันธ์กับระดับความแตกต่างระหว่างสัญญาณดิบและสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบ โดยการปรับเรียบที่เพิ่มขึ้นสามารถทำให้รายละเอียด

การเปลี่ยนแปลงระยะสั้นของสัญญาณลดลง ขณะเดียวกัน สัญญาณหลังการปรับเรียบอาจมีระยะห่างจากสัญญาณดิบเพิ่มขึ้น ดังนั้น ค่า MAE, RMSE และ NRMSE ในงานวิจัยนี้ จึงใช้เพื่ออธิบายระดับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณหลังการปรับเรียบ ไม่ได้ใช้เพื่อจัดอันดับหรือระบุวิธีปรับเรียบที่เหมาะสมที่สุด การเลือกวิธีปรับเรียบสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงควรพิจารณาเกณฑ์ด้านการลดสัญญาณรบกวนร่วมกับความสามารถในการรักษาคูณลักษณะที่สำคัญของสัญญาณ

โดยภาพรวม ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนเวลาสามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการเปรียบเทียบลายเส้นการสั่นสะเทือนของสปินเดิลภายใต้รูปแบบเส้นทางการแกะสลักที่แตกต่างกันได้ เมื่อพิจารณาร่วมกันทั้งระดับการสั่นสะเทือน ความรุนแรงของแอมพลิจูด ความแปรปรวนของสัญญาณ และผลของการปรับเรียบ อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยควรตีความภายใต้ขอบเขตของเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก วัสดุไม้ธรรมชาติชนิดเดียว และเงื่อนไขการตัดที่กำหนดคงที่เท่านั้น

6.3 ข้อจำกัดของการวิจัย งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดที่ควรพิจารณาในการตีความผลการวิจัย เนื่องจากการทดลองใช้วัสดุชิ้นงานเป็นไม้ตะเคียนรากเพียงชนิดเดียว ซึ่งเป็นไม้ธรรมชาติที่อาจมีความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างภายใน เช่น ลายไม้ ความหนาแน่น และทิศทางการเสี้ยนไม้ ดังนั้น ผลการวิจัยจึงยังไม่สามารถสรุปทั่วไปไปยังไม้ชนิดอื่นหรือวัสดุไม้ประกอบได้โดยตรง

นอกจากนี้ การทดลองกำหนดค่าพารามิเตอร์การตัดคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบสปินเดิล อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยเปลี่ยนแปลงเฉพาะรูปแบบเส้นทางการแกะสลักเท่านั้น ผลการวิจัยจึงสะท้อนความแตกต่างของลายเส้นการสั่นสะเทือนภายใต้เส้นทางการแกะสลักที่กำหนด แต่ยังไม่ครอบคลุมผลของพารามิเตอร์การตัดอื่น ๆ ต่อสัญญาณการสั่นสะเทือน ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ในแต่ละเงื่อนไขมีจำนวน 2,048 จุด ในช่วงเวลา 0.080 วินาที ซึ่งเป็นช่วงเวลานั้นเมื่อเทียบกับกระบวนการแกะสลักทั้งหมด แม้ว่าข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้เปรียบเทียบลักษณะสัญญาณ

ในโดเมนเวลาได้ แต่ยังไม่ครอบคลุมพฤติกรรมของสัญญาณตลอดกระบวนการตัด เช่น ช่วงเริ่มต้น ช่วงตัดต่อเนื่อง และช่วงสิ้นสุดการตัด

อีกทั้ง การศึกษานี้ดำเนินการกับเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กเพียงเครื่องเดียว และมีจำนวนการทดลองซ้ำจำกัด จึงเหมาะสำหรับการเปรียบเทียบเชิงพรรณนาและการวิเคราะห์แนวโน้มของลายเส้นการสั่นสะเทือนเป็นหลัก ยังไม่เหมาะต่อการสรุปผลเชิงนัยสำคัญทางสถิติหรือการสรุปเชิงสาเหตุอย่างสมบูรณ์ ดังนั้น การนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ควรพิจารณาภายใต้ขอบเขตของเครื่องจักร วัสดุ เครื่องมือตัด เงื่อนไขการตัด และช่วงข้อมูลสัญญาณที่กำหนดในการศึกษานี้

7. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยและข้อจำกัดของการศึกษา สามารถสรุปข้อเสนอแนะได้ 2 ประเด็น ดังนี้

7.1 ข้อเสนอแนะด้านการขยายขอบเขตการทดลอง งานวิจัยในอนาคตควรเพิ่มชนิดของวัสดุ ชิ้นงาน เช่น ไม้ธรรมชาติชนิดอื่น หรือวัสดุไม้ประกอบ รวมทั้งเพิ่มระดับของพารามิเตอร์การตัดเฉือน เช่น ความเร็วรอบสปินเดิล อัตราป้อน และความลึกในการตัด เพื่อศึกษาผลของตัวแปรเหล่านี้ต่อลายเส้นการสั่นสะเทือนของสปินเดิลให้ครอบคลุมมากขึ้น

7.2 ข้อเสนอแนะด้านการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์สัญญาณ ควรเพิ่มจำนวนการทดลองซ้ำและเก็บข้อมูลสัญญาณให้ครอบคลุมช่วงเวลาการตัดมากขึ้น เช่น ช่วงเริ่มต้น ช่วงตัดต่อเนื่อง และช่วงสิ้นสุดการตัด เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลได้อย่างน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น นอกจากนี้ อาจขยายการวิเคราะห์ไปสู่โดเมนความถี่หรือโดเมนเวลา-ความถี่ เช่น FFT หรือ Wavelet เพื่อศึกษาความถี่เด่นและองค์ประกอบของสัญญาณเพิ่มเติม

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม (ต่อเนื่อง) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่สนับสนุนทรัพยากรต่าง ๆ
สำหรับดำเนินการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างดี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Phetsuwan, W., Thongkaew, K. and Srivabut, C. 2025. "Evaluation of the milling performance on wood-plastic composite," *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports*, 28(5): p. e259643. [Online]. Available: <https://doi.org/10.55164/ajstr.v28i5.259643>
- [2] Hortobágyi, Á. and et al. 2023. "Effect of milling parameters on amplitude spectrum of vibrations during milling materials based on wood," *Applied Sciences*, 13(8): p. 5061. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app13085061>
- [3] Kovatchev, G. and Atanasov, V. 2021. "Determination of vibration during longitudinal milling of wood-based materials," *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen res Publica Slovaca*, 63(1): pp. 85–92. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17423/afx.2021.63.1.08>
- [4] Szwajka, K. and Górski, J. 2006. "Evaluation tool condition of milling wood on the basis of vibration signal," in *Journal of Physics: Conference Series*, 48(1): pp. 1205–1210. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/48/1/224>
- [5] Supriadi, A. 2024. "Machining properties of nyerakat and resak woods originated from West Kalimantan," in *AIP Conference Proceedings*, 3042(1): p. 070004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/5.0200880>
- [6] Murugesan, S. and et al. 2026. "Analysis and optimization of the delamination factor in the drilling of wood-thermo plastic composites: An approach based on artificial intelligence," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 39(5): pp. 2512–2549. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/08927057231208940>
- [7] Tosun, M., Sofuoglu, S. D. and Keser, K. 2026. "Prediction of surface roughness at the machining of densified wood surfaces," *Wood Material Science & Engineering*, 21(1): pp. 82–90. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2372579>
- [8] Çakiroğlu, E. O. 2025. "Prediction of dust emissions during CNC milling of spruce and pine with machine learning," *European Journal of Wood and Wood Products*, 83(5): p. 173. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02145-2>
- [9] Demir, A., Cakiroglu, E. O. and Aydin, I. 2022. "Determination of CNC processing parameters for the best wood surface quality via artificial neural network," *Wood Material Science & Engineering*, 17(6): pp. 685–692. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1964030>
- [10] Ibrisevic, A. and et al. 2023. "Effects of cutting parameters and grain direction on surface quality of three wood species obtained by CNC milling," *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering*, 16(65): pp. 127–140. [Online]. Available: <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.2.10>

- [11] Eramah, A. A. and Olodu, D. D. 2025. "Modelling and optimization of the effects of milling parameters on quality and productivity, in a CNC face milling operation," *Global Journal of Multidisciplinary Studies and Technological Innovation*, 2(1): p. 22. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10892341>
- [12] Huang, Y.-C. and Hou, C.-C. 2023. "Using feature engineering and principal component analysis for monitoring spindle speed change based on Kullback–Leibler divergence with a Gaussian mixture model," *Sensors*, 23(13): p. 6174. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s23136174>
- [13] Nie, L., Xu, S. and Zhang, L. 2023. "Multi-head attention network with adaptive feature selection for RUL predictions of gradually degrading equipment," *Actuators*, 12(4): p. 158. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/act12040158>
- [14] Harth, N., Anagnostopoulos, C. and Pezaros, D. 2018. "Predictive intelligence to the edge: impact on edge analytics," *Evolving Systems*, 9(2): pp. 95–118. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12530-017-9190-z>
- [15] Mumuangsong, P. and Hansasuk, S. 2013. *Vibration Analysis*. Bangkok, Thailand: SE-ED Publisher. (in Thai)
- [16] Wongsuwarn, H. 2009. *Machine Vibration Inspection*. Bangkok, Thailand: SE-ED Publisher. (in Thai)
- [17] Brüel & Kjær. 2012. *Vibration Transducers and Signal Conditioning (BA7675-12)*. Nærum, Denmark: Brüel & Kjær. [Online]. Available: <https://www.bksv.com/>
- [18] Hyndman, R. J. and Athanasopoulos, G. 2018. *Forecasting: Principles and Practice*, 2nd ed. Melbourne, Australia: OTexts. [Online]. Available: <https://otexts.com/fpp2/>
- [19] Lila, B. 2010. *Production Planning and Control*. Bangkok, Thailand: TOP Publishing. (in Thai)
- [20] Ye, J. and et al. 2018. "A novel approach for chatter online monitoring using coefficient of variation in machining process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(1): pp. 287–297. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1582-7>
- [21] Fang, Z., Zhang, Q. and Shi, X. 2025. "Amplitude normalization for speed-induced modulation in rotating machinery measurements," *Sensors*, 25(20): p. 6374. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s25206374>
- [22] Kumar, S. and et al. 2024. "Gear degradation study using statistical time features and shallow neural networks," *IEEE Access*, 12: pp. 111411–111421. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3438317>
- [23] Ma, L. and et al. 2020. "Experimental investigation of cutting vibration during micro-end-milling of the straight groove," *Micromachines*, 11(5): p. 494. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/mi11050494>

- [24] Yao, Z. and et al. 2021. "Position dependent vibration evaluation in milling of thin-walled part based on single-point monitoring," *Measurement*, 171: p. 108810. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108810>
- [25] Petrovic, A. and et al. 2017. "Optimisation of tool path for wood machining on CNC machines," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(1): pp. 72–87. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0954406216631378>
- [26] García Plaza, E., Núñez López, P. J. and Beamud González, E. M. 2019. "Efficiency of vibration signal feature extraction for surface finish monitoring in CNC machining," *Journal of Manufacturing Processes*, 44: pp. 145–157. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.044>

การศึกษาองค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมผักตบชวากับมูลวัว ในระดับห้องปฏิบัติการ

LABORATORY-SCALE STUDY OF BIOGAS COMPOSITION AND HEATING VALUE FROM CO-DIGESTION OF WATER HYACINTH AND CATTLE MANURE

ทิฆัมพร เขมวงศ์^{1*}, วิศรุต ช่วยจันทร์², ศักดิ์พี ขุนเพชร¹, ประภัศร กุลทอง², วิชิต มาลาเวช¹

Thikhamporn Khemwong^{1*}, Witsarut Chuayjan², Sakrapee Khunpetch¹, Prapatsorn Kulthong²,
Vichit Malaweche¹

¹ หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

² หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

¹ Bachelor of Industrial Science Program, Major in Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,
Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

² Bachelor of Industrial Science Programs, Department of Civil Engineering Technology, Faculty of Engineering and Industrial
Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: thikhamporn_khe@nstru.ac.th

วันที่รับบทความ: 30 กรกฎาคม 2569 ; วันที่ทบทวนบทความ: 11 สิงหาคม 2569 ; วันที่ตอบรับบทความ: 28 สิงหาคม 2569 ;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 31 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของผักตบชวาและมูลวัว และเปรียบเทียบองค์ประกอบและค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมที่อัตราส่วนแตกต่างกัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาและทดสอบระบบในระดับนำร่อง การทดลองดำเนินการในถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนขนาด 5 ลิตร โดยกำหนดอัตราส่วนผักตบชวาต่อมูลวัวตามน้ำหนักแห้ง 5 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 และวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซออกซิเจน (O_2) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ผลจากการวัดองค์ประกอบก๊าซจำนวน 3 ครั้งพบว่า อัตราส่วน 50:50 ให้สัดส่วนมีเทนเฉลี่ยสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ เท่ากับ $60.80 \pm 0.66\%$ ขณะที่ CO_2 , O_2 และ H_2S มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $36.50 \pm 0.46\%$, $1.90 \pm 0.10\%$ และ 141.00 ± 3.61 ppm ตามลำดับ เมื่อคำนวณค่าความร้อนจากสัดส่วนมีเทน พบว่าก๊าซชีวภาพจากอัตราส่วน 50:50 มีค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตร 21.77 MJ/m^3 ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุดในกลุ่มอัตราส่วนที่ศึกษา ทั้งนี้ การศึกษายังประเมินศักยภาพด้านพลังงานและเศรษฐศาสตร์ในรูปแบบ สถานการณ์สมมติ ที่กำหนดให้ระบบระดับประยุกต์ผลิตก๊าซชีวภาพได้ $1.00 \text{ m}^3/\text{day}$ โดยค่าดังกล่าวไม่ได้เป็นปริมาณก๊าซที่วัดจากถังหมักขนาด 5 ลิตร ภายใต้สมมติฐานเงินลงทุน 18,000 บาท ค่าใช้จ่ายดำเนินงานและบำรุงรักษา 1,000 บาท/ปี และมูลค่าการประหยัดพลังงานขั้นต้น 4,701.20 บาท/ปี จะมีกระแสเงินสดสุทธิ 3,701.20 บาท/ปี และมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 4.86 ปี ผลการศึกษาจึงเป็นข้อมูลระดับห้องปฏิบัติการที่แสดง

แนวโน้มว่าอัตราส่วน 50:50 ให้สัดส่วนมีเทนและค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรก๊าซชีวภาพสูงในชุดการทดลองนี้ อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องศึกษาปริมาณก๊าซ ผลผลิตก๊าซต่อหน่วย VS เสถียรภาพของกระบวนการ และทดสอบในระบบระดับนำร่องก่อนสรุปความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในระดับครัวเรือนหรือชุมชน

คำสำคัญ: ก๊าซชีวภาพ, ผักตบชวา, มูลวัว, การย่อยร่วม

Abstract: This study investigated the basic characteristics of water hyacinth and cattle manure and compared the composition and volumetric heating value of biogas obtained from different co-digestion ratios. The results were intended to provide preliminary laboratory-scale information for subsequent pilot-scale development and validation. Experiments were conducted using 5-L anaerobic digesters with five water-hyacinth-to-cattle-manure ratios on a dry-weight basis: 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, and 0:100. The resulting biogas was analyzed for methane (CH_4), carbon dioxide (CO_2), oxygen (O_2), and hydrogen sulfide (H_2S). Based on three gas-composition measurements, the 50:50 ratio produced the highest mean methane fraction under the conditions investigated, at $60.80 \pm 0.66\%$, whereas the corresponding mean CO_2 , O_2 , and H_2S values were $36.50 \pm 0.46\%$, $1.90 \pm 0.10\%$, and 141.00 ± 3.61 ppm, respectively. Based on its methane fraction, the calculated volumetric heating value of biogas from the 50:50 treatment was 21.77 MJ/m^3 , the highest among the investigated ratios. A separate scenario-based energy and economic assessment was also performed by assuming a future application-scale biogas production rate of $1.00 \text{ m}^3/\text{day}$; this value was not measured from the 5-L laboratory digesters. Under assumptions of an initial investment of 18,000 THB, annual operating and maintenance costs of 1,000 THB, and gross annual energy savings of 4,701.20 THB, the annual net cash flow was 3,701.20 THB and the simple payback period was approximately 4.86 years. These laboratory-scale results indicate that the 50:50 ratio provided a comparatively high methane fraction and volumetric heating value under the conditions tested. Measurements of cumulative biogas production, specific methane yield, process stability, and pilot-scale performance are required before conclusions regarding household- or community-scale applicability can be made.

Key words: Biogas, Water hyacinth, Cattle manure, Co-digestion

1. บทนำ

การพัฒนาพลังงานทดแทนจากทรัพยากรชีวมวลในท้องถิ่นเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงาน ลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล และสนับสนุนการพัฒนาอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะในพื้นที่ชนบทของประเทศไทยที่มีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและชีวมวลเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง การนำของเสียอินทรีย์เหล่านี้กลับมาใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานชีวภาพสามารถช่วยลดปัญหาของเสียและเพิ่มมูลค่าให้ทรัพยากรท้องถิ่น [1], [2] ก๊าซชีวภาพ

(Biogas) สามารถผลิตได้จากวัสดุอินทรีย์ผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยมีก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ให้พลังงานและสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการหุงต้ม การให้ความร้อน หรือผลิตไฟฟ้า ทั้งนี้ประสิทธิภาพของระบบขึ้นอยู่กับชนิดวัตถุดิบ รูปแบบถังหมัก อุณหภูมิ pH และระยะเวลาการหมัก [3]

ผักตบชวา (Water hyacinth) เป็นพืชน้ำที่พบแพร่หลายในประเทศไทยและเพิ่มจำนวนได้รวดเร็ว หากสะสมมากอาจก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันของทางน้ำและกระทบต่อระบบ

นิเวศ อย่างไรก็ตาม ผักตบชวามีสารอินทรีย์และโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพได้ และการลดขนาดหรือปรับสภาพก่อนหมักสามารถช่วยเพิ่มการย่อยสลายของจุลินทรีย์ [4], [5] ขณะที่มูลวัวเป็นของเสียจากการเลี้ยงสัตว์ที่มีทั้งสารอินทรีย์ ธาตุอาหาร และจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหมัก การนำมูลวัวมาย่อยร่วม (Co-digestion) กับวัสดุชีวมวลชนิดอื่นจึงอาจช่วยเสริมองค์ประกอบสารอาหาร ลดข้อจำกัดของวัตถุดิบเดี่ยว และช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบ [6], [7]

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็กมีศักยภาพต่อการพัฒนาเพื่อใช้งานในระดับครัวเรือนหรือชุมชน แต่ความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงขึ้นอยู่กับปริมาณวัตถุดิบ ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ ต้นทุนการติดตั้ง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน และรูปแบบการใช้พลังงาน [8], [9] สำหรับอำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช มีทั้งแหล่งน้ำธรรมชาติ พื้นที่เกษตรกรรม และการเลี้ยงโคในระดับครัวเรือนและฟาร์มขนาดเล็ก จึงพบทั้งผักตบชวาและมูลวัวเป็นวัสดุเหลือใช้ในพื้นที่ การนำวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาศึกษาเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าทรัพยากรชีวมวลและลดปัญหาการจัดการของเสียในชุมชน

การใช้ผักตบชวาเป็นวัตถุดิบสำหรับการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้รับการศึกษาในหลายรูปแบบ ทั้งการหมักเดี่ยว การปรับสภาพ และการย่อยร่วมกับวัสดุอินทรีย์อื่น โดยผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนวัตถุดิบ ชนิดหัวเชื้อ การปรับสภาพ อุณหภูมิ ระยะเวลาหมัก และรูปแบบถังหมัก ส่งผลต่อทั้งปริมาณและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ตัวอย่างเช่น Ali et al. [10] ศึกษาการย่อยร่วมผักตบชวากับมูลวัวและพบว่าอัตราส่วน 1:1 ให้สัดส่วนมีเทนรายวันสูงสุดประมาณ 67.11% ภายในการหมัก 60 วัน ขณะที่ Soeprijanto et al. [11] ใช้ถังหมักแบบ plug-flow ขนาด 125 ลิตร และรายงานสัดส่วนมีเทนประมาณ 70.57% ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบงานวิจัยจำเป็นต้องพิจารณาสภาวะการทดลองร่วมด้วย และไม่ควรใช้เฉพาะร้อยละมีเทนเป็นตัวแทนประสิทธิภาพการผลิตก๊าซทั้งหมด

สำหรับประเทศไทย มีการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาทั้งด้วยการปรับสภาพ และการย่อยร่วมกับวัสดุอินทรีย์ โดย Lerkmahalikhit and Sasananan [12] รายงานว่าการปรับสภาพและการย่อยร่วมกับเศษอาหารส่งผลต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ขณะที่ Kaewpuang et al. [13] ศึกษาการย่อยร่วมผักตบชวากับมูลวัวบนฐาน VS และพบว่าอัตราส่วน 50:50 ให้ผลผลิตมีเทน 304 ± 9 mL $\text{CH}_4/\text{g VS added}$ สูงกว่าการหมักผักตบชวาเดี่ยว ทั้งยังมีการทดสอบต่อในระบบ CSTR ขนาด 10 ลิตร ผลเหล่านี้สนับสนุนศักยภาพของการย่อยร่วม แต่ยังสะท้อนว่าผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนวัตถุดิบ รูปแบบถังหมัก และสภาวะการเดินระบบของแต่ละการศึกษา

แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นความเป็นไปได้ของการใช้ผักตบชวาผลิตก๊าซชีวภาพและประโยชน์ของการย่อยร่วม แต่ละงานมีความแตกต่างด้านวัตถุดิบร่วม วิธีเตรียมวัตถุดิบ อัตราส่วนผสม ขนาดถังหมัก และตัวแปรที่ใช้ประเมินผล ขณะที่ข้อมูลการเปรียบเทียบองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ได้แก่ CH_4 , CO_2 , O_2 และ H_2S รวมถึงค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรจากการย่อยร่วมผักตบชวากับมูลวัวในอัตราส่วนตามน้ำหนักแห่งหลายระดับภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกันยังมีรายงานจำกัด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของผักตบชวาและมูลวัว และเปรียบเทียบองค์ประกอบกับค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมในอัตราส่วน 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ตามน้ำหนักแห้ง ภายใต้การทดลองระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาแนวโน้มของสัดส่วนก๊าซมีเทนและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพในแต่ละอัตราส่วน นอกจากนี้ยังประเมินศักยภาพด้านพลังงานและเศรษฐศาสตร์ในรูปแบบการณีสัมมติ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบและทดสอบระบบระดับนำร่องในอนาคต

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของผักตบชวาและมูลวัวที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน

2.2 เพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมผักตบชวาและมูลวัวในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

2.3 เพื่อประเมินค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซชีวภาพจากสัดส่วนมีเทนที่ตรวจวัดได้

2.4 เพื่อประเมินศักยภาพการทดแทนพลังงานและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ภายใต้สถานการณ์สมมติ สำหรับใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาระบบระดับนำร่อง

3. ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มุ่งศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมของผักตบชวาและมูลวัว เพื่อศึกษาข้อมูลเบื้องต้นด้านองค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพสำหรับใช้ประกอบการพัฒนาและทดสอบระบบระดับนำร่องในอนาคต โดยกำหนดขอบเขตการวิจัยดังนี้

3.1 ขอบเขตด้านพื้นที่ศึกษา การวิจัยดำเนินการในพื้นที่อำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีลักษณะเศรษฐกิจพึ่งพาภาคการเกษตรเป็นหลัก มีแหล่งน้ำธรรมชาติ คลองชลประทาน และพื้นที่เกษตรกรรมกระจายอยู่ในชุมชน ส่งผลให้มีวัสดุชีวมวลและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดปี โดยเฉพาะผักตบชวาที่พบแพร่หลายในแหล่งน้ำ และมูลวัวที่เกิดจากการเลี้ยงโคในระดับครัวเรือนและฟาร์มขนาดเล็ก พื้นที่ดังกล่าวจึงมีความเหมาะสมต่อการศึกษาศักยภาพการนำวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงานทดแทนทั้งในระดับครัวเรือนและระดับชุมชน

3.2 ขอบเขตด้านวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย ผักตบชวาและมูลวัว โดยผักตบชวาเป็นพืชน้ำที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วพบได้ทั่วไปในแหล่งน้ำของชุมชน และมักก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันของทางน้ำ ส่วนมูลวัวเป็นของเสียจากการเลี้ยงสัตว์ที่พบได้ในพื้นที่เกษตรกรรม วัตถุดิบทั้งสองชนิดเป็นวัสดุอินทรีย์ที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ การวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการนำผักตบชวาและมูลวัวมาใช้ร่วมกันในกระบวนการย่อยร่วมเพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบและค่าความร้อนต่อหน่วย

ปริมาตรของก๊าซชีวภาพจากอัตราส่วนวัตถุดิบที่แตกต่างกัน ลดปัญหาการจัดการวัสดุเหลือใช้ และเพิ่มมูลค่าให้กับทรัพยากรชีวมวลในท้องถิ่น

3.3 ขอบเขตด้านตัวแปรที่ศึกษา การวิจัยนี้กำหนดตัวแปรต้น คือ อัตราส่วนผักตบชวาต่อมูลวัวที่ใช้ในการหมักตามน้ำหนักแห้ง จำนวน 5 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 เพื่อเปรียบเทียบผลของสัดส่วนวัตถุดิบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ตัวแปรตาม ได้แก่ องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วย CH_4 , CO_2 , O_2 และ H_2S รวมถึงค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่คำนวณจากสัดส่วนมีเทน สำหรับปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ตรวจวัดระหว่างการทดลอง ตัวแปรควบคุม ได้แก่ ขนาดถังหมัก ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ ลักษณะการเตรียมวัตถุดิบ และสภาวะการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองของแต่ละอัตราส่วนได้อย่างเหมาะสม

3.4 ขอบเขตด้านการทดลอง การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนขนาด 5 ลิตร ซึ่งเป็นระบบปิดสำหรับการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์และเก็บรวบรวมก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมัก วัตถุดิบผักตบชวาจะถูกเตรียมโดยการล้างทำความสะอาด ลดขนาด และปรับให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการย่อยสลาย ส่วนมูลวัวจะถูกเตรียมให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมสำหรับการหมัก จากนั้นนำวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาผสมตามอัตราส่วนที่กำหนดและบรรจุลงในถังหมัก เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนวัตถุดิบต่อ องค์ประกอบและค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซชีวภาพ โดยเปรียบเทียบสัดส่วน CH_4 , CO_2 , O_2 และ H_2S ของแต่ละอัตราส่วน เพื่อระบุอัตราส่วนที่ให้ สัดส่วนมีเทนและค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรสูงภายใต้สภาวะการทดลองนี้

3.5 ขอบเขตด้านการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ การวิจัยครอบคลุมการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาร่วมกับมูลวัว โดยพิจารณาศักยภาพในการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ทดแทนพลังงานเชิงพาณิชย์ในครัวเรือน โดยเฉพาะก๊าซ

หุงต้ม หรือก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) การวิเคราะห์ประกอบด้วยการประเมินมูลค่าการประหยัดต้นทุนพลังงาน ต้นทุนการลงทุนเบื้องต้น ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา ระยะเวลาคืนทุน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) ทั้งนี้ การประเมินด้านการทดแทนพลังงานและเศรษฐศาสตร์เป็นการวิเคราะห์ตามสถานการณ์สมมติ (scenario-based assessment) ผลการประเมินจึงใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับพิจารณาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และประกอบการออกแบบระบบระดับนำร่องในอนาคต ตลอดจนเป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจในการพัฒนาระบบพลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นต่อไป

4. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อเป็นพลังงานทดแทนสู่ชุมชน ดังนั้นการดำเนินงานวิจัยจึงแบ่งออกเป็นขั้นตอนสำคัญ ดังนี้

4.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนาม การเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนามดำเนินการในพื้นที่อำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยมีมุ่งเน้นการสำรวจข้อมูลจากเกษตรกรและประชาชนในชุมชนที่ประกอบอาชีพด้านการเกษตร การเก็บข้อมูลประกอบด้วยการสำรวจชนิดและปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เกิดขึ้นในแต่ละครัวเรือน เช่น วัสดุเหลือทิ้งจากปาล์มน้ำมัน ฟางข้าว เศษพืชผัก และมูลสัตว์ รวมถึงข้อมูลด้านการจัดการวัสดุเหลือใช้และการใช้พลังงานในครัวเรือนในปัจจุบัน การเก็บข้อมูลภาคสนามใช้วิธีการสำรวจเชิงพรรณนา (Descriptive survey) โดยอาศัยแบบสอบถามการสัมภาษณ์และการสังเกตการณ์ในพื้นที่เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนและสะท้อนสภาพความเป็นจริงของชุมชน ข้อมูลที่ได้จากการเก็บภาคสนามถูกนำมาจัดหมวดหมู่ วิเคราะห์ และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในขั้นตอนถัดไปของการวิจัย

4.2 การทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพ

4.2.1 การเตรียมตัวอย่างผักตบชวาสำหรับการปรับสภาพและการเตรียมมูลวัว การเตรียมวัตถุดิบผักตบชวาและมูลวัว ซึ่งเป็นสารตั้งต้นหลักในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานโดยเริ่มจากการเตรียมตัวอย่างผักตบชวา โดยทำการเก็บผักตบชวาที่ใช้ในการทดลองเก็บรวบรวมจากแหล่งน้ำในพื้นที่อำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยคัดเลือกต้นที่มีสภาพสมบูรณ์ ไม่มีการเน่าเสีย และปราศจากสิ่งปนเปื้อน จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดดิน ทราข และสิ่งแปลกปลอม แล้วปล่อยให้สะเด็ดน้ำก่อนสับให้มีขนาดประมาณ 1-3 เซนติเมตร เพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอของวัตถุดิบและพื้นที่ผิวสำหรับการย่อยสลายของจุลินทรีย์ หลังจากนั้นนำผักตบชวาไปผึ่งแดดประมาณ 6 ชั่วโมงเพื่อระบายน้ำส่วนเกินและช่วยให้สามารถควบคุมปริมาณวัตถุดิบบนฐานน้ำหนักแห้งได้สม่ำเสมอ โดยไม่ได้ทำให้วัตถุดิบแห้งสนิทและไม่ได้ใช้สารเคมีหรือสารละลายต่างในการปรับสภาพ ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงผลของการปรับสภาพทางเคมีที่อาจรบกวนการเปรียบเทียบผลจากอัตราส่วนผักตบชวาและมูลวัวที่แตกต่างกัน จากนั้นนำตัวอย่างไปตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids; TS) และของแข็งระเหยได้ (Volatile Solids; VS) ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

มูลวัวสดเก็บรวบรวมจากฟาร์มเลี้ยงโคในพื้นที่อำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยเลือกมูลวัวสดที่ไม่มีการปนเปื้อนของดินในปริมาณมาก และคัดแยกฟางกรวด รวมถึงสิ่งแปลกปลอมออกก่อนการเตรียมตัวอย่าง จากนั้นนำมูลวัวผสมกับน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก และคนให้เข้ากันจนได้สารละลายมูลวัว (slurry) ที่มีลักษณะสม่ำเสมอ เหมาะสมต่อการผสมกับผักตบชวาและการบรรจุลงในถังหมัก สารละลายมูลวัวถูกพักไว้ในภาชนะปิดเป็นเวลา 3 วัน ที่อุณหภูมิห้องก่อนนำไปใช้ เพื่อให้วัตถุดิบมีความสม่ำเสมอและลดผลของก๊าซที่อาจเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นจากสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย โดยไม่มีการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์เชิงพาณิชย์เพิ่มเติม เนื่องจากมูลวัวเป็น

แหล่งจุลินทรีย์ธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

การเตรียมผักตบชวาและมูลวัวตามขั้นตอนข้างต้น มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้วัตถุดิบมีความสม่ำเสมอและเหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน ในการทดลองนี้ไม่มีการเติมหัวเชื้อ (inoculum) แยกต่างหาก จึงไม่ได้กำหนดอัตราส่วนหัวเชื้อต่อสารตั้งต้น (inoculum-to-substrate ratio; ISR) โดยมูลวัวทำหน้าที่เป็นทั้งสารตั้งต้นร่วมและแหล่งจุลินทรีย์ธรรมชาติสำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

4.2.2 การเตรียมถังหมักและสภาวะการทดลอง การทดลองใช้ถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนขนาดรวม 5 ลิตร และดำเนินการแบบกะ (batch operation) โดยบรรจุวัตถุดิบเพียงครั้งเดียวในช่วงเริ่มต้นและไม่มีการเติมหรือถอนสารตั้งต้นระหว่างการหมัก กำหนดปริมาตรใช้งานจริง (working volume) เท่ากับ 4.0 ลิตรต่อถัง และเหลือปริมาตรช่องว่างเหนือของเหลว (headspace) ประมาณ 1.0 ลิตร สำหรับรองรับก๊าซที่เกิดขึ้น แต่ละถังใช้ของแข็งจากผักตบชวาและมูลวัวรวม 120 กรัม และเติมน้ำสะอาดประมาณ 3.0–3.3 ลิตร หรือจนได้ปริมาตรใช้งานรวม 4.0 ลิตร ส่งผลให้ความเข้มข้น TS เริ่มต้นของส่วนผสมอยู่ที่ประมาณ 3.0% (w/v) ส่วน VS เริ่มต้นอยู่ในช่วงประมาณ 2.34–2.46% (w/v) หรือคิดเป็น 78–82% ของ TS ตามสัดส่วนของวัตถุดิบ

ตารางที่ 1 อัตราส่วนหมักจากผักตบชวาร่วมกับมูลวัว

อัตราส่วนหมัก ผักตบชวา : มูลวัว (% โดยน้ำหนักแห้ง)	น้ำหนักวัตถุดิบ ผักตบชวา : มูลวัว (กรัม)
100 : 0	120 : 0
75 : 25	90 : 30
50 : 50	60 : 60
25 : 75	30 : 90
0 : 100	0 : 120

ก่อนเริ่มการหมัก ปิดฝาถังและตรวจสอบการรั่วซึมของข้อต่อและท่อส่งก๊าซ จากนั้นไล่อากาศบริเวณ headspace ด้วย N_2 ประมาณ 3 นาที ก่อนปิดวาล์ว เพื่อสร้างสภาวะเริ่มต้นแบบไม่ใช้ออกซิเจน ถังหมักทั้งหมดตั้งไว้ภายในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิประมาณ $30 \pm 2^\circ C$ และหมักเป็นระยะเวลา 30 วัน

ค่า pH ของส่วนผสมเริ่มต้นอยู่ในช่วงประมาณ 6.6–7.2 และตรวจวัดในวันที่ 0, 10, 20 และ 30 ของการหมัก โดยไม่มีการใช้ระบบควบคุม pH อัตโนมัติและไม่มีการเติมกรดหรือด่างเพื่อปรับค่า pH ระหว่างการทดลอง เพื่อหลีกเลี่ยงปัจจัยรบกวนจากสารเคมีเพิ่มเติม เพื่อให้สารตั้งต้นกระจายตัวและลดการตกตะกอน ถังหมักแต่ละถังถูกเขย่าด้วยมืออย่างเบา ๆ เป็นเวลาประมาณ 1 นาที วันละ 1 ครั้ง ในช่วงเวลาใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง

4.2.3 การวัดปริมาตรและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นถูกส่งผ่านท่อก๊าซจากด้านบนของถังไปยังชุดเก็บก๊าซ ปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นติดตามโดยวิธี แทนที่น้ำ (water displacement method) โดยใช้ภาชนะตวงที่มีสเกล และบันทึกปริมาตรทุก 24 ชั่วโมง ในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน ข้อมูลปริมาตรก๊าซใช้สำหรับติดตามการทำงานและยืนยันการเกิดก๊าซของระบบ อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้เน้นการเปรียบเทียบ องค์ประกอบของก๊าซและค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตร และไม่ได้ใช้ข้อมูลดังกล่าวคำนวณผลผลิตก๊าซจำเพาะต่อหน่วย VS เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาหมักวันที่ 30 เก็บตัวอย่างก๊าซจากแต่ละถังลงในถุงเก็บตัวอย่างก๊าซและวิเคราะห์องค์ประกอบ ได้แก่ CH_4 , CO_2 , O_2 และ H_2S ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพแบบพกพา BIOGAS 5000 (Geotech, United Kingdom) โดยรายงาน CH_4 , CO_2 และ O_2 เป็นร้อยละโดยปริมาตร และรายงาน H_2S เป็น ppm

ก่อนการวิเคราะห์ในแต่ละวัน เครื่องมือถูกตรวจสอบและสอบเทียบตามขั้นตอนของผู้ผลิต โดยทำการตรวจสอบจุดศูนย์ (zero check) ด้วยก๊าซไนโตรเจน สำหรับเซนเซอร์ CH_4 และ CO_2 ตรวจสอบด้วยก๊าซมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น ส่วนเซนเซอร์ O_2 ตรวจสอบกับอากาศบรรยากาศที่มีออกซิเจนประมาณ 20.9% และเซนเซอร์ H_2S

ตรวจสอบด้วยก๊าซมาตรฐาน H_2S ความเข้มข้นประมาณ 200 ppm ก่อนเริ่มวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อควบคุมความถูกต้องและความสม่ำเสมอของการวัด

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ การทดลองใช้อัตราส่วนผักตบชวาต่อมูลวัวจำนวน 5 อัตราส่วน โดยแต่ละอัตราส่วนใช้ถังหมัก 1 ถังเป็นหน่วยทดลอง ข้อมูลองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ได้แก่ CH_4 , CO_2 , O_2 และ H_2S วิเคราะห์ซ้ำจำนวน 3 ครั้งจากตัวอย่างก๊าซของถังหมักเดียวกัน และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD) เพื่อแสดงค่ากลางและความแปรปรวนของการวัดซ้ำ เนื่องจากการวัดทั้ง 3 ครั้งเป็นการวัดซ้ำเชิงวิเคราะห์จากหน่วยทดลองเดียวกัน มิใช่หน่วยทดลองอิสระ จึงไม่นำข้อมูลมาทดสอบความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนด้วยสถิติเชิงอนุมาน ผลการศึกษาจึงนำเสนอในเชิงพรรณนา โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพและค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของแต่ละอัตราส่วนภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้

4.4 การประเมินค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซชีวภาพ (Volumetric Heating Value Assessment) ค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซชีวภาพประเมินจากสัดส่วน CH_4 ที่ตรวจวัดได้ เนื่องจากก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักที่ให้พลังงานในก๊าซชีวภาพ โดยใช้ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value; HHV) ของก๊าซมีเทนเท่ากับ 35.8 MJ/m^3 ค่าที่คำนวณได้มีหน่วยเป็น MJ/m^3 biogas และแสดงถึงค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร มีใช้พลังงานรวมที่ถังหมักผลิตได้ ทั้งนี้การคำนวณพลังงานรวมจำเป็นต้องใช้ข้อมูลปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ร่วมกับค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตร ดังสมการที่ 1

$$Energy = V_{biogas} \times CH_4 \times HHV \dots\dots\dots(1)$$

โดยที่

$Energy$ แทน ปริมาณพลังงานที่ได้จากก๊าซชีวภาพ (MJ)

V_{biogas} แทน ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ (m^3)

CH_4 แทน สัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ (%)

HHV แทน ค่าความร้อนของก๊าซมีเทน (35.8 MJ/m^3)
ค่าพลังงานที่คำนวณได้สามารถสะท้อนถึงศักยภาพของวัตถุดิบชีวมวลในการผลิตพลังงานทดแทน

ในการศึกษานี้ใช้ค่าการเทียบเท่าพลังงานโดยประมาณว่า ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตรสามารถทดแทนก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ได้ประมาณ 0.46 กิโลกรัม ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการประเมินศักยภาพการทดแทนเชื้อเพลิงของระบบก๊าซชีวภาพ [18] ดังนั้น จึงนำปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มาแปลงเป็นปริมาณ LPG เทียบเท่า เพื่อประเมินศักยภาพในการทดแทนพลังงานในระดับครัวเรือน โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$LPG \text{ equivalent} = V_{biogas} \times 0.46 \dots\dots\dots(2)$$

โดยที่

$LPG \text{ equivalent}$ แทน ปริมาณก๊าซ LPG ที่สามารถทดแทนได้ (Kg)

4.5 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis) การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาร่วมกับมูลวัวดำเนินการเพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนในระดับครัวเรือน โดยการเปรียบเทียบต้นทุนพลังงานจากก๊าซชีวภาพกับต้นทุนพลังงานจากก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas; LPG) ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในครัวเรือนสำหรับการหุงต้มและการประกอบอาหาร การวิเคราะห์ดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของครัวเรือน รวมทั้งเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำระบบผลิตก๊าซชีวภาพไปใช้ในระดับชุมชนและการประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ ในการศึกษาการประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์พิจารณาตัวแปรสำคัญ ได้แก่

4.5.1 มูลค่าการประหยัดต้นทุนพลังงาน จากการใช้ก๊าซชีวภาพสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$Cost \text{ saving} = LPG_{equivalent} \times P_{LPG} \dots\dots\dots(3)$$

โดยที่

Cost saving แทน มูลค่าการประหยัดต้นทุนพลังงาน
(฿)

LPG_{equivalent} แทน ปริมาณก๊าซ LPG ที่สามารถทดแทนได้ (Kg)

P_{LPG} แทน ราคาก๊าซ LPG (฿/Kg)

4.5.2 อัตราการทดแทนพลังงาน เพื่อประเมินศักยภาพการทดแทนพลังงานของก๊าซชีวภาพในระบบพลังงานครัวเรือน สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองการทดแทนพลังงาน (Energy substitution model) ดังสมการที่ 4

$$Energy\ substitution = E_{biogas} \times E_{household} \dots\dots(4)$$

โดยที่

Energy substitution แทน อัตราการทดแทนพลังงาน (%)

E_{biogas} แทน พลังงานที่ผลิตได้จากก๊าซชีวภาพ (MJ)

E_{household} แทน ความต้องการพลังงานของครัวเรือน (MJ)

สมการดังกล่าวใช้ในการประเมินว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพสามารถรองรับความต้องการพลังงานของครัวเรือนได้ในสัดส่วนเท่าใด ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญในการประเมินศักยภาพของระบบพลังงานชีวภาพในระดับครัวเรือนและชุมชน [19]

4.5.3 ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) เพื่อประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จึงมีการคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Payback period) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 5

$$Payback\ Period = \frac{C_{install}}{S_{annual}} \dots\dots\dots(5)$$

โดยที่

Payback Period แทน ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ (ปี)

C_{install} แทน ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (บาท)

S_{annual} แทน กระแสเงินสดสุทธิต่อปี (บาท/ปี)
(บาทต่อปี)

4.5.4 การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวา ร่วมกับมูลวัวในระยะยาว ได้มีการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ที่ใช้ประเมินความคุ้มค่าของโครงการลงทุน โดยพิจารณามูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับและกระแสเงินสดจ่ายตลอดอายุโครงการ หากค่า NPV มีค่ามากกว่าศูนย์ แสดงว่าโครงการมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และสามารถสร้างผลตอบแทนที่เหมาะสมจากการลงทุน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 6

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \dots\dots\dots(6)$$

โดยที่

NPV แทน มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ (บาท)

B_t แทน ผลประโยชน์หรือรายรับในปีที่ *t* (บาท)

C_t แทน ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในปีที่ *t* (บาท)

r แทน อัตราคิดลด (Discount rate)

t แทน ปีที่ดำเนินโครงการ

n แทน อายุโครงการ (ปี)

4.5.5 การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return; IRR) นอกจากการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิแล้ว การศึกษานี้ยังได้ประเมินอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ที่ใช้ในการประเมินอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน โดย IRR คืออัตราคิดลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์ หากค่า IRR สูงกว่าอัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดที่กำหนดจะถือว่าโครงการมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 7

$$\sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+IRR)^t} \dots\dots\dots(7)$$

โดยที่

IRR แทน อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (%)

B_t แทน ผลประโยชน์หรือรายรับในปีที่ t (บาท)

C_t แทน ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในปีที่ t (บาท)

t แทน ปีที่ดำเนินโครงการ

n แทน อายุโครงการ (ปี)

การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ดังกล่าวส่งผลให้สามารถประเมินความเหมาะสมของการลงทุนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาร่วมกับมูลวัวในระดับครัวเรือนได้อย่างเป็นระบบ โดยผลการวิเคราะห์จะสะท้อนถึงศักยภาพในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของครัวเรือน รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพไปประยุกต์ใช้ในระดับชุมชน ตลอดจนการขยายผลไปสู่การใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมครัวเรือนในอนาคต

5. ผลการวิจัย

5.1 ผลการสำรวจวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในชุมชน

ผลการสำรวจวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในพื้นที่อำเภอเขียงใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่าชุมชนมีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและชีวมวลเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งปี จากกิจกรรมการเกษตรและการเลี้ยงสัตว์ในระดับครัวเรือน และเชิงพาณิชย์ พื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นที่ราบลุ่ม มีแหล่งน้ำธรรมชาติและคลองชลประทาน ส่งผลให้เกิดวัสดุเหลือใช้ทั้งจากพืชและสัตว์ในปริมาณสูง

วัสดุเหลือใช้ที่สำรวจพบประกอบด้วย ผักตบชวามูลวัว ฟางข้าว เศษพืชผัก และวัสดุเหลือทิ้งจากปาล์มน้ำมัน โดยผักตบชวาและมูลวัวเป็นวัสดุที่พบมากที่สุดและมีการเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ผักตบชวาพบกระจายอยู่ในคลองและแหล่งน้ำสาธารณะของชุมชน โดยมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นในช่วงฤดูฝน ขณะที่มูลวัวเกิดจากการเลี้ยงโคในระดับครัวเรือนและฟาร์มขนาดเล็ก

ข้อมูลจากการสำรวจด้านการจัดการวัสดุเหลือใช้พบว่า ผักตบชวาส่วนใหญ่ถูกกำจัดโดยการเก็บขึ้นจากแหล่งน้ำและกองทิ้งไว้ในพื้นที่ใกล้เคียง ส่วนมูลวัวถูกนำไปใช้เป็นปุ๋ยคอกเพียงบางส่วน ที่เหลือยังไม่มีจัดการอย่างเป็นระบบ เมื่อพิจารณาคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุเหลือใช้พบว่าวัสดุทั้งสองชนิดเป็นวัสดุอินทรีย์ที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพ จึงถูกคัดเลือกเป็นวัตถุดิบหลักสำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

5.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของผักตบชวาและมูลวัว

ผลการเตรียมตัวอย่างผักตบชวาพบว่า หลังการล้างทำความสะอาดและลดขนาดให้มีความยาวประมาณ 1-3 เซนติเมตร ผักตบชวามีลักษณะสม่ำเสมอและเหมาะสมต่อการนำไปปรับสภาพ การลดความชื้นโดยการผึ่งแดดประมาณ 6 ชั่วโมง ช่วยลดปริมาณน้ำส่วนเกิน ทำให้สามารถควบคุมปริมาณสารตั้งต้นตามน้ำหนักแห้งได้อย่างแม่นยำ หลังการปรับสภาพ ผักตบชวามีโครงสร้างเส้นใยที่อ่อนตัวลง ส่งผลให้มีแนวโน้มเอื้อต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ในส่วนของการเตรียมมูลวัว พบว่ามูลวัวสดที่ผ่านการคัดแยกสิ่งแปลกปลอมและผสมกับน้ำสะอาดในอัตราส่วนที่กำหนดสามารถเตรียมเป็นสารละลายมูลวัว (slurry) ที่มี

ลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ค่า pH อยู่ในช่วงใกล้เคียงเป็นกลางซึ่งเหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ การพักสารละลายมูลวัวก่อนใช้งานช่วยกระตุ้นกิจกรรมของจุลินทรีย์ ทำให้มูลวัวมีความพร้อมในการทำหน้าที่เป็นทั้งสารตั้งต้นร่วมและแหล่งจุลินทรีย์เริ่มต้นสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของผักตบชวาและมูลวัวหลังการเตรียมตัวอย่าง

วัตถุดิบ	ลักษณะทางกายภาพหลังเตรียม	Total Solids (TS, %)	Volatile Solids (VS, %TS)	pH
ผักตบชวา	สับละเอียด ขนาด 1-3 ซม.	12.5	82.0	6.5
	ผ่านการลดความชื้น			

วัตถุดิบ	ลักษณะทางกายภาพหลังเตรียม	Total Solids (TS, %)	Volatile Solids (VS, %TS)	pH
มูลวัว	สารถละลายเนื้อเดียว (slurry)	16.0	78.0	7.2

จากตารางที่ 2 พบว่า ผักตบชวาและมูลวัวที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างมีค่า TS, VS และ pH อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน แสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบทั้งสองชนิดมีความพร้อมสำหรับการนำไปใช้ในการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบก๊าซชีวภาพจากการหมักผักตบชวาร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วนผักตบชวา : มูลวัว	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)
100:0	48.47 ± 0.51	46.03 ± 0.51	3.53 ± 0.15	180.00 ± 4.58
75:25	54.20 ± 0.66	41.53 ± 0.50	2.77 ± 0.15	161.00 ± 3.61
50:50	60.80 ± 0.66	36.50 ± 0.46	1.90 ± 0.10	141.00 ± 3.61
25:75	58.60 ± 0.56	38.17 ± 0.38	2.10 ± 0.10	149.67 ± 2.52
0:100	55.07 ± 0.61	40.03 ± 0.51	2.50 ± 0.10	171.00 ± 3.61

หมายเหตุ: ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดซ้ำเชิงวิเคราะห์จำนวน 3 ครั้งจากถังหมักเดียวกันของแต่ละอัตราส่วน

จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพจากแต่ละอัตราส่วน ซึ่งวิเคราะห์ซ้ำจำนวน 3 ครั้ง จากตัวอย่างก๊าซของถังหมักเดียวกัน พบว่าอัตราส่วน ผักตบชวาต่อมูลวัว 50:50 ให้ค่าเฉลี่ยสัดส่วน CH₄ สูงที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ เท่ากับ 60.80 ± 0.66% ขณะที่ค่าเฉลี่ย CO₂, O₂ และ H₂S เท่ากับ 36.50 ± 0.46%, 1.90 ± 0.10% และ 141.00 ± 3.61 ppm ตามลำดับ ทั้งนี้ ผลดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบเชิงพรรณนาและไม่ได้แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างอัตราส่วน

เมื่อพิจารณาผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง พบว่าอัตราส่วนผักตบชวา : มูลวัว เท่ากับ 50 : 50 (%) โดยน้ำหนักแห้ง) ให้สัดส่วนก๊าซมีเทนสูงที่สุดในกลุ่มอัตราส่วนที่ศึกษา โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 60.80% เนื่องจากมูลวัวทำหน้าที่เป็นแหล่งจุลินทรีย์และไนโตรเจน ขณะที่ผักตบชวาเป็นแหล่ง

5.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

การวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินคุณภาพก๊าซและศักยภาพการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน เนื่องจากสัดส่วนของ CH₄ เป็นตัวชี้วัดหลักของค่าพลังงาน ขณะที่ CO₂, O₂ และ H₂S มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานและการปรับปรุงคุณภาพก๊าซ ดังนั้น การศึกษานี้จึงทำการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักผักตบชวาร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบผลของสัดส่วนวัตถุดิบต่อคุณภาพก๊าซชีวภาพ และเพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มองค์ประกอบและคุณภาพก๊าซชีวภาพของแต่ละอัตราส่วนภายใต้สภาวะการทดลองนี้

คาร์บอน แนวน้ำมันดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับการผสม ผักตบชวาและมูลวัวที่ช่วยเสริมองค์ประกอบของสารอินทรีย์ สารอาหาร และจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมทาโนเจเนซิส ในส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วน 50 : 50 มีสัดส่วน CO₂ ต่ำที่สุดร่วมกับสัดส่วน CH₄ ที่สูงที่สุด แสดงถึงความแตกต่างขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพระหว่างอัตราส่วนวัตถุดิบภายใต้สภาวะการทดลองนี้ ขณะที่ก๊าซออกซิเจนพบในปริมาณต่ำกว่า 4% ในทุกชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าระบบหมักมีสภาวะใกล้เคียงแบบไม่ใช้ออกซิเจนอย่างเหมาะสม สำหรับ H₂S พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 138–185 ppm โดยอัตราส่วนที่มีมูลวัวสูงมีแนวโน้มให้ค่า H₂S สูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการสลายตัวของสารประกอบกำมะถันในมูลวัว อย่างไรก็ตามค่าที่พบ

ยังอยู่ในช่วงที่สามารถจัดการได้ด้วยกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซก่อนการนำไปใช้งานจริง

โดยสรุป ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพแสดงให้เห็นว่าการหมักผักตบชวาร่วมกับมูลวัวสามารถผลิตก๊าซชีวภาพที่มีคุณภาพเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน โดยเฉพาะอัตราส่วนผักตบชวา : มูลวัว เท่ากับ 50 : 50 (%) โดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนมีเทนสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้

5.4 ผลการประเมินศักยภาพพลังงาน (Energy Potential Analysis) จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ พบว่าจากค่าเฉลี่ยองค์ประกอบก๊าซชีวภาพพบว่าอัตราส่วนผักตบชวาต่อมูลวัว 50:50 ให้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนก๊าซมีเทนสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ เท่ากับ 60.80% รองลงมาคืออัตราส่วน 25:75, 0:100, 75:25 และ 100:0 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับความแตกต่างขององค์ประกอบสารอินทรีย์สารอาหาร และจุลินทรีย์ระหว่างอัตราส่วนมากกว่าการใช้วัตถุดิบเดียว ในการประเมินศักยภาพพลังงาน โดยกำหนดค่า HHV ของมีเทนเท่ากับ 35.8 MJ/m³ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซชีวภาพจากอัตราส่วนวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

อัตราส่วน ผักตบชวา : มูลวัว (%) น.น.แห้ง)	CH ₄ เฉลี่ย (%)	CO ₂ เฉลี่ย (%)	O ₂ เฉลี่ย (%)	H ₂ เฉลี่ย (ppm)	ค่าความ ร้อนต่อ หน่วย ปริมาตร (MJ/m ³ biogas)
100 : 0	48.47	46.03	3.53	180.00	17.35
75 : 25	54.20	41.53	2.77	161.00	19.40
50 : 50	60.80	36.50	1.90	141.00	21.77
25 : 75	58.60	38.17	2.10	149.67	20.98
0 : 100	55.07	40.03	2.50	171.00	19.72

จากตารางที่ 4 พบว่า อัตราส่วนผักตบชวาต่อมูลวัว 50:50 ให้สัดส่วนมีเทนเฉลี่ยและค่าความร้อนต่อหน่วย

ปริมาตรก๊าซชีวภาพสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ โดยมีสัดส่วนมีเทนเฉลี่ยเท่ากับ 60.80% และค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรเท่ากับ 21.77 MJ/m³ biogas ขณะที่อัตราส่วน 100:0 ให้ค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรเท่ากับ 17.35 MJ/m³ biogas ทั้งนี้ ค่าดังกล่าวเป็นค่าความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรก๊าซชีวภาพ และไม่สามารถใช้สรุปว่าอัตราส่วน 50:50 ให้พลังงานรวมสูงที่สุดได้ เนื่องจากการประเมินพลังงานรวมจำเป็นต้องพิจารณาปริมาณก๊าซชีวภาพรวมที่ผลิตได้ของแต่ละอัตราส่วนร่วมด้วย

5.5 การประเมินการทดแทนพลังงานตามสถานการณ์สมมติ (Scenario-Based Energy Substitution Assessment) การประเมินการทดแทนพลังงานในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ภายใต้สถานการณ์สมมติ โดยกำหนดให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับประยุกต์สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1.00 m³/day สำหรับทุกอัตราส่วนวัตถุดิบ เพื่อใช้เป็นฐานเดียวกันในการเปรียบเทียบศักยภาพด้านพลังงาน

ตารางที่ 5 การประเมินการทดแทนพลังงานภายใต้สถานการณ์สมมติที่กำหนดปริมาณก๊าซชีวภาพ 1.00 m³/day

อัตราส่วน ผักตบชวา : มูลวัว	พลังงานตาม สถานการณ์สมมติ (MJ/day)	อัตราการทดแทน พลังงาน (%)
100 : 0	17.35	57.83
75 : 25	19.40	64.67
50 : 50	21.77	72.57
25 : 75	20.98	69.93
0 : 100	19.72	65.73

จากตารางที่ 5 พบว่าภายใต้สถานการณ์สมมติที่กำหนดปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1.00 m³/day สำหรับทุกอัตราส่วน อัตราส่วน 50:50 มีค่าพลังงานที่คำนวณได้เท่ากับ 21.77 MJ/day และมีอัตราการทดแทนความต้องการพลังงานของครัวเรือนที่คำนวณได้เท่ากับ 72.57% รองลงมาคืออัตราส่วน 25:75 และ 0:100 เท่ากับ 69.93% และ 65.73% ตามลำดับ

5.6 การประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์ตามสถานการณ์สมมติ (Scenario-Based Economic Assessment)

การประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์ในส่วนนี้ดำเนินการภายใต้สถานการณ์สมมติ โดยกำหนดให้ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1.00 m³/day ค่าดังกล่าวเป็นสมมติฐานที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณการทดแทน LPG มูลค่าการประหยัดพลังงาน และตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ทั้งหมดในหัวข้อนี้เป็นผลตามสถานการณ์สมมติและควรใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบและทดสอบระบบระดับนำร่องในอนาคต

5.6.1 มูลค่าการประหยัดต้นทุนพลังงาน จากความสัมพันธ์ของการทดแทนพลังงาน พบว่า ก๊าซชีวภาพ 1.00 m³/day สามารถทดแทนก๊าซ LPG ได้ประมาณ 0.46 kg/day เมื่อกำหนดราคาก๊าซ LPG เท่ากับ 28 บาทต่อกิโลกรัม ส่งผลให้เกิดการประหยัดต้นทุนพลังงาน แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การประเมินมูลค่าการประหยัดพลังงานภายใต้สถานการณ์สมมติ

รายการ	มูลค่า
ปริมาณก๊าซชีวภาพที่กำหนดในสถานการณ์สมมติ	1.00 m ³ /day
LPG เทียบเท่า	0.46 kg/day
ราคาก๊าซ LPG สมมติ	28.00 บาท/kg
มูลค่าการประหยัดต่อวัน	12.88 บาท/day
มูลค่าการประหยัดต่อเดือน	386.40 บาท/month
มูลค่าการประหยัดต่อปี	4,701.20 บาท/year

ผลการวิเคราะห์สะท้อนให้เห็นว่า ระบบก๊าซชีวภาพสามารถลดภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในครัวเรือนได้ โดยเฉพาะในพื้นที่ชนบทที่มีวัตถุดิบชีวมวลเหลือใช้ เช่น ผักตบชวาและมูลวัว

5.6.2 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) เมื่อพิจารณาต้นทุนการลงทุนเริ่มต้นของระบบสามารถคำนวณระยะเวลาคืนทุนได้ แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของระบบก๊าซชีวภาพ

รายการ	มูลค่า
เงินลงทุนเริ่มต้น	18,000 บาท
กระแสเงินสดสุทธิต่อปี	3,701.20 บาท/ปี
ระยะเวลาคืนทุน	4.86 ปี

ภายใต้สถานการณ์สมมติ เงินลงทุนเริ่มต้นของระบบเท่ากับ 18,000 บาท มูลค่าการประหยัดพลังงานขั้นต้นเท่ากับ 4,701.20 บาท/ปี และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาเท่ากับ 1,000 บาท/ปี ส่งผลให้มีกระแสเงินสดสุทธิเท่ากับ 3,701.20 บาท/ปี ดังนั้นระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายของระบบเท่ากับประมาณ 4.86 ปี

5.6.3 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และ IRR การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ใช้กระแสเงินสดสุทธิจากการประหยัดพลังงานต่อปีหักด้วยค่าใช้จ่ายดำเนินงานและบำรุงรักษา แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

รายการ	มูลค่า
เงินลงทุนเริ่มต้น	18,000 บาท
กระแสเงินสดสุทธิต่อปี	3,701.20 บาท/ปี
อายุโครงการ	10 ปี
อัตราคิดลด	8%
NPV	ประมาณ 6,840 บาท
IRR	ประมาณ 15.8%

จากตารางที่ 8 ภายใต้สถานการณ์และสมมติฐานที่กำหนด ผลการวิเคราะห์พบว่า NPV มีค่ามากกว่าศูนย์ และ IRR สูงกว่าอัตราคิดลด จึงสะท้อนว่าโครงการมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในกรณีศึกษาี้ กล่าวคือการลงทุนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาร่วมกับมูลวัว

มีแนวโน้มให้ผลตอบแทนที่เหมาะสมในระยะยาว และแสดงแนวโน้มความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

6. สรุปผลและอภิปรายผล

6.1 สรุปผลการวิจัย การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมของผักตบชวาและมูลวัวเพื่อเป็นพลังงานทดแทนระดับชุมชน สามารถสรุปผลให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การวิจัยได้ดังนี้

6.1.1 ผลการสำรวจและศึกษาศักยภาพของ ผักตบชวาและมูลวัวสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่า พื้นที่อำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช มีผักตบชวาและมูลวัวเป็นวัสดุเหลือใช้ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในชุมชน โดยผักตบชวาพบแพร่กระจายในแหล่งน้ำธรรมชาติ และคลองชลประทาน ส่วนมูลวัวเกิดจากการเลี้ยงโคในระดับครัวเรือนและฟาร์มขนาดเล็ก วัตถุดิบทั้งสองชนิดยังไม่ได้มีการจัดการหรือใช้ประโยชน์อย่างเต็มประสิทธิภาพ เมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นพบว่า ผักตบชวามีค่า TS เท่ากับ 12.5% ค่า VS เท่ากับ 82.0%TS และค่า pH เท่ากับ 6.5 ขณะที่มูลวัวมีค่า TS เท่ากับ 16.0% ค่า VS เท่ากับ 78.0%TS และค่า pH เท่ากับ 7.2 แสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

6.1.2 การศึกษาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจาก การย่อยร่วมผักตบชวาและมูลวัวในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน พบว่า อัตราส่วน 50:50 ให้สัดส่วน CH_4 เฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 60.80% ขณะที่ CO_2 , O_2 และ H_2S เฉลี่ยเท่ากับ 36.50%, 1.90% และ 141 ppm ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงว่า ภายใต้สภาวะการทดลองนี้ อัตราส่วน 50:50 ให้ก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนมีเทนสูงที่สุดในกลุ่มอัตราส่วนที่ศึกษา ทั้งนี้ ผลการศึกษาดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบองค์ประกอบก๊าซ ไม่สามารถใช้สรุปว่าอัตราส่วนดังกล่าวให้ปริมาณหรือผลผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนสูงที่สุดได้

6.1.3 การประเมินค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตร พบว่า อัตราส่วนผักตบชวาต่อมูลวัว 50:50 ให้ค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ เท่ากับ

21.77 MJ/m³ biogas ซึ่งสัมพันธ์กับสัดส่วนมีเทนเฉลี่ยที่สูงที่สุดเท่ากับ 60.80% ทั้งนี้ ค่าดังกล่าวเป็นค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตร มิใช่พลังงานรวมที่ถึงหมักผลิตได้ ส่วนการประเมินการทดแทนพลังงานเป็นการวิเคราะห์ตามสถานการณ์สมมติที่กำหนดปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1.00 m³/day

6.1.4 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับครัวเรือนและชุมชน ภายใต้สถานการณ์สมมติที่ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1.00 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่า สามารถทดแทนก๊าซ LPG ได้ประมาณ 0.46 กิโลกรัมต่อวัน โดยมูลค่าการประหยัดพลังงานขั้นต้นเท่ากับ 4,701.20 บาท/ปี และเมื่อหักค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา 1,000 บาท/ปี จะมีกระแสเงินสดสุทธิเท่ากับ 3,701.20 บาท/ปี ส่งผลให้มีระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายประมาณ 4.86 ปี หรือประมาณ 4 ปี 10 เดือน มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวกประมาณ 6,840 บาท และมีอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ 15.8% ซึ่งสูงกว่าอัตราคิดลดที่กำหนดไว้ 8% แสดงให้เห็นว่าระบบมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และมีแนวโน้มให้ผลตอบแทนที่เหมาะสมในระยะยาว

6.2 อภิปรายผลการวิจัย ผลการวิจัยสามารถอภิปรายให้เชื่อมโยงกับวัตถุประสงค์การวิจัยแต่ละข้อได้ดังนี้

6.2.1 ด้านศักยภาพของผักตบชวาและมูลวัวสำหรับ ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการสำรวจแสดงให้เห็นว่า พื้นที่อำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช มีความพร้อมด้านทรัพยากรชีวมวลสำหรับการพัฒนาพลังงานชีวภาพ เนื่องจากมีผักตบชวาและมูลวัวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากสภาพพื้นที่และกิจกรรมทางการเกษตรของชุมชน ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ระบุว่าฟิชีน้ำและของเสียจากการเลี้ยงสัตว์สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ และการนำวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาใช้ร่วมกันสามารถเพิ่มความเหมาะสมต่อกระบวนการหมัก [7], [17] การนำผักตบชวาและมูลวัวมาใช้ผลิตพลังงานจึงเป็นแนวทางที่ช่วยแก้ไขปัญหาการอุดตันของแหล่งน้ำ ลดการสะสมของของเสียจากการเลี้ยงสัตว์ และเพิ่มมูลค่าให้แก่วัตถุ

เหลือใช้ตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นยังพบว่า ค่า pH ปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งระเหยได้ของวัตถุดิบอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน การลดขนาดและความชื้นของผักตบชวาช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุดิบกับจุลินทรีย์ ขณะที่การเตรียมมูลวัวในรูปสารละลายและการพักก่อนใช้งานช่วยให้มูลวัวมีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีจุลินทรีย์ที่พร้อมต่อการกระบวนการหมัก ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Weiland [18] และ Priya et al. [5] ซึ่งระบุว่าคุณสมบัติและการเตรียมวัตถุดิบเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ

6.2.2 ด้านองค์ประกอบและคุณภาพของก๊าซชีวภาพ จากอัตราส่วนวัตถุดิบที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าการย่อยร่วมระหว่างผักตบชวาและมูลวัวให้สัดส่วนก๊าซมีเทนสูงกว่าการใช้ผักตบชวาเพียงอย่างเดียว โดยอัตราส่วน 50:50 ให้สัดส่วนก๊าซมีเทนเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 60.8% ผลดังกล่าวอาจอธิบายได้จากการที่ผักตบชวาทำหน้าที่เป็นแหล่งคาร์บอน ขณะที่มูลวัวเป็นแหล่งไนโตรเจน สารอาหาร และจุลินทรีย์เริ่มต้น เมื่อผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมซึ่งแนวโน้มดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของสารอาหารและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ข้อค้นพบดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Mata-Alvarez et al. [17] และ Tufaner และ Avşar [20] ซึ่งระบุว่า การย่อยร่วมสามารถลดข้อจำกัดของการใช้วัตถุดิบชนิดเดียว ปรับสมดุลธาตุอาหาร เพิ่มความสามารถในการย่อยสลาย และส่งเสริมเสถียรภาพของกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน นอกจากนี้ อัตราส่วน 50:50 ยังให้สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนต่ำกว่าอัตราส่วนอื่น สำหรับองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ พบว่ามีสัดส่วนก๊าซมีเทนอยู่ในช่วงประมาณ 48–61% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน และสอดคล้องกับข้อมูลด้านคุณภาพและการใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพ [19] ส่วนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์พบในช่วง

138–185 ppm แม้ว่าจะอยู่ในระดับที่สามารถจัดการได้ แต่ควรมีระบบลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือระบบปรับปรุงคุณภาพก๊าซก่อนนำไปใช้งานจริง เพื่อช่วยลดกลิ่น ลดการกัดกร่อนของอุปกรณ์ และเพิ่มความปลอดภัยของระบบ

6.2.3 ด้านศักยภาพพลังงานและการทดแทนพลังงาน ในระดับครัวเรือน ผลการประเมินพบว่าอัตราส่วน 50:50 ให้ค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรก๊าซชีวภาพสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ เท่ากับ 21.77 MJ/m³ biogas ซึ่งสัมพันธ์กับสัดส่วนมีเทนเฉลี่ยที่สูงที่สุด เนื่องจากค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรในการศึกษานี้คำนวณโดยตรงจากสัดส่วนมีเทน อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวไม่สามารถใช้สรุปว่าอัตราส่วน 50:50 ให้พลังงานรวมสูงที่สุดได้ เนื่องจากการคำนวณพลังงานรวมจำเป็นต้องใช้ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ของแต่ละอัตราส่วนร่วมด้วย

6.2.4 ด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบ ผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ประมาณ 4,701.20 บาทต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 4.86 ปี ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับระบบพลังงานทดแทนขนาดครัวเรือน นอกจากนี้ การที่ค่า NPV มีค่าเป็นบวกประมาณ 6,840 บาท และค่า IRR เท่ากับ 15.8% ซึ่งสูงกว่าอัตราคิดลด 8% แสดงว่าโครงการสามารถสร้างผลตอบแทนได้มากกว่าต้นทุนทางการเงินที่กำหนด และมีความคุ้มค่าในการลงทุนตลอดอายุโครงการ 10 ปี ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ดังกล่าวมีพื้นฐานจากการนำวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น ซึ่งมีต้นทุนต่ำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานที่สามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ได้ อย่างไรก็ตาม ผลตอบแทนของระบบในทางปฏิบัติอาจเปลี่ยนแปลงตามต้นทุนการติดตั้ง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา ราคาก๊าซ LPG ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ และความสม่ำเสมอของวัตถุดิบ ดังนั้น การขยายผลสู่ระดับชุมชนควรมีการสำรวจปริมาณวัตถุดิบและความต้องการพลังงานของพื้นที่อย่างละเอียด รวมถึงออกแบบขนาดระบบให้เหมาะสมกับบริบทของแต่ละชุมชน

โดยสรุป ภายใต้การทดลองระดับห้องปฏิบัติการ อัตราส่วน 50:50 ให้สัดส่วนมีเทนเฉลี่ยและค่าความร้อน

ต่อหน่วยปริมาตรสูงที่สุดในกลุ่มที่ศึกษา ผลดังกล่าวเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาและทดสอบระบบระดับนำร่อง โดยจำเป็นต้องศึกษาปริมาณก๊าซ ผลผลิตก๊าซต่อหน่วย VS เสถียรภาพกระบวนการ และประเมินด้านเศรษฐศาสตร์จากข้อมูลการเดินระบบจริงก่อนสรุปความเหมาะสมในระดับครัวเรือนหรือชุมชน

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

7.1.1 ควรขยายขนาดการทดลองจากถังหมักระดับห้องปฏิบัติการขนาด 5 ลิตร ไปสู่ระบบระดับนำร่องหรือระดับครัวเรือน เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้สภาพแวดล้อมและการใช้งานจริงในชุมชน

7.1.2 ควรศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มเติม เช่น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อัตราการระเหยอินทรีย์ ระยะเวลาเก็บกัก อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และความรู้ในการกวน เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทนอย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ

7.1.3 ควรศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการปรับสภาพผักตบชวา เช่น การลดขนาด การใช้ความร้อน การใช้สารละลายต่าง และการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสและเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพ

7.1.4 ควรศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม อัตราการผลิตก๊าซ และองค์ประกอบของก๊าซอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการหมัก รวมทั้งศึกษาวิธีลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และความชื้น เพื่อให้ก๊าซชีวภาพมีคุณภาพเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง

7.1.5 ควรวิเคราะห์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ให้ครอบคลุมตลอดอายุโครงการ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของราคาก๊าซ LPG ต้นทุนแรงงาน ค่าบำรุงรักษา ปริมาณวัตถุดิบในแต่ละฤดูกาล และประโยชน์จากการนำกากหมักไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์

7.2 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

7.2.1 การนำผลการวิจัยไปใช้ ควรพิจารณาอัตราส่วนผักตบชวาต่อมูลวัว 50:50 โดยน้ำหนักแห้งเป็นแนวทางเบื้องต้น เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวให้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนมีเทนและค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรก๊าซชีวภาพสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ ทั้งนี้ควรทดสอบปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จริงและผลผลิตก๊าซต่อหน่วยสารอินทรีย์เพิ่มเติมก่อนนำไปขยายผลในระดับนำร่องหรือระดับชุมชน

7.2.2 ควรเตรียมผักตบชวาโดยล้างทำความสะอาดและสับให้มีขนาดประมาณ 1–3 เซนติเมตร ส่วนมูลวัวควรคัดแยกสิ่งปนเปื้อนและผสมกับน้ำให้เป็นสารละลายที่สม่ำเสมอ เพื่อช่วยให้วัตถุดิบย่อยสลายได้ง่ายและลดปัญหาการอุดตันภายในถังหมัก

7.2.3 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่นำไปใช้งานจริงควรติดตั้งอุปกรณ์กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และความชื้น รวมทั้งติดตั้งวาล์วนิรภัย อุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ และตรวจสอบการรั่วซึมของก๊าซอย่างสม่ำเสมอ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน

7.2.4 ควรส่งเสริมให้ครัวเรือนหรือชุมชนจัดตั้งระบบบริหารจัดการวัตถุดิบร่วมกัน โดยกำหนดผู้รับผิดชอบในการรวบรวมผักตบชวาและมูลวัว การบ่อนวัตถุดิบ การควบคุมระบบ และการบำรุงรักษา พร้อมทั้งจัดอบรมการผลิตและการใช้ก๊าซชีวภาพอย่างถูกต้องและปลอดภัย

7.2.5 ก่อนขยายผลไปใช้ในระดับชุมชนควรดำเนินโครงการนำร่องในพื้นที่ที่มีผักตบชวาและมูลวัวเพียงพอ พร้อมบันทึกข้อมูลปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ การใช้พลังงาน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน และปัญหาที่เกิดขึ้น เพื่อใช้ปรับปรุงระบบให้เหมาะสมกับสภาพเศรษฐกิจ สังคม และทรัพยากรของแต่ละชุมชน

8. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม งบประมาณ

เพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund; FF)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช และอำเภอเชียรใหญ่
จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่ให้การสนับสนุนและความร่วมมือ
ในการดำเนินงานวิจัย

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Khalid, A. and et al. 2011. "The anaerobic digestion of solid organic waste," *Waste Management*, 31(8): pp. 1737-1744. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>
- [2] International Energy Agency. 2020. *Outlook for Biogas and Biomethane: Prospects for Organic Growth*. Paris, France: IEA
- [3] Rajendran, K., Aslanzadeh, S. and Taherzadeh, M. J. 2012. "Household biogas digesters—A review," *Energies*, 5(8): pp. 2911-2942. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en5082911>
- [4] O'Sullivan, C. A. and et al. 2010. "Anaerobic digestion of harvested aquatic weeds: Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), cabomba (*Cabomba caroliniana*) and salvinia (*Salvinia molesta*)," *Ecological Engineering*, 36(10): pp. 1459-1468. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.06.027>
- [5] Priya, P. and et al. 2018. "Biomethanation of water hyacinth biomass," *Bioresour Technol*, 255: pp. 288-292. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.119>
- [6] Tasnim, F., Iqbal, S. A. and Chowdhury, A. R. 2017. "Biogas production from anaerobic co-digestion of cow manure with kitchen waste and water hyacinth," *Renewable Energy*, 109: pp. 434-439. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.044>
- [7] Omondi, E. A., Njuru, P. G. and Ndiba, P. K. 2019. "Anaerobic co-digestion of water hyacinth (*E. crassipes*) with ruminal slaughterhouse waste for biogas production," *International Journal of Renewable Energy Development*, 8(3): pp. 253-259. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14710/ijred.8.3.253-259>
- [8] Rahman, M. M. and et al. 2014. "Hybrid application of biogas and solar resources to fulfill household energy needs: A potentially viable option in rural areas of developing countries," *Renewable Energy*, 68: pp. 35-45. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.030>
- [9] Garfi, M. and et al. 2012. "Evaluating benefits of low-cost household digesters for rural Andean communities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1): pp. 575-581. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.023>
- [10] Ali, S. S. and et al. 2022. "Exploring the potential of anaerobic co-digestion of water hyacinth and cattle dung for enhanced biomethanation and techno-economic feasibility," *Fuel*, 329: p. 125397. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125397>
- [11] Soeprijanto, S. and et al. 2021. "The utilization of water hyacinth for biogas production in a plug flow anaerobic digester," *International Journal of Renewable Energy Development*, 10(1): pp. 27-35. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.21843>

- [12] Lerkmahalikhit, Y. and Sasananan, S. 2021. "Enhancement of biogas production potential of water hyacinth (*Eichhornia speciosa* Kunth) using integrated solar radiation and co-digestion," *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, 16(2): pp. 1-15. [Online]. Available: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/sej/article/view/243494> (in Thai)
- [13] Kaewpuang, T. and et al. 2025. "High-rate biogas production from water hyacinth via co-digestion with cattle manure: Kinetic assessment, process stabilization, and energy recovery in an invasive-plant biorefinery," *Maejo International Journal of Energy and Environmental Communication*, 7(2): pp. 64-74. [Online]. Available: <https://doi.org/10.54279/mijeec.v7i2.264510>
- [14] Damrongsak, D. and Chaichana, C. 2020. "Biogas initiative from municipal solid waste in northern Thailand," *Energy Reports*, 6(Suppl. 2): pp. 428-433. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.098>
- [15] Surendra, K. C. and et al. 2014. "Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31: pp. 846-859. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.015>
- [16] International Renewable Energy Agency. 2020. *Renewable Power Generation Costs in 2019*. Abu Dhabi, United Arab Emirates: IRENA
- [17] Mata-Alvarez, J. and et al. 2014. "A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36: pp. 412-427.
- [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>
- [18] Weiland, P. 2010. "Biogas production: Current state and perspectives," *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4): pp. 849-860. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
- [19] Angelidaki, I. and et al. 2018. "Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives," *Biotechnology Advances*, 36(2): pp. 452-466. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
- [20] Tufaner, F. and Avşar, Y. 2016. "Effects of co-substrate on biogas production from cattle manure: A review," *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(9): pp. 2303-2312. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1069-1>

การคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบไก่แปรรูปที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมอาหารแปรรูปแช่แข็ง ด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น กรณีศึกษา บริษัท XYZ

OPTIMIZE SUPPLIER SELECTION FOR PROCESSED CHICKEN RAW MATERIALS IN FROZEN FOOD INDUSTRY USING THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS: A CASE STUDY OF XYZ

เบญจพร กันหามอม¹, ปิยะ บุซารกุล^{2*}, พัฒนพงษ์ พลายนแก้ว³

Benchaphon Kanhamom¹, Piya Butsarakul^{2*}, Pattanapong Praykaw³

¹บัณฑิตบริหารธุรกิจ สาขาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน วิทยาลัยโลจิสติกส์และซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยศรีปทุมวิทยาเขตขอนแก่น

²Seagate Technology จังหวัดนครราชสีมา

³สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์ คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

¹Bachelor of Business Administration, Major in Logistics and Supply Chain Management, College of Logistics and Supply Chain, Sripatum University, Khon Kaen Campus

²Seagate Technology, Nakhon Ratchasima Province

³Logistics Management Program, Faculty of Business Administration and Information Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: piya.butsarakul@gmail.com

วันที่รับบทความ: 30 กรกฎาคม 2569 ; วันที่ทบทวนบทความ: 11 สิงหาคม 2569 ; วันที่ตอบรับบทความ: 28 สิงหาคม 2569 ;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 31 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลัก และจัดลำดับความเหมาะสมของทางเลือกในการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบชิ้นส่วนไก่แปรรูปสำหรับกรณีศึกษา บริษัท XYZ โดยปัญหาขององค์กรพบว่า ปัจจุบันประสบปัญหาการขาดแคลนระบบการประเมินผู้ส่งมอบชิ้นส่วนไก่แปรรูปที่เป็นระบบ ส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนด้านคุณภาพและต้นทุนวัตถุดิบ จึงได้ประยุกต์ใช้เทคนิคกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) ร่วมกับดุลยพินิจของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางในองค์กรจำนวน 5 ท่าน ผลการวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลัก 5 ด้าน พบว่า ผลการวิจัยชี้ให้เห็นอย่างเด่นชัดว่า ปัจจัยด้านคุณภาพเป็นองค์ประกอบที่องค์กรให้ความสำคัญสูงสุด (0.462) โดยมีน้ำหนักการตัดสินใจเกือบครึ่งหนึ่งของปัจจัยทั้งหมด และมีความสำคัญมากกว่าปัจจัยด้านราคา (0.216) ที่เป็นลำดับรองลงมาถึง 2 เท่า ในขณะที่ปัจจัยด้านการส่งมอบ ความน่าเชื่อถือ และการบริการ มีระดับความสำคัญใกล้เคียงกันในลำดับถัดมา โดยมีผลการทดสอบอัตราส่วนความไม่สอดคล้องรวมกลุ่มเท่ากับ 0.052 ซึ่งยอมรับได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับผลการประมวลผลน้ำหนักสุทธิเพื่อจัดลำดับทางเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ พบว่า ผู้ส่งมอบ A เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดเชิงกลยุทธ์ โดยได้ค่าน้ำหนักรวมสุทธิสูงสุดเท่ากับ 0.561 รองลงมาคือ ผู้ส่งมอบ B (0.276) และผู้ส่งมอบ C (0.163) ตามลำดับ ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ช่วยให้องค์กรกรณีศึกษามีระบบการตัดสินใจจัดซื้อวัตถุดิบที่เป็นมาตรฐาน ช่วยให้การตัดสินใจขององค์กรมีความเป็นระบบ โปร่งใส ลดความเสี่ยง และสามารถประยุกต์ใช้กับการจัดซื้อวัตถุดิบประเภทอื่นในอนาคตได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น, การคัดเลือกผู้ส่งมอบ, การตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์, อุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง

Abstract: This research aims to determine the relative weights of key decision criteria and prioritize alternative suppliers for processed chicken parts in a case study of XYZ Company. The organization currently lacks a systematic evaluation system for processed chicken suppliers, leading to uncertainties in quality and raw material costs. To address this, The Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied in conjunction with the expert judgments of five key informants within the organization. The evaluation of five main criteria revealed that product quality holds the highest priority weight (0.462), accounting for nearly half of the total decision weight and being twice as important as price (0.216), which ranked second. Meanwhile, delivery, reliability, and service exhibited comparatively similar levels of importance in the subsequent rankings, the results indicated that Supplier A is the most strategically optimal alternative, achieving the highest composite weight of 0.561, followed by Supplier B (0.276) and Supplier C (0.163). The findings of this study provide the case company with a standard decision-making tool for procurement, that reduces operational risks, but also offer a scalable model adaptable for the procurement of other raw materials to ensure long-term efficiency.

Keywords: Analytic Hierarchy Process, Supplier Selection, Multi-Criteria Decision Making, Frozen Food Industry

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอาหารแปรรูปของไทยมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์จากเนื้อไก่แปรรูป ซึ่งได้รับความนิยมในกลุ่มผู้บริโภคทั้งในและต่างประเทศ เนื่องจากเป็นแหล่งโปรตีนราคาถูก ย่อยง่าย และเหมาะสมกับการแปรรูปเป็นอาหารหลากหลายประเภท โดยกระบวนการผลิตที่มีคุณภาพต้องอาศัยวัตถุดิบไก่แปรรูปที่ได้มาตรฐาน สดใหม่ และปลอดภัย เพื่อคงคุณภาพของสินค้าและรสชาติที่สม่ำเสมอ หากบริษัทเลือกผู้ส่งมอบที่ไม่เหมาะสม อาจเกิดปัญหาได้

กระบวนการจัดซื้อจัดหาวัตถุดิบต้นน้ำนับเป็นกิจกรรมเชิงกลยุทธ์ที่มีความสำคัญยิ่งในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง เนื่องจากต้นทุนในส่วนนี้อาจสูงถึงร้อยละ 70 ของต้นทุนรวมทั้งหมด ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต ขีดความสามารถในการแข่งขัน และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย[1] การตัดสินใจคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ (Supplier Selection) ที่เหมาะสมจึงกลายเป็นหัวใจของการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ที่สำคัญ [2] อย่างไรก็ตาม ปัญหา

การจัดซื้อในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งไม่สามารถใช้เกณฑ์ด้านราคาต่ำสุดเชิงปริมาณมาพิจารณาเพียงอย่างเดียวได้แต่จำเป็นต้องพิจารณาเกณฑ์เชิงคุณภาพที่หลากหลาย (Multi-Criteria Decision Making: MCDM) ร่วมด้วย อาทิ มาตรฐานการรับรองความปลอดภัยทางอาหาร (HACCP, GMP, Halal) ประวัติความน่าเชื่อถือ และระบบการให้บริการ [3], [4] การตัดสินใจโดยพึ่งพาเพียงดุลยพินิจส่วนบุคคลที่ปราศจากโครงสร้างทางวิทยาศาสตร์ จึงมักนำมาซึ่งความเสี่ยงต่อระบบการจัดการห่วงโซ่อุปทานขององค์กร [5]

กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาการตัดสินใจที่มีความซับซ้อน เช่น ปัญหาการคัดเลือกผู้ส่งมอบที่เหมาะสมเพื่อจัดหาเกณฑ์ที่มีความสำคัญต่อการตัดสินใจ และเพื่อจัดทำกระบวนการมาตรฐานในการประเมินผู้ส่งมอบให้เป็นกระบวนการมาตรฐาน [9] และ ลดความเสี่ยงในการใช้บุคลากรที่ไม่มีความรู้ความเชี่ยวชาญ หรือการมีอคติในการตัดสินใจคัดเลือกผู้ส่งมอบ [2] โดยระบบ AHP เป็นเครื่องมือ

ที่มีจุดเด่นในการจำแนกโครงสร้างปัญหาออกเป็นลำดับชั้น และประเมินค่าน้ำหนักผ่านการเปรียบเทียบเชิงคู่ (Pairwise Comparison) ซึ่งช่วยแปลงดุลยพินิจเชิงคุณภาพที่เป็นนามธรรมให้กลายเป็นค่าน้ำหนักเชิงปริมาณที่จับต้องได้ พร้อมมีระบบทดสอบอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio: C.R.) เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของชุดข้อมูล [6]

กรณีศึกษา บริษัท XYZ ซึ่งเป็นผู้ผลิตในอุตสาหกรรมอาหารแปรรูป ปัจจุบันประสบปัญหาการขาดแคลนระบบการประเมินผู้ส่งมอบชิ้นส่วนไก่แปรรูปที่เป็นระบบ ส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนด้านคุณภาพและต้นทุนวัตถุดิบ จากประเด็นปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงสนใจประยุกต์ใช้เทคนิค AHP ร่วมกับการความคิดเห็นของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางในองค์กรจำนวน 5 ท่าน เพื่อระบุค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ตัดสินใจหลักและจัดลำดับความเหมาะสมของผู้ส่งมอบ ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยชิ้นนี้ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความโปร่งใสและลดความเสี่ยงในการตัดสินใจให้แก่บริษัท กรณีศึกษาเท่านั้น แต่ยังสามารถใช้เป็นแนวทางมาตรฐานในการบริหารจัดการห่วงโซ่อุปทานสำหรับอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งของไทยต่อไป

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาและกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลักที่ใช้ในการตัดสินใจคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบชิ้นส่วนไก่แปรรูปของ บริษัท XYZ โดยประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) ร่วมกับดุลยพินิจของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ

2.2 เพื่อจัดลำดับความเหมาะสมและคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบชิ้นส่วนไก่แปรรูปที่ดีที่สุดจากทางเลือกทั้งหมดสำหรับเป็นแนวทางในการตัดสินใจจัดซื้อเชิงกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพขององค์กรกรณีศึกษา

3. ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาปัจจัยในการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบไก่แปรรูปด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น กรณีศึกษา บริษัท XYZ ดังนั้น มีขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

3.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา การวิจัยนี้มุ่งเน้นการกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยและจัดลำดับความเหมาะสมของทางเลือกในการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ โดยจำกัดเฉพาะการตัดสินใจคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบประเภท “ชิ้นส่วนไก่แปรรูป” เท่านั้น ปัจจัยหลักที่นำมาพิจารณามีจำนวน 5 ด้าน ได้แก่ ด้านคุณภาพ ด้านราคา ด้านการส่งมอบ ด้านความน่าเชื่อถือ และด้านการบริการ

3.2 ขอบเขตด้านประชากร กลุ่มผู้ให้ข้อมูลสำคัญ (Key Informants) ในการทำแบบประเมินและเปรียบเทียบเชิงคู่ คือ กลุ่มผู้เชี่ยวชาญที่มีอำนาจตัดสินใจและมีประสบการณ์ตรงในกระบวนการจัดซื้อวัตถุดิบและการจัดการคุณภาพในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งของ บริษัท XYZ จำนวน 5 ท่าน ประกอบด้วย เจ้าหน้าที่จัดซื้อ ผู้ควบคุมดูแลคุณภาพ เจ้าหน้าที่พัฒนาโครงสร้างกระบวนการ, ผู้จัดการฝ่ายจัดซื้อ และผู้จัดการแผนกขาย

3.3 ขอบเขตด้านสถานที่ การศึกษารั้งนี้ ดำเนินงานวิจัยและจัดเก็บข้อมูลเฉพาะกรณีศึกษาภายใน บริษัท XYZ ซึ่งเป็นโรงงานแปรรูปอาหารแช่แข็งในประเทศไทยเท่านั้น

4. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยฉบับนี้ประยุกต์ใช้เทคนิคกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) เพื่อช่วยในการตัดสินใจคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบชิ้นส่วนไก่แปรรูปที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกรณีศึกษา บริษัท XYZ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยที่เป็นระบบแยกตามข้อย้อยดังต่อไปนี้

4.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยเริ่มจากการทบทวนวรรณกรรม บทความวิชาการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อรวบรวมเกณฑ์ที่มีผลต่อการตัดสินใจคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบ จากนั้นนำข้อมูลเกณฑ์ดังกล่าวไปทำการสอบถามและกลั่นกรองร่วมกับผู้มีอำนาจในการตัดสินใจและมีประสบการณ์ตรงในกระบวนการจัดซื้อวัตถุดิบของอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งจำนวน 5 ท่าน ซึ่งประกอบด้วย เจ้าหน้าที่จัดซื้อ ผู้ควบคุมดูแลคุณภาพ

เจ้าหน้าที่พัฒนาโครงสร้างกระบวนการ ผู้จัดการฝ่ายจัดซื้อ และผู้จัดการแผนกขาย เพื่อให้ได้เกณฑ์ที่สอดคล้องกับความต้องการขององค์กรอย่างแท้จริง โดยสรุปเกณฑ์หลัก 5 ด้าน และทางเลือกในการประเมินผู้ส่งมอบจำนวน 3 ราย ดังแสดงในตารางที่ 1

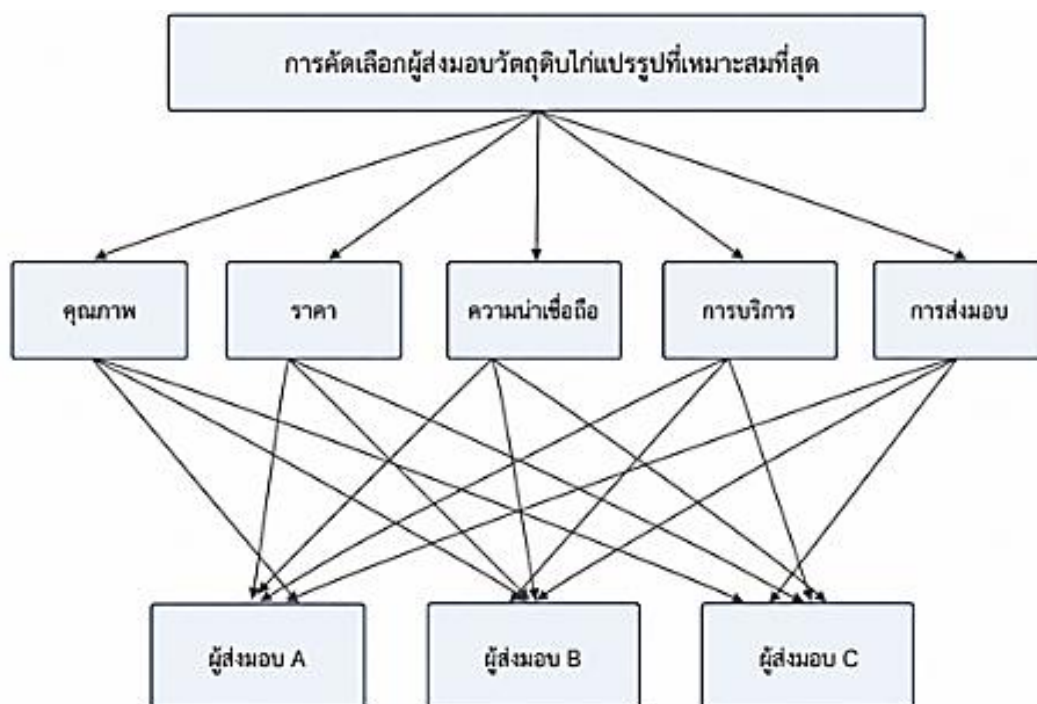
ตารางที่ 1 เกณฑ์ที่ใช้ในการคัดเลือกผู้ส่งมอบ

การคัดเลือก	เกณฑ์ในการตัดสินใจ	ทางเลือก
ผู้ส่งมอบ	ด้านคุณภาพ	ผู้ส่งมอบ A
	ด้านราคา	
วัตถุดิบไก่แปรรูปที่	ด้านความน่าเชื่อถือ	ผู้ส่งมอบ B
	ด้านการบริการ	
เหมาะสม	ด้านการส่งมอบ	ผู้ส่งมอบ C

จากการทบทวนวรรณกรรม สามารถสรุปรายละเอียดของแต่ละเกณฑ์ได้ดังนี้ 1) คุณภาพ พิจารณาจากความสดใหม่และมาตรฐานสากล เช่น HACCP, GMP, Halal 2) ราคา พิจารณาจากราคาต่อกิโลกรัมและส่วนลด

ปริมาณมาก 3) ความน่าเชื่อถือ พิจารณาจากความมั่นคงและการปฏิบัติตามสัญญา 4) การบริการ พิจารณาจากนโยบายการเคลมสินค้าและบริการหลังการขาย 5) การส่งมอบ พิจารณาจากความตรงต่อเวลาและความถูกต้องของปริมาณสินค้า

4.2 สร้างแผนภูมิโครงสร้างลำดับชั้นในการตัดสินใจในการคัดเลือกผู้ส่งมอบ ผู้วิจัยนำข้อมูลเป้าหมาย เกณฑ์หลัก และทางเลือกที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 1 มาวิเคราะห์และจัดทำโครงสร้างลำดับชั้นสำหรับการตัดสินใจ (AHP Hierarchy Model) เพื่อแสดงความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างและช่วยให้ผู้เชี่ยวชาญเห็นภาพรวมในการเปรียบเทียบโดยโครงสร้างแบ่งออกเป็น 3 ระดับหลัก ได้แก่ ระดับที่ 1 เป้าหมายของการตัดสินใจ (อยู่ด้านบนสุด) ระดับที่ 2 เกณฑ์หลักที่ใช้ในการพิจารณา (จำนวน 5 เกณฑ์) และระดับที่ 3 ทางเลือกของผู้ส่งมอบวัตถุดิบ (จำนวน 3 ราย) ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนภูมิโครงสร้างลำดับชั้นของการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบไก่แปรรูปที่เหมาะสม

จากภาพที่ 1 เป้าหมายคือ คัดเลือกผู้ส่งมอบ วัตถุดิบไก่แปรรูป เกณฑ์ในการตัดสินใจคือ คุณภาพ ราคา ความน่าเชื่อถือ การบริการ การส่งมอบ [7] โดยมีทางเลือก 3 ทางเลือก คือ ผู้ส่งมอบ A ผู้ส่งมอบ B และผู้ส่งมอบ C โดยงานวิจัยมีผู้เชี่ยวชาญในการตอบแบบสอบถามเกณฑ์ในการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบไก่แปรรูปด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น ทั้งหมด 5 คน ที่มีความเกี่ยวข้องและมีประสบการณ์การทำงานในการคัดเลือกผู้ส่งมอบ

4.3 วิเคราะห์ข้อมูลการเปรียบเทียบของปัจจัยเพื่อกำหนดลำดับความสำคัญ ขั้นตอนการประเมินความสำคัญ จะใช้การเปรียบเทียบเชิงคู่ (Pairwise Comparisons) ในแต่ละระดับชั้น โดยให้ผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 ท่านทำแบบบันทึกประเมินค่าความสำคัญเปรียบเทียบกันทีละคู่ มาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบอ้างอิงตามเกณฑ์มาตรฐานของ Saaty ขนาด 1-9 เพื่อกำหนดระดับความสำคัญจากเท่ากัน ไปจนถึงมากที่สุด ดังรายละเอียดในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 มาตรฐานค่ามาตรฐาน AHP 1-9

ระดับ	ความหมายเชิงเปรียบเทียบ
ความสำคัญ	
1	สำคัญเท่ากัน
3	สำคัญมากปานกลาง
5	สำคัญมาก
7	สำคัญมากที่สุด
9	สำคัญที่สุด
2, 4, 6, 8	ค่าระดับกลางระหว่างความสำคัญที่อยู่ติดกัน

4.4 การคำนวณค่าน้ำหนักของปัจจัย เพื่อหาค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (Eigenvector) หลังจากได้สร้างเมทริกซ์การเปรียบเทียบคู่แล้ว ลำดับต่อไปจะเป็นการใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะซึ่งสามารถที่จะนำมาใช้เป็นมาตรวัดตัวหนึ่งในการตรวจสอบความสอดคล้องของดุลยพินิจสมการความสอดคล้องของปัจจัยตามสมการดังนี้

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n [\sum_{j=1}^n a_{ij} W_i] \dots \dots \dots (1)$$

โดยที่

λ แทน ค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ

W_i แทน ค่าน้ำหนักของปัจจัย

4.5 วิเคราะห์ข้อมูลดุลยพินิจรวมของกลุ่มผู้ตัดสินใจ

เนื่องจากการวิจัยนี้ เป็นการตัดสินใจร่วมกันของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ (Group Decision Making) เพื่อหลีกเลี่ยงความเบี่ยงเบนและรักษาความสมดุลตามหลักการของ AHP ผู้วิจัยจึงดำเนินการรวมข้อมูลการเปรียบเทียบเชิงคู่ของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 ท่านเข้าด้วยกันให้เป็นเมทริกซ์รวมกลุ่มเพียงหนึ่งเดียว โดยใช้หลักการคำนวณหาค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric Mean: G.M.) [8] ตามสมการดังนี้

$$G.M. = \sqrt[n]{X_1 * X_2 * \dots * X_n} \dots \dots \dots (2)$$

โดยที่

n แทน จำนวนผู้เชี่ยวชาญ ($n = 5$)

X_i แทน ค่าคะแนนการเปรียบเทียบเชิงคู่ของผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่าน

4.6 วิเคราะห์ความสอดคล้องกันของเหตุผล

ขั้นตอนต่อมาคือนำผลการเปรียบเทียบเชิงคู่ที่ผ่านการหาค่าเฉลี่ยเรขาคณิตแล้ว ไปคำนวณหาอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio: C.R.) เพื่อตรวจสอบความสมเหตุสมผลว่าชุดข้อมูลมีความสอดคล้องและเชื่อถือได้หรือไม่ โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

4.6.1 คำนวณหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index: C.I.) เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของการเปรียบเทียบเชิงคู่ โดยใช้สมการ

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \dots \dots \dots (3)$$

โดยที่

$\lambda_{\max}$ แทน ค่าเจาะจงสูงสุดของเมทริกซ์ (Eigenvalue)

n แทน ขนาดของเมทริกซ์ (จำนวนปัจจัยที่นำมาเปรียบเทียบ)

4.6.2 คำนวณหาค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio: C.R.) โดยเปรียบเทียบค่า C.I. กับค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (Random Consistency Index: R.I.) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ขึ้นอยู่กับขนาดของเมทริกซ์ตั้งแต่ 1x1 จนถึง 15x15 (แสดงค่าในตารางที่ 3) โดยคำนวณจากสมการ: คำนวณหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index: C.I.) เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของการเปรียบเทียบเชิงคู่ โดยใช้สมการ:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \dots\dots\dots(4)$$

ตารางที่ 3 ค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม มาตรฐาน (Random Consistency Index: R.I.)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

เงื่อนไขในการยอมรับผลการวิเคราะห์ระบุ ว่า อัตราส่วนความสอดคล้อง (C.R.) จะต้องมีย่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.10

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญของปัจจัยในการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบไก่แปรรูป

ลำดับ	ตำแหน่ง	คุณภาพ	ราคา	ความน่าเชื่อถือ	บริการ	การส่งมอบ	C.R.
1	เจ้าหน้าที่จัดซื้อ	0.446	0.229	0.161	0.099	0.065	0.030
2	ผู้ควบคุมดูแลคุณภาพ	0.466	0.240	0.118	0.072	0.104	0.093
3	เจ้าหน้าที่พัฒนาโครงสร้าง	0.465	0.204	0.059	0.064	0.207	0.030
4	ผู้จัดการฝ่ายจัดซื้อ	0.434	0.206	0.158	0.118	0.084	0.099
5	ผู้จัดการแผนกขาย	0.483	0.214	0.107	0.126	0.069	0.036
ค่าน้ำหนักรวมกลุ่ม		0.462	0.216	0.111	0.095	0.116	0.052

จากตารางที่ 4 ผลการคำนวณหาน้ำหนักความสำคัญรวมกลุ่ม (Priority Vector) ของปัจจัยหลักทั้ง 5 ด้าน พบว่า ปัจจัยที่มีค่าน้ำหนักสูงที่สุดคือ ด้านคุณภาพ เท่ากับ 46.20% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในการคัดเลือกซัพพลายเออร์กรณีศึกษาศูนย์กระจายสินค้าไก่แช่แข็ง [7] ที่ระบุว่า เกณฑ์เชิงคุณภาพและความปลอดภัยทางอาหารเป็นสิ่งที่ไม่สามารถประนีประนอมได้ อันดับสองคือ ด้านราคา เท่ากับ 21.60% ในขณะที่ปัจจัยด้านการส่งมอบ ความน่าเชื่อถือ และการบริการ มีระดับความสำคัญใกล้เคียงกันในลำดับถัดมา โดยผลรวมของค่าน้ำหนักทั้งหมดเท่ากับ 1.000 พอได้

แสดงว่าข้อมูลคู่พินิจนั้นมีความสอดคล้อง สมเหตุสมผล และยอมรับได้ สามารถนำค่าน้ำหนักปัจจัย (Priority Vector) ไปใช้งานต่อได้ แต่หากค่า C.R. มีค่ามากกว่า 0.10 แสดงว่าข้อมูลไม่มีความสอดคล้องกัน ไม่สามารถเชื่อถือได้ ผู้เชี่ยวชาญจะต้องทำการปรับเปลี่ยนหรือบันทึกข้อมูลคะแนนการเปรียบเทียบเชิงคู่ใหม่อีกครั้งจนกว่าค่า C.R. จะเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด

5. ผลการวิจัยผล

5.1 วิเคราะห์ข้อมูลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักของปัจจัยหลัก จากการรวบรวมแบบบันทึกการประเมินของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 ท่าน และนำมาคำนวณรวมกลุ่มด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric Mean) ผลการวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบไก่แปรรูปแสดงดังตารางที่ 4

สำหรับค่าอัตราส่วนความไม่สอดคล้องรวมกลุ่ม (Group C.R.) เท่ากับ 0.052 ซึ่งยอมรับได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน

5.2 วิเคราะห์ข้อมูลการเปรียบเทียบทางเลือกผู้ส่งมอบภายใต้แต่ละเกณฑ์ การประเมินค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ (Local Weights) ของผู้ส่งมอบทั้ง 3 ราย (ผู้ส่งมอบ A, B และ C) ภายใต้เกณฑ์หลักแต่ละด้าน โดยทำการรวมความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเรขาคณิต สามารถสรุปผลลัพธ์ได้ในตารางที่ 5 ถึงตารางที่ 9 ซึ่งค่าน้ำหนักทางเลือก

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญของวัตถุประสงค์ของการเลือกผู้ส่งมอบภายใต้เกณฑ์ด้านคุณภาพ

ทางเลือกผู้ส่งมอบ	ค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ (Local Weight)	ค่าเฉลี่ยรวมกลุ่ม C.R.
ผู้ส่งมอบ A	0.683	0.060
ผู้ส่งมอบ B	0.144	
ผู้ส่งมอบ C	0.173	
ผลรวม	1.00	

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญของวัตถุประสงค์ของการเลือกผู้ส่งมอบภายใต้เกณฑ์ด้านราคา

ทางเลือกผู้ส่งมอบ	ค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ (Local Weight)	ค่าเฉลี่ยรวมกลุ่ม C.R.
ผู้ส่งมอบ A	0.187	0.070
ผู้ส่งมอบ B	0.723	
ผู้ส่งมอบ C	0.090	
ผลรวม	1.00	

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญของวัตถุประสงค์ของการเลือกผู้ส่งมอบภายใต้เกณฑ์ด้านการส่งมอบ

ทางเลือกผู้ส่งมอบ	ค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ (Local Weight)	ค่าเฉลี่ยรวมกลุ่ม C.R.
ผู้ส่งมอบ A	0.624	0.050
ผู้ส่งมอบ B	0.176	
ผู้ส่งมอบ C	0.200	
ผลรวม	1.00	

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญของวัตถุประสงค์ของการเลือกผู้ส่งมอบภายใต้เกณฑ์ด้านความน่าเชื่อถือ

ทางเลือกผู้ส่งมอบ	ค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ (Local Weight)	ค่าเฉลี่ยรวมกลุ่ม C.R.
ผู้ส่งมอบ A	0.654	0.080
ผู้ส่งมอบ B	0.158	
ผู้ส่งมอบ C	0.188	
ผลรวม	1.00	

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญของวัตถุประสงค์ของการเลือกผู้ส่งมอบภายใต้เกณฑ์ด้านการบริการ

ทางเลือกผู้ส่งมอบ	ค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ (Local Weight)	ค่าเฉลี่ยรวมกลุ่ม C.R.
ผู้ส่งมอบ A	0.632	0.040
ผู้ส่งมอบ B	0.172	
ผู้ส่งมอบ C	0.196	
ผลรวม	1.00	

เมื่อได้ค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ของแต่ละทางเลือกภายใต้เกณฑ์ย่อยครบถ้วนแล้ว ผู้วิจัยจึงดำเนินการรวมน้ำหนักเชิงชั้น (Synthesizing Priorities) โดยนำค่าน้ำหนักเกณฑ์หลักจากตารางที่ 4 มาคูณกับค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ของทางเลือกในตารางที่ 5–9 เพื่อคำนวณหาค่าน้ำหนักความสำคัญรวมสุทธิ (Composite Weights) สำหรับจัดลำดับผู้ส่งมอบวัตถุดิบไก่แปรรูปที่เหมาะสมที่สุด แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การสรุปค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละทางเลือกตามแต่ละเกณฑ์

ทางเลือก	คุณภาพ	ราคา	ความน่าเชื่อถือ	การบริการ	การส่งมอบ	น้ำหนักความสำคัญ	ลำดับความ
ผู้ส่งมอบ	(0.462)	(0.216)	(0.111)	(0.095)	(0.116)	รวมสิทธิ	เหมาะสม
ผู้ส่งมอบ A	0.683	0.187	0.654	0.632	0.624	0.561	1
ผู้ส่งมอบ B	0.144	0.723	0.158	0.172	0.176	0.276	2
ผู้ส่งมอบ C	0.173	0.090	0.188	0.196	0.200	0.163	3
ผลรวม						1.000	

จากตารางที่ 10 สามารถคำนวณลำดับทางเลือกได้จากค่าผลรวมของค่าน้ำหนักเกณฑ์คูณกับค่าน้ำหนักทางเลือกภายใต้เกณฑ์นั้นๆ ผู้ส่งมอบ A = 0.561 ผู้ส่งมอบ B = 0.276 ผู้ส่งมอบ C = 0.163

สรุปผลการจัดอันดับ ผลรวมน้ำหนักปลายทางสุทธิของทางเลือกทั้งหมดบวกรวมกันได้เท่ากับ 1 พอดี (0.561 + 0.276 + 0.163 = 1.000) โดยสามารถสรุปได้ว่า ผู้ส่งมอบ A เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการจัดซื้อวัตถุดิบไก่แปรรูปสำหรับองค์กรการศึกษา เนื่องจากมีศักยภาพสูงสุดและมีความพร้อมเชิงกลยุทธ์เหนือกว่าผู้ส่งมอบ B และ C อย่างมีนัยสำคัญ โดยครองสัดส่วนคะแนนความเหมาะสมเกินกว่าครึ่งหนึ่งของทางเลือกทั้งหมด

6. สรุปและอภิปรายผล

6.1 สรุปผลการวิจัย จากการประยุกต์ใช้ระบบ AHP ร่วมกับการคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน เพื่อคัดเลือกผู้ส่งมอบวัตถุดิบชิ้นส่วนไก่แปรรูปสำหรับ บริษัท XYZ ผลการวิจัยสรุปได้ว่า ปัจจัยหลักที่มีค่าน้ำหนักความสำคัญสูงสุดคือ ด้านคุณภาพ 46.20% รองลงมาคือ ด้านราคา 21.60% ด้านการส่งมอบ 11.60% ด้านความน่าเชื่อถือ 11.10% และด้านการบริการ 9.50% ตามลำดับ สำหรับผลการรวมน้ำหนักสุทธิเพื่อจัดลำดับผู้ส่งมอบ พบว่า ผู้ส่งมอบ A เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด โดยได้ค่าน้ำหนักรวมสุทธิสูงสุดเท่ากับ 56.10% รองลงมาคือ ผู้ส่งมอบ B 27.60% และผู้ส่งมอบ C 16.30%

6.2 อภิปรายผลการวิจัย ประเด็นที่น่าสนใจพบว่า กลุ่มผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญกับ “ด้านคุณภาพ” สูงที่สุดเป็นอันดับแรก (ร้อยละ 46.20) ซึ่งสอดคล้อง ที่ระบุว่าเกณฑ์เชิง

คุณภาพและความปลอดภัยทางอาหารเป็นสิ่งที่ไม่สามารถประนีประนอมได้ในอุตสาหกรรมแช่แข็ง เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน HACCP และ GMP [3] อย่างไรก็ตาม ปัจจัย “ด้านราคา” ยังคงได้รับความสำคัญเป็นอันดับที่สอง (ร้อยละ 21.60) ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Suraraksa และ Shin [1] ที่ระบุว่าต้นทุนวัตถุดิบต้นน้ำเป็นสัดส่วนที่สูงที่สุดของต้นทุนการผลิตทั้งหมด ในส่วนของการจัดอันดับทางเลือก ผลลัพธ์ที่ระบุว่า ผู้ส่งมอบ A เป็นทางเลือกที่ดีที่สุด ชี้ให้เห็นว่าเทคนิค AHP สามารถช่วยคลายข้อจำกัดของการตัดสินใจในอดีตที่มักเลือกผู้ส่งมอบที่เสนอราคาต่ำที่สุด (ผู้ส่งมอบ B) แต่เมื่อพิจารณาแบบบูรณาการหลายเกณฑ์ (MCDM) แล้ว ผู้ส่งมอบ A ซึ่งมีความโดดเด่นในภาพรวมเชิงคุณภาพจึงเป็นคำตอบเชิงกลยุทธ์ที่สร้างความมั่นคงและลดความเสี่ยงในห่วงโซ่อุปทานของ บริษัท XYZ ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด สอดคล้องกับข้อสรุปของ Luanghan และคณะ[3] และ Arunyanart [5]

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

7.1.1 บริษัทกรณีศึกษา (XYZ) ควรนำเกณฑ์และค่าน้ำหนักความสำคัญที่ได้จากการวิจัยนี้ ไปจัดทำเป็น “แบบฟอร์มมาตรฐานการประเมินผู้ส่งมอบ (Supplier Scorecard)” ประจำปี เพื่อให้ฝ่ายจัดซื้อใช้เป็นเครื่องมือที่เป็นรูปธรรมในการติดตามและตรวจสอบผลการดำเนินงานของผู้ส่งมอบแต่ละรายอย่างต่อเนื่อง ไม่จำกัดเฉพาะช่วงคัดเลือกเริ่มต้นเท่านั้น ซึ่งจะสามารถประยุกต์ใช้กับการจัดซื้อวัตถุดิบประเภทอื่นในอนาคตได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

7.1.2 เนื่องจากปัจจัยด้านคุณภาพมีค่าน้ำหนักสูงที่สุด (0.462) องค์กรควรจัดตั้งทีมงานตรวจสอบคุณภาพร่วมกันระหว่างฝ่ายประกันคุณภาพ (QA) และฝ่ายจัดซื้อเพื่อเข้าตรวจประเมินสถานประกอบการของผู้ส่งมอบ (Supplier Audit) เป็นระยะ เพื่อรับประกันว่าผู้ส่งมอบจะสามารถรักษามาตรฐานการผลิตและการรับรองความปลอดภัยทางอาหาร (HACCP, GMP, Halal) ได้ตามข้อตกลง

7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

7.2.1 ในการศึกษาครั้งต่อไป ควรพิจารณาขยายผลโดยการเพิ่มเกณฑ์ย่อย (Sub-criteria) ภายใต้เกณฑ์หลักทั้ง 5 ด้าน เช่น เกณฑ์ย่อยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม หรือความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนปริมาณคำสั่งซื้อ เพื่อให้แบบจำลองการตัดสินใจมีความละเอียดและครอบคลุมบริบทการดำเนินธุรกิจในยุคปัจจุบันมากยิ่งขึ้น

7.2.2 ควรพิจารณาประยุกต์ใช้เทคนิคการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์อื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น กระบวนการวิเคราะห์โครงข่ายเชิงลำดับชั้น (Analytic Network Process: ANP) หรือการบูรณาการร่วมกับทฤษฎีเซตคลุมเครือ (Fuzzy Set Theory) เพื่อช่วยลดความไม่แน่นอนและความคลาดเคลื่อนจากดุลยพินิจของมนุษย์ในการทำแบบสอบถามเปรียบเทียบเชิงคู่

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา และคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่และเมตตาโดยตลอด ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งที่ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้มีความสมบูรณ์ทางวิชาการมากยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้บริหาร และกลุ่มผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางทั้ง 5 ท่านของ บริษัท XYZ กรณีศึกษา ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าถึงข้อมูลที่เป็นประโยชน์ อนุญาตให้ใช้สถานที่ในการเก็บรวบรวมข้อมูล และเสียสละเวลาใน

การร่วมทำแบบประเมินดุลยพินิจเพื่อเปรียบเทียบปัจจัยเชิงคู่ ซึ่งส่งผลให้ข้อมูลและผลการคำนวณของงานวิจัยชิ้นนี้มีความถูกต้อง แม่นยำ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้จริง

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณครอบครัว มิตรสหาย และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้ระบุนาม ณ ที่นี้ ที่ได้ให้การสนับสนุน กำลังใจ และความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านตลอดการดำเนินงานวิจัย คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องระลึกถึงพระคุณของทุกท่านที่มีส่วนร่วมในความสำเร็จครั้งนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Suraraksa, J. and Shin, K. S. 2019. "Comparative analysis of factors for supplier selection and monitoring: The case of the automotive industry in Thailand," *Sustainability*, 11(4): p. 981. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su11040981>
- [2] Pipatprapa, A., Huang, H.-H. and Huang, C.-H. 2016. "A novel environmental performance evaluation of Thailand's food industry using structural equation modeling and fuzzy analytic hierarchy techniques," *Sustainability*, 8(3): p. 246. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su8030246>
- [3] Luanghan, I., Buranajarukorn, P. and Wattana, K. 2022. "Application of analytic hierarchy process together with simple additive weighting methods for raw materials supplier selection of crispy pork factory," *Engineering and Technology Horizons*, 39(3): pp. 83-98. [Online]. Available: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/article/view/247716> (in Thai)

- [4] Sathiannoppakao, W. and Sirikasemsuk, K. 2020. "Criteria weight determination for supplier selection using fuzzy analytic hierarchy process: A case study of a frozen chicken distribution in the north-central region of Thailand," *Journal of Science Ladkrabang*, 29(1): pp. 23-37. [Online]. Available: https://li01.tci-thaijo.org/index.php/science_kmitl/article/view/236462 (in Thai)
- [5] Arunyanart, S. 2026. "A structured decision-making approach for supplier performance evaluation in the restaurant sector," *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 8(2): pp. 145-164. [Online]. Available: <https://doi.org/10.31181/dmame8220251493>
- [6] Juan, D. 2024. "Solving the medical device supplier selection problem using integrated AHP-TOPSIS method," Master's thesis, Silpakorn University, Bangkok, Thailand. [Online]. Available: <http://ithesis-ir.su.ac.th/dspace/handle/123456789/5868> (in Thai)
- [7] Trirungruang, K. and et al. 2024. "Application of the analytic hierarchy process (AHP) in selecting suppliers, manufacturers of aluminum sheets (coils) for making metal sheet roofs: A case study of XYZ company," *Journal of Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Suvamabhumi*, 6(1): pp. 15-29. [Online]. Available: <https://so03.tci-thaijo.org/index.php/art/article/view/273449> (in Thai)
- [8] Oupthong, N. and Rinchumphu, D. 2023. "Decision for planning development of petroleum production system in Fang Basin, Chiang Mai province," in *Proceedings of the 28th National Convention on Civil Engineering (NCCE 28)*, paper No. CEM24-1. [Online]. Available: <https://conference.thaince.org/index.php/nccce28/article/view/2027> (in Thai)
- [9] Jomthong, P. and et al. 2020. "An application of analytic hierarchy process for selection of printed circuit board supplier for an electronics manufacturer," *Thai Science and Technology Journal*, 28(2): pp. 372-381. [Online]. Available: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj/article/view/234138> (in Thai)

การพัฒนาชุดฝึกอบรมไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์สันดาปภายในแบบโมดูลสำหรับนักเรียน ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ

DEVELOPMENT OF ELECTRICAL SYSTEM TRAINING KIT FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINE VEHICLE AIR CONDITIONING FOR VOCATIONAL CERTIFICATE STUDENTS

รณพร รัตนจันทร์¹, ฉัตรชัย แก้วดี^{2*}, วีรพล ปานศรีนวล², วีระยุทธ สุตสมบุญ²

Ronnaporn Rattanachand ¹, Chatchai Kaewdee^{2*}, Weeraphol Pansrinual²,
Weerayute Sudsomboon²

¹ นักศึกษาหลักสูตรเทคโนโลยีมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

² อาจารย์ประจำหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

¹ A student in the Master of Technology program, majoring in Industrial Technology Innovation, Faculty of Engineering and
Industrial Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University.

² A lecturer in the Doctor of Philosophy program, majoring in Industrial Technology Innovation, Faculty of Engineering and
Industrial Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chatchai_kae.nstru.ac.th

วันที่รับบทความ: 22 กรกฎาคม 2569 ; วันที่ทบทวนบทความ: 7 สิงหาคม 2569 ; วันที่ตอบรับบทความ: 29 สิงหาคม 2569 ;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 31 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาชุดฝึกอบรมไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์สันดาปภายในแบบโมดูลสำหรับนักเรียนประกาศนียบัตรวิชาชีพ 2) ประเมินความเหมาะสมของชุดฝึกที่พัฒนาขึ้น 3) เปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชางานปรับอากาศรถยนต์ระหว่างกลุ่มที่เรียนด้วยชุดฝึกแบบโมดูลกับกลุ่มที่เรียนด้วยวิธีปกติ และ 4) ศึกษาความพึงพอใจของนักเรียนต่อการเรียนรู้ กลุ่มตัวอย่างคือนักเรียนประกาศนียบัตรวิชาชีพ ชั้นปีที่ 3 แผนกวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคเพชรบุรี ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2568 จำนวน 40 คน แบ่งเป็นกลุ่มทดลอง 20 คน และกลุ่มควบคุม 20 คน ซึ่งได้มาโดยการสุ่มกลุ่มเรียนด้วยเทคนิคการจับฉลาก เครื่องมือวิจัยมีชุดฝึกอบรมไฟฟ้าแบบโมดูล 4 ชุดการเรียนรู้ แผนการจัดการเรียนรู้เชิงรุก ใบงานปฏิบัติงาน แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน และแบบสอบถามความพึงพอใจ สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สถิติทดสอบทีแบบกลุ่มตัวอย่างสัมพันธ์กัน สถิติทดสอบทีแบบกลุ่มตัวอย่างที่เป็นอิสระจากกัน และการคำนวณขนาดอิทธิพล ผลการวิจัยพบว่า ชุดฝึกและชุดการสอนที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมตามความเห็นของผู้เชี่ยวชาญในระดับมากที่สุด ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.69 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.36 นวัตกรรมชุดฝึกมีประสิทธิภาพรวมเท่ากับ 79.25/82.00 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 75/75 ที่กำหนดไว้ กลุ่มทดลองมีคะแนนเฉลี่ยหลังเรียนเท่ากับ 16.40 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.35 ซึ่งสูงกว่าก่อนเรียนที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.15 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.42 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 โดยมีค่าสถิติทดสอบทีเท่ากับ 22.48 (df = 19, p < .001) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มพบว่า คะแนน

เฉลี่ยผลสัมฤทธิ์หลังเรียนของกลุ่มทดลองสูงกว่ากลุ่มควบคุมที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.10 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.62 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 โดยมีค่าสถิติทดสอบที่เท่ากับ 9.11 ($df = 38, p < .001$) และมีขนาดอิทธิพลของโคเฮนอยู่ในระดับสูงมาก Cohen's $d = 2.88, 95\% CI [2.05, 3.71]$ ส่วนความพึงพอใจของกลุ่มทดลองในภาพรวมทุกมิติมุมมองอยู่ในระดับมากที่สุด ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.74 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.30 นอกจากนี้การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ครุศาสตร์พบว่าชุดฝึกมีต้นทุนจัดสร้างต่ำเพียง 28,500 บาทต่อชุด ลดต้นทุนงบประมาณครุภัณฑ์ลงร้อยละ 76.25 มีอัตราส่วนต้นทุนประสิทธิผลต่ำเพียง 196.55 บาทต่อคะแนนพัฒนาการ และลดอัตราการขาดเรียนหรือทั้งการเรียนกลางคันเหลือร้อยละ 0.00 ช่วยเพิ่มโอกาสเข้าถึงเครื่องมือฝึกปฏิบัติการและประหยัดงบประมาณเชิงระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ชุดฝึกแบบโมดูล, ระบบไฟฟ้าปรับอากาศ, รถยนต์สันดาปภายใน, ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

Abstract: The objectives of this research were to: 1) develop a modular electrical system training kit for internal combustion engine vehicle air conditioning for vocational certificate students; 2) evaluate the appropriateness of the developed training kit; 3) compare student learning achievement in the automotive air conditioning course between the group taught using the modular training kit and the group taught via the conventional method; and 4) study student satisfaction with the learning process. The sample consisted of 40 third-year vocational certificate students from the Auto Mechanics Department at Phetchaburi Technical College during the first semester of the 2025 academic year, divided into an experimental group of 20 students and a control group of 20 students, obtained through cluster sampling via drawing lots. The research instruments comprised the modular electrical system training kit with four learning stations, active learning lesson plans, job sheets, a learning achievement test, and a satisfaction questionnaire. Statistics used for data analysis were percentage, mean, standard deviation, dependent samples t -test, independent samples t -test, and effect size calculation. The results revealed that the developed training kit and instructional packages possessed appropriateness at the highest level as rated by experts (Mean = 4.69, S.D. = 0.36). The training kit achieved an overall efficiency of 79.25/82.00, exceeding the pre-established 75/75 standard threshold. The experimental group obtained a post-test mean score of 16.40 (S.D. = 1.35), which was significantly higher than their pre-test mean score of 9.15 (S.D. = 1.42) at the .05 level ($t = 22.48, df = 19, p < .001$). Furthermore, the between-group comparison demonstrated that the post-test mean achievement score of the experimental group was significantly higher than that of the control group (Mean = 12.10, S.D. = 1.62) at the .05 level ($t = 9.11, df = 38, p < .001$), with a very large effect size (Cohen's $d = 2.88, 95\% CI [2.05, 3.71]$). Overall satisfaction of the experimental group across all dimensions was at the highest level (Mean = 4.74, S.D. = 0.30). Additionally, the educational economic evaluation indicated that the kit required a low fabrication cost of only 28,500 Baht per unit, reducing equipment procurement budget costs by 76.25%, with a cost-effectiveness ratio of 196.55 Baht per score gain, and reducing absenteeism and dropout rates to 0.00%, effectively enhancing access to practical training tools and systematically optimizing budget expenditure.

Keywords: Modular Training Kit, Air Conditioning Electrical System, Internal Combustion Engine Vehicle, Learning Achievement

1. บทนำ

อุตสาหกรรมยานยนต์นับเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งและมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วที่สุดในระบบเศรษฐกิจระดับโลก โดยทำหน้าที่เป็นฟันเฟืองหลักในการขับเคลื่อนนวัตกรรมทางเทคโนโลยี การสร้างอัตราการจ้างงานมหาศาล และการขยายตัวของการค้าในระดับสากล [1] ถึงแม้ว่าในปัจจุบันกระแสการพัฒนาเทคโนโลยีไฟฟ้าจะมีการเติบโตอย่างก้าวกระโดดภายใต้ต้นนโยบายการลดมลพิษ แต่จากข้อมูลเชิงสถิติจดทะเบียนยานยนต์สะสมของกรมการขนส่งทางบก (2568) พบว่า ยานยนต์ที่ใช้งานเครื่องยนต์สันดาปภายในยังคงมีสัดส่วนหลักเกินกว่าร้อยละ 85 ของปริมาณรถยนต์ทั้งหมดในประเทศไทย และคาดการณ์ว่าจะยังคงเป็นเทคโนโลยีที่มีความสำคัญต่อระบบคมนาคมขนส่งและบริการหลังการขายต่อไปอีกหลายทศวรรษ [2] สำหรับประเทศไทยซึ่งได้รับการยอมรับว่าเป็นศูนย์กลางการผลิตยานยนต์ระดับภูมิภาค ภาคอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนได้กลายเป็นแหล่งรายได้หลักของประเทศ ส่งผลให้ธุรกิจบริการหลังการขายและการซ่อมบำรุงมีความสำคัญอย่างยิ่งยวด โดยเฉพาะระบบปรับอากาศในยานยนต์ที่ปัจจุบันไม่ได้เป็นเพียงอุปกรณ์อำนวยความสะดวกสบายเท่านั้น แต่ยังเป็นมาตรฐานความปลอดภัยที่ช่วยลดความเมื่อยล้าสะสมและส่งเสริมสมรรถนะของผู้ขับขี่ในการควบคุมยานพาหนะท่ามกลางสภาพอากาศที่แปรปรวน [3]

ด้วยวิวัฒนาการของเทคโนโลยียานยนต์ที่ก้าวหน้าไปอย่างมาก ระบบปรับอากาศในปัจจุบันได้เปลี่ยนผ่านจากการทำงานเชิงกลเพียงอย่างเดียวไปสู่ระบบที่ควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิกส์และวงจรไฟฟ้าที่สลับซับซ้อน ส่งผลให้อุปสงค์สำหรับช่างเทคนิคยานยนต์ที่มีทักษะขั้นสูงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะผู้ที่มีความเชี่ยวชาญในการวิเคราะห์ระบบเซ็นเซอร์ หน่วยควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ขับเคลื่อนทำงานร่วมกันอย่างแม่นยำ [4], [5] อย่างไรก็ตาม การจัดการเรียนการสอนในระดับอาชีวศึกษาเพื่อผลิตช่างเทคนิคป้อนสู่ตลาดแรงงานยังคงเผชิญกับข้อจำกัดด้านสื่อการสอนที่ทันสมัย โดยเฉพาะนักเรียนระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพที่มักประสบปัญหาในการทำความเข้าใจการทำงานของ

กระแสไฟฟ้าและวงจรควบคุมที่เป็นนามธรรมเนื่องจากเป็นลักษณะทางกายภาพที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า การเรียนรู้ผ่านชุดฝึกแบบดั้งเดิมที่เข้าถึงยากหรือไม่สามารถแยกส่วนประกอบเพื่อทำความเข้าใจที่ละขั้นตอนได้นั้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเรียนรู้ลดลงอย่างชัดเจน [6]

นอกจากนี้ การทำความเข้าใจโครงข่ายระบบไฟฟ้าปรับอากาศที่มีความซับซ้อนยังสร้างภาระทางปัญญา (Cognitive Load) สูงแก่ผู้เรียน การประยุกต์ใช้ทฤษฎีภาระทางปัญญา (Cognitive Load Theory) โดยการย่อเนื้อหาและแยกระบบไฟฟ้าออกเป็น 4 ฐานโมดูลย่อยอิสระ จึงทำหน้าที่เป็นนั่งร้านทางปัญญา (Cognitive Scaffolding) ที่ช่วยลดภาระทางปัญญาที่ไม่จำเป็น และช่วยให้ผู้เรียนเกิดการสร้างแบบจำลองทางความคิด (Mental Model) เกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน

วิทยาลัยเทคนิคเพชรบุรีเป็นสถานศึกษาที่มีบทบาทสำคัญในการผลิตกำลังคนระดับวิชาชีพเพื่อป้อนเข้าสู่ภาคอุตสาหกรรมในภูมิภาคตะวันตก แต่แผนกวิชาช่างยนต์กลับเผชิญกับข้อจำกัดเชิงบริหารจัดการเนื่องจากมีจำนวนนักเรียนที่เข้าศึกษาต่อเป็นจำนวนมาก ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสัดส่วนระหว่างครูและผู้เรียน ทำให้การดูแลและถ่ายทอดทักษะรายบุคคลทำได้ไม่ทั่วถึง ซึ่งจากการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสภาพปัญหาและความพึงพอใจต่อการจัดการเรียนการสอนในรายวิชางานปรับอากาศรถยนต์พบว่า ด้านสื่อประกอบการเรียนการสอนมีค่าเฉลี่ยคะแนนต่ำที่สุดคือ 3.50 คะแนน ซึ่งจัดอยู่ในระดับปานกลางและสะท้อนให้เห็นว่าสื่อการสอนเดิมที่มีอยู่อาจไม่สามารถตอบสนองความเข้าใจของผู้เรียนในเนื้อหาที่มีความซับซ้อนได้ดีพอ [7]

แม้ว่าที่ผ่านมาจะมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาชุดฝึกงานปรับอากาศรถยนต์ เช่น งานวิจัยของ ศุภวัฒน์ ธรรมวงศ์ศรีเจริญวิทย์ และคณะ [7] ที่พัฒนาชุดฝึกเน้นเฉพาะส่วนคอมเพรสเซอร์แอร์ หรือ พัฒนพงศ์ พูนพงศ์สวัสดิพันธ์ และนราเดชะ คำภู [8] ที่พัฒนาชุดฝึกปรับอากาศรถยนต์แบบรวมระบบ แต่สื่อการสอนส่วนใหญ่ยังคงเป็นชุดฝึกระบบปิดที่ไม่สามารถแยกส่วนประกอบวงจรไฟฟ้าควบคุมออกมาศึกษาที่ละขั้นตอนได้ และยังขาดการติดตั้งระบบจำลอง

ข้อขัดข้องทางไฟฟ้าแบบแผนที่เปิดโอกาสให้ผู้เรียนฝึกใช้เครื่องมือวัดวิเคราะห์ปัญหาด้วยตนเอง ช่องว่างทางการวิจัยดังกล่าวจึงเป็นเหตุผลความจำเป็นที่ผู้วิจัยมุ่งพัฒนาชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศสทรณต์แบบโมดูลที่แยกโครงสร้างออกเป็น 4 ฐานอิสระ พร้อมระบบจำลองข้อขัดข้องทางไฟฟ้า เพื่อเป็นนวัตกรรมที่ช่วยยกระดับการจัดการเรียนรู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างการจัดวางอุปกรณ์จริงของนวัตกรรมชุดฝึกแบบโมดูลที่พัฒนาขึ้นนี้ได้ปรากฏรายละเอียดอย่างครบถ้วนดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ชุดฝึกระบบไฟฟ้าปรับอากาศสทรณต์แบบโมดูลที่พัฒนาขึ้น

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศสทรณต์แบบโมดูล สำหรับนักเรียนระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ ที่มีเนื้อหาสอดคล้องกับหลักสูตรและเทคโนโลยีปัจจุบัน

2.2 เพื่อประเมินคุณภาพและความเหมาะสมของชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศสทรณต์แบบโมดูลที่พัฒนาขึ้น

2.3 เพื่อเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เรื่องระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศสทรณต์ ของนักเรียนระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ ระหว่างกลุ่มที่เรียนโดยใช้ชุดฝึกแบบโมดูลที่พัฒนาขึ้นกับกลุ่มที่เรียนด้วยวิธีการสอนแบบปกติ

2.4 เพื่อศึกษาความพึงพอใจของนักเรียนระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ ที่มีต่อการเรียนรู้โดยใช้ชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศสทรณต์แบบโมดูลที่พัฒนาขึ้น

3. ขอบเขตการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยและพัฒนาเพื่อพิสูจน์ประสิทธิผลของนวัตกรรมสื่อการสอนวิชาชีพช่างยนต์ครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของการดำเนินงานครอบคลุมมิติต่าง ๆ เพื่อรักษาความตรงภายในและความเที่ยงตรงของการวิจัยเชิงทดลองอย่างเป็นระบบ [6], [8] โดยมีรายละเอียดจำแนกตามโครงสร้างระบบวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 ขอบเขตด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

3.1.1 ประชากรที่ใช้ในการวิจัย คือ นักเรียนที่กำลังศึกษาอยู่ในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ แผนกวิชาช่างยนต์ ที่ลงทะเบียนเรียนในรายวิชางานปรับอากาศสทรณต์ รหัสวิชา 20101-2105 ตามหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ พุทธศักราช 2567 ของสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา ในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2568 ณ วิทยาลัยเทคนิคเพชรบุรี

3.1.2 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย คือ นักเรียนระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ ชั้นปีที่ 3 แผนกวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคเพชรบุรี จำนวนรวมทั้งสิ้น 40 คน ซึ่งผู้วิจัยดำเนินการเลือกกลุ่มตัวอย่างโดยใช้ การสุ่มกลุ่มเรียนด้วยเทคนิคการจับฉลาก (Cluster Sampling) เพื่อจัดสรรสัดส่วนขนาดกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่มหลักในการทดลองเชิงเปรียบเทียบ [6] ได้แก่

3.1.2.1 กลุ่มทดลอง จำนวน 20 คน ซึ่งได้รับการจัดการเรียนรู้เชิงรุกร่วมกับการลงมือปฏิบัติงานจริงรายบุคคล ผ่านนวัตกรรมชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศสทรณต์แบบโมดูลที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น [8]

3.1.2.2 กลุ่มควบคุม จำนวน 20 คน ซึ่งได้รับการจัดการเรียนรู้ด้วยรูปแบบปกติและใช้ชุดฝึกปิดรูปแบบดั้งเดิมที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ [6]

3.2 ขอบเขตด้านเนื้อหา เนื้อหาที่ใช้ในการวิจัยและสร้างชุดฝึกปฏิบัติการ อ้างอิงจากหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ พุทธศักราช 2567 ประเภทวิชาอุตสาหกรรม สาขาวิชาช่างยนต์ ในรายวิชางานปรับอากาศสทรณต์ รหัสวิชา 20101-2105 ของสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา โดยผู้วิจัยได้จัดแบ่งโครงสร้างเนื้อหาออกเป็น

หน่วยการเรียนรู้ย่อยตามแนวคิดการจัดการเรียนรู้แบบโมดูล จำนวน 4 โมดูลหลัก ประกอบด้วย [11]

โมดูลที่ 1 การเรียนรู้วัสดุและอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์ มุ่งเน้นการจำแนกหน้าที่และตรวจสอบสภาพทางกายภาพของแบตเตอรี่ ฟิวส์ รีเลย์ สวิตช์ ควบคุม สวิตช์แรงดัน เทอร์โมสตัท และขดลวดคลัทช์ แม่เหล็ก [11]

โมดูลที่ 2 การเรียนรู้วงจรและการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์ มุ่งเน้นทักษะการอ่านผังวงจรไฟฟ้าและการต่อสายไฟแยกเส้นทางกระแสไฟฟ้าระหว่างวงจรกำลังและวงจรควบคุมผ่านรูเสียบนิรภัย [4]

โมดูลที่ 3 การวิเคราะห์ปัญหาและการตรวจสอบแก้ไขวงจรระบบปรับอากาศรถยนต์ มุ่งเน้นกระบวนการวิเคราะห์วินิจฉัยข้อขัดข้องแบบแฝงเชิงลึกในเงื่อนไขสถานการณ์จำลองวงจรขาด วงจรลัด และแรงดันตกคร่อมในระบบควบคุม [10]

โมดูลที่ 4 การบำรุงรักษาและการตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของระบบไฟฟ้า มุ่งเน้นทักษะการดูแลรักษาระบบไฟฟ้าเชิงป้องกันตามขั้นตอนมาตรฐาน การวัดระดับกระแสไฟฟ้าขณะโหลดทำงานจริง และการประเมินประสิทธิภาพพร้อมหลังซ่อมบำรุง [8]

3.3 ขอบเขตด้านตัวแปรที่ศึกษา การกำหนดตัวแปรในการวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างนวัตกรรมชุดฝึกที่พัฒนาขึ้นกับผลลัพธ์ทางการเรียนรู้ของผู้เรียน โดยจำแนกตัวแปรออกเป็น 2 ประเภทหลัก ดังนี้ [6]

3.3.1 ตัวแปรต้น (Independent Variable) คือ การจัดการเรียนการสอนโดยใช้ชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์แบบโมดูล ร่วมกับการจัดกิจกรรมการเรียนรู้เชิงรุก [6]

3.3.2 ตัวแปรตาม (Dependent Variables) คือ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นภายหลังการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ ครอบคลุมการวัดผลใน 3 มิติหลัก ได้แก่

3.3.2.1 ประสิทธิภาพของชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์แบบโมดูลตามเกณฑ์มาตรฐาน 75/75 (E_1/E_2)

3.3.2.2 ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ของผู้เรียนในรายวิชางานปรับอากาศรถยนต์ พิจารณาจากคะแนนพัฒนาการเฉลี่ยความรู้และทักษะช่างยนต์

3.3.2.3 ความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อการจัดการเรียนรู้โดยใช้ชุดฝึกระบบไฟฟ้าแบบโมดูล ครอบคลุมมิติด้านการออกแบบวิศวกรรม มิติด้านครุศาสตร์ และมิติคุณประโยชน์ต่อวิชาชีพ [8]

3.4 ขอบเขตด้านผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบเครื่องมือ ผู้วิจัยได้กำหนดกรอบในการคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อทำหน้าที่พิจารณาตรวจสอบและประเมินคุณภาพความเหมาะสมของเครื่องมือวิจัยจำนวนรวมทั้งสิ้น 5 ท่าน โดยจำแนกตามความเชี่ยวชาญเฉพาะทางออกเป็น 2 กลุ่มหลักดังนี้

3.4.1 ผู้เชี่ยวชาญด้านเนื้อหาและวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 3 ท่าน ทำหน้าที่ทวนสอบความถูกต้องของข้อมูลเชิงวิชาการ ผังวงจรไฟฟ้า และระบบการทำงานของชุดฝึกให้สอดคล้องกับเทคโนโลยียานยนต์ในปัจจุบัน

3.4.2 ผู้เชี่ยวชาญด้านสื่อและเทคโนโลยีการศึกษา จำนวน 2 ท่าน ทำหน้าที่ตรวจสอบรูปแบบการนำเสนอความเหมาะสมของโครงสร้างโมดูล และความสอดคล้องของคู่มือใบงานปฏิบัติงานอาชีวศึกษา [11]

3.5 ขอบเขตด้านพื้นที่และระยะเวลาดำเนินการ

3.5.1 พื้นที่ดำเนินการวิจัย ผู้วิจัยกำหนดพื้นที่ในการดำเนินการสร้างเครื่องมือและทดลองใช้ชุดฝึกปฏิบัติการ ณ แผนกวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคเพชรบุรี ซึ่งเป็นสถานศึกษาที่มีความพร้อมด้านอาคารสถานที่ และห้องปฏิบัติการงานปรับอากาศรถยนต์มาตรฐาน [7]

3.5.2 ระยะเวลาดำเนินการวิจัย ผู้วิจัยกำหนดกรอบเวลาในการดำเนินงานวิจัยรวมทั้งสิ้น 6 เดือน โดยเริ่มต้นตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2568 ถึงวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ. 2568 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ครอบคลุมการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ ใน ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2568 [7]

4. วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์แบบโมดูลสำหรับนักเรียน ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ

ผู้วิจัยได้กำหนดโครงสร้างระเบียบวิธีดำเนินการวิจัยในลักษณะการวิจัยและพัฒนา (Research and Development) บูรณาการร่วมกับการทดลองภาคสนามในชั้นเรียนจริงตามแบบแผนการวิจัยกึ่งทดลอง (Quasi-Experimental Design) ที่มีกลุ่มควบคุมและมีการทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน (Pretest-Posttest Control Group Design) เพื่อมุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพของนวัตกรรมและเปรียบเทียบพัฒนาการความรู้ความสามารถของผู้เรียนอย่างเป็นระบบวิชาการ [6] โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

4.1 แบบแผนการวิจัย ผู้วิจัยได้กำหนดแผนผังเชิงสัญลักษณ์ของแบบแผนการวิจัยเพื่อควบคุมตัวแปรและลดความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติไว้ในลักษณะโครงสร้างการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุม [6] ซึ่งมีสัญลักษณ์การกระทำทางการศึกษาดังนี้

4.1.1 กลุ่มทดลอง ดำเนินการทดสอบก่อนเรียน (O_1) ให้สิ่งจัดการกระทำทางการศึกษาด้วยการจัดการเรียนรู้เชิงรุกร่วมกับชุดฝึกระบบไฟฟ้าแบบโมดูล (X) และทำการทดสอบหลังเรียนร่วมกับการประเมินความพึงพอใจ (O_2)

4.1.2 กลุ่มควบคุม ดำเนินการทดสอบก่อนเรียน (O_1) จัดการเรียนรู้ด้วยรูปแบบปกติ (Traditional Instruction) โดยเน้นการบรรยาย สาธิต และใช้ชุดฝึกระบบปิดรูปแบบดั้งเดิมเป็นเวลา 16 ชั่วโมงเท่ากัน โดยครูผู้สอนคนเดียวกัน และทำการทดสอบหลังเรียนด้วยแบบทดสอบฉบับเดียวกับก่อนเรียนที่มีการสลับข้อและสลับตัวเลือก (O_2)

4.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

4.2.1 ประชากร คือ นักเรียน หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) ที่ลงทะเบียนเรียนในรายวิชางานปรับอากาศรถยนต์ รหัสวิชา 2101-2105 ในภาคเรียนที่ 1 ประจำปี การศึกษา 2568 แผนกวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคเพชรบุรี สังกัดสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา จำนวนทั้งสิ้น 40 คน

4.2.2 กลุ่มตัวอย่าง คือ นักเรียนหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ ชั้นปีที่ 3 แผนกวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคเพชรบุรี ที่ลงทะเบียนเรียนในรายวิชานี้จำนวนรวมทั้งสิ้น 40 คน ซึ่งผู้วิจัยดำเนินการสุ่มกลุ่มเรียนด้วย

เทคนิคการจับฉลาก (Cluster Sampling) เพื่อจัดสรรนักเรียนออกเป็น 2 กลุ่มเรียนหลักอย่างเท่าเทียมเชิงสถิติวิจัย แบ่งเป็นกลุ่มทดลองจำนวน 20 คน และกลุ่มควบคุมจำนวน 20 คน

4.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ผู้วิจัยได้จำแนกโครงสร้างของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยออกเป็น 2 ประเภทหลัก เพื่อรองรับการจัดกระทำและการเก็บบันทึกข้อมูลเชิงปริมาณอย่างเที่ยงตรง ดังนี้

4.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการจัดกระทำทางการศึกษา ประกอบด้วย

4.3.1.1 นวัตกรรมชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์แบบโมดูล ซึ่งจัดแบ่งออกเป็น 4 ฐานการเรียนรู้ย่อย ได้แก่ โมดูลที่ 1 การเรียนรู้วัสดุและอุปกรณ์ (จัดวางชิ้นส่วนจริง เช่น รีเลย์ ฟิวส์ สวิตช์แรงดัน เทอร์โมสตัท คลัตช์ แม่เหล็ก) โมดูลที่ 2 การเรียนรู้วงจรและการเชื่อมต่อ (ติดตั้งขั้วต่อสายไฟนิรภัย Banana Safety Jack แยกวงจรกำลังและวงจรควบคุม) โมดูลที่ 3 การวิเคราะห์ปัญหาและการตรวจสอบ (ติดตั้งบอร์ดสวิตช์จำลองสถานะข้อขัดข้องแบบแฝง เช่น วงจรขาด วงจรลัด ความต้านทานสูง) และโมดูลที่ 4 การบำรุงรักษาและการตรวจสอบสมรรถนะ (ติดตั้งจุดวัดกระแสและแรงดันน้ำยาแอร์)

4.3.1.2 สื่อสิ่งพิมพ์สนับสนุนการเรียนรู้ ได้แก่ แผนการจัดการเรียนรู้เชิงรุกจำนวน 4 แผนการสอน ระยะเวลา รวม 16 ชั่วโมง และคู่มือพร้อมใบงานปฏิบัติงานที่มีโครงสร้าง 8 ส่วนหลัก (ประกอบด้วย ชื่อเรื่อง วัตถุประสงค์ ทฤษฎีเบื้องต้น เครื่องมืออุปกรณ์ ลำดับขั้นตอนปฏิบัติ ตารางบันทึกผล คำถามทบทวน และสรุปผล)

4.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ประกอบด้วยแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชางานปรับอากาศรถยนต์ เป็นข้อสอบปรนัยชนิดเลือกตอบ 5 ตัวเลือก จำนวน 20 ข้อคำถาม และแบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อนวัตกรรมชุดฝึก เป็นเครื่องมือวัดมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ตามระเบียบวิธีของลิเคิร์ต จำนวน 15 ข้อคำถาม

4.4 การสร้างและการหาคุณภาพเครื่องมือ กระบวนการสร้างและทวนสอบคุณภาพของนวัตกรรมและเครื่องมือวัดผล

ทางการศึกษา มีลำดับขั้นตอนการดำเนินงานในลักษณะสี่ระยะ (Four-Phase Research Paradigm) ดังนี้ [6]

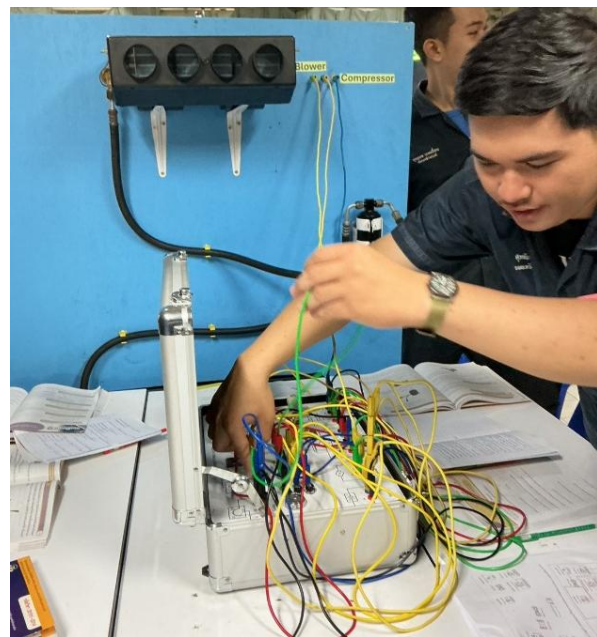
4.4.1 ระยะที่ 1 การศึกษา วิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐาน (Research: R1) ดำเนินการวิเคราะห์หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ พุทธศักราช 2567 และสำรวจความต้องการจำเป็นของสถานประกอบการยานยนต์ เพื่อนำข้อมูลมาสังเคราะห์จัดแบ่งฐานการเรียนรู้ย่อยและออกแบบผังวงจรไฟฟ้าประจำชุดฝึก

4.4.2 ระยะที่ 2 การออกแบบ พัฒนา และจัดสร้าง (Development: D1) ดำเนินการขึ้นรูปแผงสวิตช์เชิงกายภาพ และจัดทำสื่อสิ่งพิมพ์สนับสนุน จากนั้นนำเครื่องมือทั้งหมดเสนอต่อคณะผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน เพื่อประเมินความเหมาะสมและตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา โดยคัดเลือกเครื่องมือที่มีค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) ตั้งแต่ 0.50 ขึ้นไปมาใช้งาน

4.4.3 ระยะที่ 3 การทดลองใช้และเก็บรวบรวมข้อมูล (Research: R2) นำเครื่องมือที่ผ่านการปรับปรุงแก้ไขไปทำการทดลองใช้ขั้นต้น (Try-out) กับนักเรียนระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ ชั้นปีที่ 3 แผนกวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคราชบุรี จำนวน 30 คน (ซึ่งไม่ใช่กลุ่มประชากรและกลุ่มตัวอย่างของการวิจัย) เพื่อวิเคราะห์คุณภาพรายข้อ ซึ่งพบว่าแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์มีค่าความยากง่าย (p) อยู่ระหว่าง 0.30 ถึง 0.75 ค่าอำนาจจำแนก (r) อยู่ระหว่าง 0.35 ถึง 0.70 และมีค่าความเชื่อมั่นรวมทั้งฉบับด้วยสูตร KR-20 เท่ากับ 0.88 ส่วนแบบสอบถามความพึงพอใจมีค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค เท่ากับ 0.92 จากนั้นจึงนำไปใช้จริงกับกลุ่มตัวอย่างในชั้นเรียนเพื่อบันทึกคะแนนระหว่างเรียน (E_1) และคะแนนหลังเรียน (O_2)



ภาพที่ 3 การทดลองฝึกระบบไฟฟ้าควบคุมที่พัฒนาขึ้นของนักศึกษาแต่ละโมดูล



ภาพที่ 4 การฝึกตามใบงานของแต่ละโมดูล

4.4.4 ระยะที่ 4 การวิเคราะห์ประมวลผลสัมฤทธิ์ (Development: D2) นำคลังข้อมูลคะแนนดิบมาประมวลผลทางสถิติด้วย โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS Version 28 เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพนวัตกรรมตามเกณฑ์มาตรฐาน อาชีวศึกษา 75/75 ทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ด้วยสถิติทดสอบทีแบบกลุ่มตัวอย่างสัมพันธ์กัน (Dependent Samples t-test) สถิติทดสอบทีแบบกลุ่มตัวอย่างที่เป็นอิสระ

จากกัน (Independent Samples t-test) การคำนวณขนาด

คัมค่าพารามิเตอร์ทางเศรษฐศาสตร์ศาสตร์

อิทธิพลของโคเฮน (Cohen's d) รวมถึงวิเคราะห์มิติความ

ตารางที่ 1 กรอบโครงสร้างการวิเคราะห์และสูตรสถิติที่ใช้ตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือวิจัย

ประเภทเครื่องมือวิจัย	พารามิเตอร์และมิติที่มุ่งวัดผล	สูตรสถิติที่ประยุกต์ใช้	เกณฑ์การยอมรับคุณภาพเชิงวิชาการ
ชุดฝึกและคู่มือใบงาน ปฏิบัติงาน	ความตรงเชิงเนื้อหาและ สถาปัตยกรรมโครงสร้างวิศวกรรม	$IOC = \frac{\sum R}{N}$	ค่าดัชนีความสอดคล้องรายข้อต้อง $IOC \geq 0.50$
แบบทดสอบวัด ผลสัมฤทธิ์ (รายข้อ)	ค่าความยากง่ายและค่าอำนาจ จำแนกแยกแยะพฤติกรรม	$p = \frac{R_U + R_L}{2n}$ $r = \frac{R_U - R_L}{n}$	ค่าความยากง่าย $0.20 \leq p \leq 0.80$ และ ค่าอำนาจจำแนก $r \geq 0.20$
แบบทดสอบวัด ผลสัมฤทธิ์ (ฉบับรวม)	ความคงเส้นคงวภายในและความ เชื่อมั่นของแบบทดสอบ	$r_{tt} = \frac{k}{k-1} \left[1 - \frac{\sum pq}{S_t^2} \right]$	ค่าดัชนีสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น รวมทั้งฉบับ $r_{tt} \geq 0.70$
แบบสอบถามความพึง พอใจ	ความสอดคล้องภายในและความ เสถียรของเครื่องมือวัดเจตคติ	$\alpha = \frac{k}{k-1} \left[1 - \frac{\sum S_i^2}{S_t^2} \right]$	ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นเฉลี่ย รวมทั้งฉบับ $\alpha \geq 0.70$

5. ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณและสถิติทดสอบจากการดำเนินงานวิจัยและพัฒนาชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์ แบบโมดูลสำหรับนักเรียนระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สามารถสรุปข้อค้นพบสำคัญเพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์การวิจัยได้ดังนี้

5.1 ผลการประเมินคุณภาพและความเหมาะสมของชุดฝึก การประเมินคุณภาพและความเหมาะสมของชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์แบบโมดูลและชุดการสอนโดยคณะผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน พบว่ามีระดับคุณภาพความเหมาะสมในภาพรวมทุกมิติมีมุมมองคำนวณได้ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์รวมอยู่ในเกณฑ์ระดับมากที่สุด รายละเอียดข้อมูลความสัมพันธ์แสดงชัดเจนดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการประเมินคุณภาพและความเหมาะสมของชุดฝึกระบบไฟฟ้าแบบโมดูลโดยผู้เชี่ยวชาญ

รายการประเมินคุณภาพ นวัตกรรมชุดฝึก	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ระดับความ เหมาะสม
1. มิติด้านสถาปัตยกรรม วิศวกรรมไฟฟ้าและ เครื่องกล	4.7	0.38	มากที่สุด
2. มิติด้านครุศาสตร์และการ จัดการเรียนรู้เชิงรุก	4.7	0.38	มากที่สุด

รายการประเมินคุณภาพ นวัตกรรมชุดฝึก	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ระดับความ เหมาะสม
3. มิติด้านมาตรฐานความ ปลอดภัยในการปฏิบัติงาน	4.67	0.37	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวมทุกมิติ	4.69	0.36	มากที่สุด

จากตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลระบุว่า คณะผู้เชี่ยวชาญให้การยอมรับและประเมินคุณภาพความเหมาะสมของชุดฝึกโดยรวมเฉลี่ยทุกมิติเท่ากับ 4.69 จัดอยู่ในเกณฑ์ระดับมากที่สุด โดยมีมิติด้านการออกแบบเชิงวิศวกรรมและมิติด้านครุศาสตร์ได้รับคะแนนประเมินสูงสุดเนื่องจากโครงสร้างโมดูลย่อยสามารถลดภาระทางปัญญาและช่วยเปลี่ยนผ่านเนื้อหาในระบบไฟฟ้าที่เป็นนามธรรมให้ผู้เรียนเข้าใจได้ง่ายขึ้น

5.2 ผลการหาประสิทธิภาพของชุดฝึกตามเกณฑ์มาตรฐาน 75/75 การทดสอบภาคสนามเพื่อหาดัชนีประสิทธิภาพของชุดฝึกระบบไฟฟ้าแบบโมดูลในสภาวะชั้นเรียนจริงกับกลุ่มทดลองจำนวน 20 คน ปรากฏผลการวิเคราะห์คะแนนประสิทธิภาพของกระบวนการระหว่างเรียนและประสิทธิภาพของผลลัพธ์หลังเรียนสรุปตัวเลขแสดงชัดเจนดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ดัชนีประสิทธิภาพของชุดฝึกระบบไฟฟ้าแบบโมดูลตามเกณฑ์มาตรฐาน 75/75

ดัชนีประสิทธิภาพนวัตกรรม	คะแนนเต็ม	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ร้อยละประสิทธิภาพ	เกณฑ์มาตรฐาน	ผลการเปรียบเทียบเกณฑ์
ประสิทธิภาพกระบวนการ (E1)	100	79.25	3.82	79.25	75	สูงกว่าเกณฑ์
ประสิทธิภาพผลลัพธ์ (E2)	20	16.40	6.75%	82.00	75	สูงกว่าเกณฑ์
สรุปดัชนีประสิทธิภาพรวม (E1/E2)	-	-	-	79.25/82.00	75/75	สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า นวัตกรรมชุดฝึกระบบไฟฟ้าควบคุมที่พัฒนาขึ้นมีดัชนีประสิทธิภาพรวมเท่ากับ 79.25/82.00 ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานความสำเร็จทางอาชีวศึกษาระดับ 75/75 ที่ตั้งไว้ในสมมติฐานการวิจัยอย่างเด่นชัด ค่าประสิทธิภาพระหว่างเรียนที่สูงสะท้อนถึงการออกแบบใบงานปฏิบัติงานโครงสร้าง 8 ส่วนหลักที่มีลำดับขั้นตอนเหมาะสมต่อการเรียนรู้เชิงรุก

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนระหว่างกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุม

กลุ่มตัวอย่าง	จำนวนนักเรียน (คน)	คะแนนเต็ม	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ผลต่างค่าเฉลี่ย	t	df	p-value
กลุ่มทดลอง	20	20	16.40	1.35	4.30	9.11	38	<0.001
					[3.34, 5.26]			
กลุ่มควบคุม	20	20	12.10	1.62				

จากตารางที่ 4 คะแนนเฉลี่ยผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนของนักเรียน กลุ่มทดลองเท่ากับ 16.40 คะแนน มีความสูงกว่าคะแนนเฉลี่ยหลังเรียนของนักเรียนกลุ่มควบคุมที่ทำคะแนนได้เพียง 12.10 คะแนน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 โดยมีค่าสถิติทดสอบ t เท่ากับ 9.11 (df = 38, p < .001) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความก้าวหน้าภายในกลุ่มทดลองพบว่าคะแนนหลังเรียนเพิ่มขึ้นจากก่อนเรียนที่มีค่าเฉลี่ยเพียง 9.15 คะแนน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 เช่นเดียวกัน (t = 22.48, df = 19, p < .001) ข้อมูลนี้ยืนยันขีดความสามารถของบอร์ดจำลองสภาวะข้อขัดข้องแบบแฝงในการพัฒนาทักษะการคิดวิเคราะห์เชิงวินิจฉัยปัญหาของผู้เรียนได้อย่างมีนัยสำคัญ

5.4 ผลการศึกษาความพึงพอใจและการยอมรับเทคโนโลยีของผู้เรียน การวิเคราะห์ระดับความพึงพอใจของนักเรียนกลุ่มทดลองที่มีต่อการจัดกิจกรรมการเรียนรู้เชิงรุก

5.3 ผลการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชางานปรับอากาศรถยนต์ การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชางานปรับอากาศรถยนต์เพื่อประเมินระดับความก้าวหน้าทางการเรียนรู้ระหว่างกลุ่มทดลองที่เรียนด้วยชุดฝึกแบบโมดูลกับกลุ่มควบคุมที่เรียนด้วยวิธีการสอนแบบปกติผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติปรากฏรายละเอียดดังตารางที่ 4

ร่วมกับนวัตกรรมชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์แบบโมดูลผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ประเมินค่าน้ำหนักความพึงพอใจเชิงพฤติกรรมสะท้อนรายละเอียดข้อมูลจำแนกตามมิติการเรียนรู้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ระดับความพึงพอใจของนักเรียนที่มีต่อนวัตกรรมชุดฝึกระบบไฟฟ้าแบบโมดูล

รายการประเมินความพึงพอใจของผู้เรียน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับความพึงพอใจ
1. มิติด้านสถาปัตยกรรมการออกแบบเชิงวิศวกรรม	4.76	0.32	มากที่สุด
2. มิติด้านการประยุกต์ใช้ทางครุศาสตร์และนวัตกรรม	4.72	0.33	มากที่สุด
3. มิติด้านคุณประโยชน์และความคุ้มค่าต่อวิชาชีพทางเทคนิค	4.75	0.31	มากที่สุด

รายการประเมินความพึงพอใจของผู้เรียน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับความพึงพอใจ
ค่าเฉลี่ยรวมทุกมิติความพึงพอใจ	4.74	0.3	มากที่สุด

จากตารางที่ 5 ระดับความพึงพอใจในภาพรวมรวมทุกมิติมุมมองของนักเรียน เท่ากับ 4.74 จัดอยู่ในเกณฑ์ระดับความพึงพอใจมากที่สุด โดยมีมิติด้านการออกแบบเชิงวิศวกรรมได้รับคะแนนสูงสุดเนื่องจากการติดตั้งระบบชั่วคราวสายไฟนิรภัยและระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าปลอดภัยช่วยลดความกังวลและส่งเสริมความมั่นใจในการปฏิบัติงานช่างเทคนิครายบุคคลส่งผลให้เกิดเจตคติวิชาชีพเชิงบวก และ

ตารางที่ 6 ผลการทดลองเชิงสถิติและดัชนีประสิทธิผลของนวัตกรรมชุดฝึกระบบไฟฟ้าแบบโมดูล

ตัวชี้วัดสมรรถนะการเรียนรู้และการยอมรับนวัตกรรม	กลุ่มควบคุม (Mean ± SD)	กลุ่มทดลอง (Mean ± SD)	สถิติทดสอบ	ค่า p	เกณฑ์เปรียบเทียบ / ขนาดอิทธิพล
1. คะแนนการประเมินคุณภาพความเหมาะสมโดยผู้เชี่ยวชาญ (1-5)	-	4.69 ± 0.36	-	-	มากที่สุด (ผ่านเกณฑ์ ≥ 3.50)
2. ประสิทธิภาพของกระบวนการเรียนรู้ระหว่างเรียน (E ₁)	-	79.25 ± 3.82	-	-	สูงกว่าเกณฑ์ มาตรฐาน 75
3. ประสิทธิภาพของผลลัพธ์ทางการศึกษาหลังเรียน (E ₂)	-	82.00 ± 6.75	-	-	สูงกว่าเกณฑ์ มาตรฐาน 75
4. คะแนนผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียน (0-20 คะแนน)	9.10 ± 1.52	9.15 ± 1.42	$t = 0.11$ (df=38)	0.912	มีความเท่าเทียมกัน ก่อนการทดลอง
5. คะแนนผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียน (0-20 คะแนน)	12.10 ± 1.62	16.40 ± 1.35	$t = 9.11$ (df=38)	<0.001	แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ .05 [Cohen's d = 2.88, 95% CI [2.05, 3.71]]
6. พัฒนาการความรู้ที่เพิ่มขึ้นภายในกลุ่มทดลอง (ΔX)	-	7.25 ± 1.442	$t = 22.48$ (df=19)	<0.001	เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ .05
7. คะแนนระดับความพึงพอใจและเจตคติต่อการเรียนรู้ (1-5)	-	4.74 ± 0.30	-	-	มากที่สุด (ผ่านเกณฑ์ ≥ 3.50)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติในตารางที่ 6 สามารถประเมินประสิทธิผลแยกตามวัตถุประสงค์การวิจัยได้ดังนี้

1) ผลการพัฒนาและประเมินคุณภาพนวัตกรรมคณะผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน มีความคิดเห็นสอดคล้องเป็นเอกฉันท์ว่าชุดฝึกแบบโมดูลมีความเหมาะสมในระดับมาก

ยกระดับการยอมรับเทคโนโลยีของผู้เรียน

5.5 การวิเคราะห์และประเมินผลสัมฤทธิ์เชิงปริมาณและสถิติทดสอบ จากการทดลองใช้งานชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์แบบโมดูลสำหรับนักเรียนระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ ชั้นปีที่ 3 แผนกวิชาช่างยนต์วิทยาลัยเทคนิคเพชรบุรี ประจำภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2568 จำนวน 40 คน ได้รับการจัดระเบียบโครงสร้างข้อมูลเชิงตัวเลขเพื่อแสดงผลลัพธ์การเรียนรู้และการยอมรับนวัตกรรมตามแนวทางของวารสารวิชาการอย่างเป็นระบบ โดยมีข้อค้นพบเชิงประจักษ์สรุปจำแนกตามโครงสร้างดัชนีสถิติทดสอบดังแสดงในตารางที่ 6

ที่สุดด้วยคะแนนเฉลี่ยรวม 4.69 โดยเครื่องมือวัดผลทุกฉบับผ่านเกณฑ์ความตรงเชิงเนื้อหาด้วยค่าดัชนีความสอดคล้องอยู่ระหว่าง 0.60 ถึง 1.00 อย่างสมบูรณ์

2) ผลการหาประสิทธิภาพตามเกณฑ์อาชีวศึกษาด้านประสิทธิภาพรวมของชุดฝึกและชุดการสอนคำนวณค่าได้เท่ากับ 79.25/82.00 ซึ่งมีมูลค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

ความสำเร็จทางอาชีพศึกษาระดับ 75/75 ที่กำหนดไว้ใน
สมมติฐานการวิจัยเชิงระบบ

3) ผลการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน
คะแนนเฉลี่ยหลังเรียนของนักเรียนกลุ่มทดลองที่เรียนด้วย
ชุดฝึกแบบโมดูลมีค่าเท่ากับ 16.40 คะแนน สูงกว่ากลุ่ม
ควบคุมที่เรียนด้วยวิธีปกติอย่างชัดเจนเชิงสถิติด้วยค่าสถิติ
ทดสอบ t เท่ากับ 9.11 ($df = 38, p < .001$) และมีขนาด
อิทธิพลของโคเฮนเท่ากับ 2.88 (Cohen's $d = 2.88, 95\%$
 $CI [2.05, 3.71]$) ซึ่งจัดอยู่ในระดับสูงมาก บรรลุตาม
สมมติฐานการวิจัยที่ตั้งไว้

4) ผลการประเมินเจตคติและความพึงพอใจของ

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนและอัตราส่วนต้นทุนประสิทธิผล (Cost-Effectiveness Ratio: CER)

รายการพารามิเตอร์การวิเคราะห์ ทางเศรษฐศาสตร์ครุศาสตร์	ชุดฝึกสำเร็จรูปทางการค้า ในท้องตลาด	ชุดฝึกระบบไฟฟ้าแบบ โมดูลที่พัฒนาขึ้น	ผลต่างการประหยัด / ประสิทธิภาพที่ เกิดขึ้น
1. ต้นทุนงบประมาณการจัดสร้าง/จัดหาต่อ ชุด	120,000 บาท	28,500 บาท	ประหยัดงบประมาณลง 76.25% (91,500 บาท/ชุด)
2. ต้นทุนการจัดหาต่อผู้เรียน 1 คน (N=20)	6,000 บาท/คน	1,425 บาท/คน	ลดต้นทุนการผลิตกำลังคนลง 76.25%
3. พัฒนาการคะแนนเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น ($\Delta X = \text{Post} - \text{Pre}$)	2.95 คะแนน (กลุ่มควบคุม)	7.25 คะแนน (กลุ่มทดลอง)	พัฒนาความรู้เพิ่มขึ้น 145.76%
4. อัตราส่วนต้นทุนประสิทธิผล ($\text{CER} = \text{Cost} / \Delta X$)	2,033.90 บาท/คะแนน	196.55 บาท/คะแนน	ต้นทุนต่อการได้มา 1 คะแนนถูกลง 90.33%
5. อัตราการขาดเรียน/ทิ้งการเรียนกลางคัน ของนักศึกษา	10.00%	0.00%	ลดอัตราการทิ้งการเรียนลงเหลือ 0.00%

จากตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ทาง
เศรษฐศาสตร์ครุศาสตร์พบว่า ชุดฝึกระบบไฟฟ้าแบบโมดูล
ที่พัฒนาขึ้น มีต้นทุนวัสดุจัดสร้างจริงเพียง 28,500 บาทต่อ
ชุด สามารถลดต้นทุนงบประมาณจัดซื้อครุภัณฑ์ลงได้ร้อยละ
76.25 เมื่อเทียบกับชุดฝึกสำเร็จรูปทางการค้า (120,000
บาท) มีอัตราส่วนต้นทุนประสิทธิผล (Cost-Effectiveness
Ratio: CER) ต่ำเพียง 196.55 บาทต่อคะแนนพัฒนาการ
ความรู้ที่เพิ่มขึ้น 1 คะแนน และสามารถลดอัตราการขาด
เรียนหรือทิ้งการเรียนกลางคันของผู้เรียนเหลือร้อยละ 0.00

ผู้เรียนในกลุ่มทดลองมีความพึงพอใจต่อการจัดกิจกรรมการ
เรียนรู้เชิงรุกร่วมกับชุดฝึกแบบโมดูลในภาพรวมอยู่ในระดับ
มากที่สุดเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.74 เนื่องจากตัวนวัตกรรมเปิด
โอกาสให้ลงมือปฏิบัติงานตรวจสอบได้ด้วยตนเองรายบุคคล
อย่างมั่นใจ

5.6 ผลการวิเคราะห์และประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์

ครุศาสตร์ การประเมินความคุ้มค่าเชิงงบประมาณและ
ประสิทธิผลทางการศึกษาของการจัดสร้างนวัตกรรม
ชุดฝึกระบบไฟฟ้าปรับอากาศรถยนต์แบบโมดูล เมื่อ
เปรียบเทียบกับชุดฝึกสำเร็จรูปทางการค้าในท้องตลาด
ปรากฏผลการวิเคราะห์ดังแสดงใน ตารางที่ 7

ช่วยเพิ่มโอกาสเข้าถึงเครื่องมือฝึกปฏิบัติการรายบุคคลและ
ประหยัดงบประมาณเชิงระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

6. สรุปและอภิปรายผล

6.1 สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย จากการวิจัยและ
พัฒนาชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์แบบโมดูล
สำหรับนักเรียนระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สามารถ
สรุปผลการดำเนินงานแยกตามวัตถุประสงค์การวิจัยได้ดังนี้

6.1.1 ประสิทธิภาพของการพัฒนาชุดฝึกและการลด
ภาระทางปัญญาในการเรียนรู้ การออกแบบและพัฒนา
ชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์ แบบโมดูล

4 ฐานการเรียนรู้ย่อย มีคุณภาพความเหมาะสมจากผู้เชี่ยวชาญอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.69$, S.D. = 0.36) และมีดัชนีประสิทธิภาพรวม (E_1/E_2) เท่ากับ 79.25/82.00 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ 75/75 ที่ตั้งไว้ ผลดังกล่าวอธิบายได้ด้วยทฤษฎีภาระทางปัญญา (Cognitive Load Theory) ที่การย่อยระบบออกเป็น 4 ฐานช่วยลดภาระทางปัญญาที่ไม่เกี่ยวข้องลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ ศุภวัฒน์ ธรรมวงศ์ ศรีเจริญวิญญู และคณะ [7] และรายงานของ วิทยาลัยเทคนิคบางสะพาน [9] อย่างไรก็ตาม คำอธิบายทางเลือก (Alternative Explanation) ของประสิทธิผลที่สูงอาจไม่ได้เกิดจากสถาปัตยกรรมโมดูลเพียงอย่างเดียว อาจเกิดจากคุณลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์จริงเกรดอุตสาหกรรม ยานยนต์ที่ช่วยกระตุ้นการรับรู้เชิงสัมผัส ตลอดจนข้อต่อสายไฟระบบเสียบนิรภัยที่ช่วยลดความกลัวอุบัติเหตุของผู้เรียน ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพกระบวนการเรียนรู้ระหว่างเรียนสูงขึ้น

6.1.2 ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ขนาดอิทธิพล และการพัฒนาทักษะทางสติปัญญา นักเรียนกลุ่มทดลองที่เรียนด้วยชุดฝึกแบบโมดูลมีคะแนนเฉลี่ยหลังเรียน (16.40) สูงกว่าก่อนเรียน (9.15) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t = 22.48$, $df = 19$, $p < .001$) และมีคะแนนเฉลี่ยหลังเรียนสูงกว่ากลุ่มควบคุมที่เรียนด้วยวิธีปกติ (12.10) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t = 9.11$, $df = 38$, $p < .001$) โดยมีขนาดอิทธิพลของโคเฮนเท่ากับ $d = 2.88$ (95% CI [2.05, 3.71]) ซึ่งจัดอยู่ในระดับสูงมาก ขนาดอิทธิพลที่สูงมากนี้เมื่อพิจารณาคำอธิบายทางเลือก (Alternative Explanation) อย่างตรงไปตรงมา อาจเกิดจาก 1) ความสอดคล้องเชิงเนื้อหาอย่างใกล้ชิดระหว่างใบงานปฏิบัติงาน 8 ส่วนกับข้อสอบวัดผลสัมฤทธิ์หลังเรียน 2) ผลกระทบจากการทำแบบทดสอบฉบับเดียวกันก่อนและหลังเรียน (Testing Effect) และ 3) ความตั้งใจกระตือรือร้นของผู้สอนในการจัดกิจกรรมเชิงรุก ทั้งนี้ข้อสรุปผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนในงานวิจัยนี้จำกัดเฉพาะความรู้เชิงประกาศ (Declarative Knowledge) และตรรกะการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าที่วัดผ่านแบบทดสอบปรนัยและใบงานเท่านั้น ไม่ได้ครอบคลุมไปถึงสมรรถนะทักษะพิสัย

ภาคปฏิบัติจริงในสถานประกอบการซึ่งยังต้องการการวัดผลด้วยเกณฑ์การปฏิบัติเฉพาะเพิ่มเติม สอดคล้องกับงานวิจัยของ โมฮัมหมัด ซาฟิเอก และคณะ [6] พัฒนพงศ์ พูนพงศ์ สวาสดีพันธ์ และ นราเดชะ คำภู [11] และ เครือข่ายวิจัยนักศึกษาอาชีวศึกษา [10]

6.1.3 ความพึงพอใจและประสิทธิผลทางเศรษฐศาสตร์ **ครูศาสตร์** นักเรียนกลุ่มทดลองมีความพึงพอใจต่อการเรียนรู้ในภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.74$, S.D. = 0.30) ควบคู่กับต้นทุนจัดสร้าง 28,500 บาทต่อชุด และมีอัตราส่วนต้นทุนประสิทธิผล (CER) เท่ากับ 196.55 บาทต่อคะแนนพัฒนาการ ความพึงพอใจที่สูงและอัตราการขาดเรียนที่ลดลงเหลือร้อยละ 0.00 อธิบายได้จากความสะดวกปลอดภัยของระบบข้อต่อ Banana Safety Jack ที่ช่วยให้ผู้เรียนกล้าทดลองต่อวงจร และการลดอัตราส่วนผู้เรียนเหลือ 2-3 คนต่อชุดฝึกที่เปิดโอกาสให้ทุกคนได้ลงมือปฏิบัติจริงรายบุคคล สอดคล้องกับแนวความคิดการจัดสอนเทคโนโลยียานยนต์ของ เอกราช ไชยเพ็ญ และคณะ [8] พรเทพ จัมปานรินทร์ และ อภิสิทธิ์ เกษศรีสม [1] สถาบันพลังงานระหว่างประเทศ [2] SAE International [3] สตีเวน เดลี [4] และ ชลยุทธ ยมดอย [5]

6.1.4 ด้านการศึกษาความพึงพอใจต่อการเรียนรู้ของผู้เรียน ผลการศึกษาความพึงพอใจของนักเรียนระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ ที่มีต่อการเรียนรู้โดยใช้ชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์สันดาปภายในแบบโมดูลที่พัฒนาขึ้น พบว่านักเรียนกลุ่มทดลองมีความพึงพอใจในภาพรวมทุกมิติมุมมองอยู่ในระดับมากที่สุดค่าเฉลี่ยรวมได้เท่ากับ 4.74 และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.30 ซึ่งแสดงว่าผู้เรียนมีความคิดเห็นเชิงบวกสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันอย่างมีความสอดคล้องภายใน ควบคู่กับการลดอัตราการขาดเรียนหรือทิ้งการเรียนกลางคันของผู้เรียนให้เหลือร้อยละ 0.00 ช่วยเพิ่มโอกาสการเข้าถึงเครื่องมือฝึกปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพเชิงระบบ

6.2 ข้อจำกัดของการวิจัย การวิจัยครั้งนี้มีข้อจำกัดที่ควรระบุอย่างตรงไปตรงมาเพื่อประกอบการพิจารณานำผลไปใช้อ้างอิง ได้แก่

6.2.1 การศึกษากระทำในสถานศึกษาแห่งเดียว (วิทยาลัยเทคนิคเพชรบุรี) และหน่วยการสุ่มคือระดับกลุ่มเรียน (Cluster Sampling) มีการสุ่มผู้เรียนรายบุคคล

6.2.2 สิ่งจัดทำทางการศึกษาประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลักร่วมกัน ได้แก่ ตัวชุดฝึกแบบโมดูล ใบงานปฏิบัติงาน 8 ส่วน และการจัดการเรียนรู้เชิงรุก ทำให้ไม่สามารถแยกอิทธิพลอิสระเฉพาะของแต่ละองค์ประกอบออกจากกันได้

6.2.3 เครื่องมือวัดผลสัมฤทธิ์เน้นการวัดพุทธิพิสัยผ่านแบบทดสอบปรนัย 20 ข้อ และตารางบันทึกผลในใบงาน ยังไม่ได้วัดสมรรถนะทักษะพิสัยภาคปฏิบัติจริงด้วยเกณฑ์รูปการปฏิบัติ (Performance Rubrics)

6.2.4 การวิจัยไม่ได้ติดตามวัดผลความคงทนในการเรียนรู้ (Learning Retention) ของผู้เรียนในระยะยาว หลังผ่านพ้นระยะการทดลองไปแล้ว

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะเพื่อการนำผลวิจัยไปใช้

7.1.1 การบริหารจัดการห้องปฏิบัติการและการควบคุมความปลอดภัย แผนปฏิบัติการโมดูลย่อยที่พัฒนาขึ้นทำงานด้วยระบบแรงดันไฟฟ้าปลอดภัย 12 โวลต์ กระแสตรง ร่วมกับชุดขั้วต่อสายไฟนิรภัยแบบมีฉนวนหุ้มมิดชิด สถานศึกษาควรนำไปใช้ปรับสัดส่วนอัตราส่วนผู้เรียนให้เหลือเพียง 2 ถึง 3 คนต่อชุดฝึก เพื่อแก้ปัญหาความแออัดในชั้นเรียนขนาดใหญ่และเพิ่มชั่วโมงลงมือปฏิบัติจริงรายบุคคลอย่างทั่วถึง ทั้งนี้ สำหรับชั้นเรียนขนาดมาตรฐาน 40 คน การจัดเตรียมชุดฝึกให้ได้สัดส่วนดังกล่าวจะต้องใช้ชุดฝึกประมาณ 13 ถึง 20 ชุด คิดเป็นงบประมาณจัดสร้างรวม 370,500 ถึง 570,000 บาท ซึ่งยังคงประหยัดงบประมาณลงได้มากกว่าร้อยละ 76 เมื่อเทียบกับการจัดซื้อชุดฝึกสำเร็จรูปทางการค้าที่มีจำนวนชุดเท่ากัน (ซึ่งต้องใช้งบประมาณสูงถึง 1,560,000 ถึง 2,400,000 บาท) ทำให้ยังคงความคุ้มค่าเชิงงบประมาณของสถานศึกษาอย่างชัดเจน

7.1.2 การใช้งานชุดการสอนอย่างเป็นระบบร่วมกับใบงานปฏิบัติงาน ครูผู้สอนควรนำคู่มือการใช้งาน

เทคนิคควบคู่กับใบงานปฏิบัติงานโครงสร้าง 8 ส่วนหลักมาใช้กำกับกิจกรรมการเรียนรู้เชิงรุกอย่างเป็นขั้นตอนเพื่อทำหน้าที่เป็นนั่งร้านทางปัญญาช่วยลดภาระทางปัญญาในการไล่วงจรไฟฟ้าควบคุมและเพิ่มความแม่นยำในการใช้มัลติมิเตอร์ตรวจวัดแรงดันตกคร่อม

7.1.3 การประเมินสมรรถนะวิชาชีพของผู้เรียน

สถานศึกษาควรนำระบบสวิตช์จำลองสถานะข้อขัดข้องแอบแฝงประจำชุดฝึกมาใช้เป็นเครื่องมือหลักในการทดสอบประเมินสมรรถนะแทนการวัดผลทฤษฎีเพียงอย่างเดียว เพื่อฝึกทักษะการคิดวิเคราะห์เชิงระบบและการแก้ปัญหาเชิงวินิจฉัยข้อขัดข้องในสถานการณ์วงจรเปิด วงจรลัด หรือความต้านทานสูง อย่างไรก็ตาม การนำระบบสวิตช์จำลองข้อขัดข้องมาใช้เป็นเครื่องมือประเมินสมรรถนะหลักนี้จัดเป็นข้อเสนอแนะเชิงแนวคิดที่ยังต้องการการทดสอบเชิงทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงประจักษ์รองรับเพิ่มเติมในงานวิจัยระยะถัดไป

7.1.4 การนำไปประยุกต์ใช้กับหลักสูตร

อาชีวศึกษา เพื่อให้สถานศึกษาอื่นที่ใช้หลักสูตรเดียวกันสามารถนำผลงานวิจัยและชุดฝึกไปประยุกต์ใช้ในชั้นเรียนได้ทันที ผู้วิจัยได้ทำการจัดทำตารางจับคู่ความสอดคล้องระหว่างโมดูลการเรียนรู้ทั้ง 4 โมดูล กับหน่วยสมรรถนะและจุดประสงค์รายวิชา ในรายวิชางานปรับอากาศรถยนต์ (รหัสวิชา 20101-2105) ตามหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ พุทธศักราช 2567 ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การจับคู่โมดูลการเรียนรู้กับหน่วยสมรรถนะและจุดประสงค์รายวิชางานปรับอากาศรถยนต์ (รหัสวิชา 20101-2105) หลักสูตร ปวช. พุทธศักราช 2567

โมดูลการเรียนรู้	หน่วยสมรรถนะรายวิชา (CLOs)	จุดประสงค์การเรียนรู้เชิงพฤติกรรม
โมดูลที่ 1 การเรียนรู้วัสดุและอุปกรณ์	แสดงความรู้เกี่ยวกับหลักการและหน้าที่อุปกรณ์ไฟฟ้าแอร์รถยนต์	จำแนกหน้าที่ พิกัดความทนทาน และทดสอบสภาพอุปกรณ์ไฟฟ้าแอร์ได้ถูกต้อง

โมดูลการเรียนรู้	หน่วยสมรรถนะ รายวิชา (CLOs)	จุดประสงค์การเรียนรู้ เชิงพฤติกรรม
โมดูลที่ 2 การเรียนรู้วงจร และการเชื่อมต่อ	อ่านผังวงจรและต่อ วงจรควบคุมไฟฟ้า แอร์รถยนต์	อ่านผังวงจร (Wiring Diagram) และต่อสายไฟ วงจรกำลังและวงจร ควบคุมได้ถูกต้อง
โมดูลที่ 3 การวิเคราะห์ ปัญหาและตรวจ ซ่อม	ตรวจซ่อมและแก้ไข ข้อขัดข้องระบบ ไฟฟ้าแอร์รถยนต์	ใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันตก คร่อมและระบุจุดเสีย จำลอง (ขาด, ลัด, ต้านทานสูง) ได้
โมดูลที่ 4 การบำรุงรักษา และวัดสมรรถนะ	บำรุงรักษาและ ประเมินสมรรถนะ ระบบปรับอากาศ รถยนต์	วัดกระแสโหลด ประเมิน ประสิทธิภาพระบบความ เย็น และบำรุงรักษาเชิง ป้องกันได้

7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคต

7.2.1 การพัฒนาและขยายขอบเขตทางเทคโนโลยี

เนื่องจากเทคโนโลยียานยนต์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การศึกษาในระยะต่อไปควรวิจัยและพัฒนาโมดูลเสริมสำหรับระบบปรับอากาศคอมเพรสเซอร์แบบอินเวอร์เตอร์ อุปกรณ์ตรวจรู้แบบดิจิทัล รวมถึงการจำลองวงจรควบคุมไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้ในงานในกลุ่มยานยนต์ไฟฟ้าและยานยนต์ไฮบริด อย่างไรก็ตาม ขอบเขตข้อควรระวังอย่างชัดเจนว่า การขยายผลไปสู่ระบบควบคุมไฟฟ้าแรงดันสูงในยานยนต์ไฟฟ้าและไฮบริด จำเป็นต้องมีมาตรการควบคุมความปลอดภัย มาตรฐานฉนวนกันไฟฟ้าแรงดันสูง และอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลที่แตกต่างไปจากระบบแรงดันไฟฟ้าปลอดภัย 12 โวลต์ กระแสตรงของชุดฝึกเดิมโดยสิ้นเชิง

7.2.2 การบูรณาการเทคโนโลยีดิจิทัลและสื่อมัลติมีเดีย ควรศึกษาวิจัยเพื่อติดตั้งระบบรหัสคิวอาร์โค้ดหรือเทคโนโลยีความจริงเสริมลงบนหน้าแผงโมดูลย่อยแต่ละฐาน เพื่อให้ผู้เรียนสามารถใช้สมาร์ทโฟนสแกนเข้าถึงคลิปวิดีโอที่สนับสนุนขั้นตอนการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันหรือผังวงจรไฟฟ้าควบคุมแบบสามมิติได้ตามศักยภาพรายบุคคล

7.2.3 การติดตามประเมินผลผลลัพธ์ในการเรียนรู้ระยะยาว ควรวางแผนแบบแผนการวิจัยเชิงทดลองเพื่อ

ติดตามประเมินผลความคงทนในการเรียนรู้ของผู้เรียนอย่างต่อเนื่อง โดยทำการจัดเก็บข้อมูลและทดสอบสมรรถนะซ้ำภายหลังจากสิ้นสุดกระบวนการทดลองไปแล้วเป็นระยะเวลา 6 เดือน ถึง 1 ปี เพื่อยืนยันประสิทธิผลที่แท้จริงในงานอาชีพ

8. กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ที่สนับสนุนโอกาสทางการศึกษา ตลอดจนผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย แก้วดี ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ประจำหลักสูตรนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่กรุณาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำปรึกษา แนะนำการวิเคราะห์เชิงตัวเลข และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการจัดโครงสร้างงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณคณะผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 ท่าน ที่สละเวลาตรวจสอบเครื่องมือวิจัย พิจารณาดัชนีความสอดคล้องเชิงเนื้อหา และตรวจสอบมาตรฐานความปลอดภัยเชิงวิศวกรรมไฟฟ้าควบคุมของแผงชุดฝึกปฏิบัติการ โดยข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นเชิงวิชาการของทุกท่านมีส่วนสำคัญยิ่งในการปรับปรุงนวัตกรรมให้มีความสมบูรณ์รัดกุมพร้อมใช้งาน [cite: 10] ขอขอบพระคุณผู้บริหารและคณาจารย์ประจำแผนกวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคเพชรบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ห้องปฏิบัติการ ตลอดจนเครื่องมือวัดและอุปกรณ์สนับสนุนการวิจัยภาคสนาม ควบคู่กับการขอขอบใจนักเรียนหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ ชั้นปีที่ 3 แผนกวิชาช่างยนต์ ทุกคนที่ตั้งใจร่วมกิจกรรมการเรียนรู้เชิงรุกกับชุดฝึกแบบโมดูลรายบุคคล จนทำให้สามารถเก็บบันทึกข้อมูลคะแนนและสถิติทดสอบได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ตามระเบียบวิธีวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าชุดฝึกระบบไฟฟ้าในงานปรับอากาศรถยนต์แบบโมดูลและชุดการสอนย่อยแยกส่วนอิสระฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อการยกระดับคุณภาพการเรียนการสอนสายอาชีพศึกษาช่างยนต์ ช่วยลดภาระการสาธิตซ้ำของ

ครูผู้สอน พร้อมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างสมรรถนะฝีมือแรงงานระดับปฏิบัติการป้อนสู่ภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ต่อไป

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jumpanoi, P. and Kasrisom, A. 2025. "An Analysis of The Economic Interdependencies of The Next – Generation Automotive Industry Under Shaped by Thailand 4.0," *Journal of Business, Innovation and Sustainability (JBIS)*. 20(1). [Online]. Available: <https://so02.tci-thaijo.org/index.php/BECJournal/article/view/272886>
- [2] Department of Land Transport. 2025. "Registered Motor Vehicle Statistics in Thailand 2025," Bangkok: Ministry of Transport. (in Thai)
- [3] SAE International. 2020. *Safety Standards for Motor Vehicle Refrigerant Vapor Compression Systems*, SAE Standard J639, rev. Dec. 2011. [Online]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j639_201112/
- [4] Daly, S. 2011. *Automotive Air-Conditioning and Climate Control Systems*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- [5] omdoy, C. 2017. "The Development and Sustainability of the Automotive Parts Business in Thailand," Ph.D. dissertation, Dept. of International Graduate Studies, Burapha Univ., Chonburi, Thailand. (in Thai)
- [6] Campbell, D. T. and Stanley, J. C. 1963. *Experimental and Quasi-Experimental Designs for Research*. Chicago: Rand McNally.
- [7] Thammacharoenwit, S., Somphongtham, C. and Srisurin, K. 2021. "The Development of Skill Training Kits Accompanying Project-Based Learning Management in Automotive Air Conditioning Course on Compressor for Vocational Certificate Students," *Journal of MCU Ubon Review*. 6(3): pp. 153–164. (in Thai)
- [8] Poonphongswardiphan, P. and Dechakampu, N. 2020. "The Development of Car Air Conditioning Training Kit," *Kurusapha Withayajarn*. 1(1): pp. 84-95. (in Thai) [Online]. Available: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/withayajarnjournal/article/view/240049>
- [9] Chaiphia, E., Juntachum, N. and Warakul, P. 2021. "The Development of Training Course on Modern Automotive Technology for Teachers of Auto Mechanics Department under Vocational Education Commission Office in Northeast of Thailand," *RMU. J.* 15(3): pp. 182–191. (in Thai)
- [10] Bang Sapan Vocational College. 2021. "Development of Teaching Media for the Automotive Driving Course Module," Project report. Prachuap Khiri Khan: Bang Sapan Vocational College. (in Thai)
- [11] Sweller, J. 1988. "Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning," *Cognitive Science*. 12(2): pp. 257-285.
- [12] Cohen, J. 1988. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd ed. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- [13] Shafieek, M. S. M., Ismail, A. and Razali, S. S. 2024. "Impact of Digitalization on Automotive Technology Curriculum Concerning Student Psychomotor Achievement," *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 37(2): pp. 141–155. [Online]. Available: https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/applied_sciences_eng_tech/article/view/3295

**การออกแบบและพัฒนาระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE OFFICIAL ACCOUNT
สำหรับวิสาหกิจชุมชนในอำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช**
**DESIGN AND DEVELOPMENT OF A DIGITAL SERVICE PLATFORM USING LINE OFFICIAL
ACCOUNT FOR COMMUNITY ENTERPRISES IN KHANOM DISTRICT,
NAKHON SI THAMMARAT PROVINCE**

วชิร ยั่งยืน^{1*}, กมลนันท์ ชีวรัตน์โชติ², เมธาพร มีเดช¹

Wachira Yangyuen^{1*}, Kamonnann Chevarattanachote², Metaporn Meedate¹

¹ หลักสูตรวิชาการเป็นผู้ประกอบการดิจิทัล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หลักสูตรวิชาการบัญชี วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Digital Entrepreneurship Program, College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Accounting Program, College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ Corresponding author; E-mail Address: wachira.y@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 22 กรกฎาคม 2569 ; วันที่ทบทวนบทความ: 7 สิงหาคม 2569 ; วันที่ตอบรับบทความ: 29 สิงหาคม 2569 ;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 31 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ออกแบบและพัฒนาระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account สำหรับวิสาหกิจชุมชน และ (2) ประเมินการยอมรับระบบของผู้ใช้งานตามแบบจำลอง Technology Acceptance Model (TAM) การวิจัยเป็นการวิจัยเชิงออกแบบและพัฒนา โดยประยุกต์ใช้วงจรการพัฒนาระบบ (System Development Life Cycle: SDLC) เป็นกรอบในการพัฒนาระบบ กลุ่มผู้ให้ข้อมูลในการวิเคราะห์ความต้องการ จำนวน 17 คน ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ จำนวน 3 คน และผู้ใช้งานระบบ จำนวน 60 คน วิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพด้วยการวิเคราะห์เนื้อหา และข้อมูลเชิงปริมาณด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า ระบบบริการดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นสามารถบูรณาการข้อมูลวิสาหกิจชุมชน ผลิตภัณฑ์และบริการ ข้อมูลการท่องเที่ยว ข่าวสาร การติดต่อสื่อสาร และบริการดิจิทัลต่าง ๆ ผ่าน LINE Official Account ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการประเมินคุณภาพของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.59$, S.D. = 0.17) ขณะที่ผลการประเมินการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งานโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.64$, S.D. = 0.48) โดยด้านการรับรู้ถึงประโยชน์ของระบบ มีค่าเฉลี่ยสูงสุด ($\bar{X} = 4.70$) รองลงมาคือ การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน ($\bar{X} = 4.67$) ความตั้งใจในการใช้งาน ($\bar{X} = 4.62$) และทัศนคติต่อการใช้งาน ($\bar{X} = 4.57$) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและได้รับการยอมรับในระดับสูง ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัย คือ การเสนอกรอบการออกแบบและพัฒนาระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account โดยบูรณาการกระบวนการ SDLC ร่วมกับแบบจำลอง TAM ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและประเมินระบบบริการดิจิทัลสำหรับวิสาหกิจชุมชนที่มีบริบทการดำเนินงานแตกต่างกัน และสามารถประยุกต์ใช้เป็น

ต้นแบบในการพัฒนาระบบบริการดิจิทัลของวิสาหกิจชุมชนประเภทอื่นได้ การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ออกแบบและพัฒนาระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account สำหรับวิสาหกิจชุมชน และ (2) ประเมินการยอมรับระบบของผู้ใช้งานตามแบบจำลอง Technology Acceptance Model (TAM) โดยจากการทบทวนบริบทของวิสาหกิจชุมชนพบว่า การให้ข้อมูลผลิตภัณฑ์ บริการ การท่องเที่ยว ข่าวสาร และช่องทางการติดต่อยังมีลักษณะแยกตามช่องทางการสื่อสาร การวิจัยจึงมุ่งพัฒนาระบบบริการดิจิทัลที่รวบรวมบริการดังกล่าวไว้ในช่องทางเดียว โดยใช้การวิจัยเชิงออกแบบและพัฒนา (Design and Development Research) และประยุกต์ใช้วงจรการพัฒนาระบบ (System Development Life Cycle: SDLC) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ช่วยให้การพัฒนาระบบดำเนินไปอย่างเป็นลำดับตั้งแต่การวิเคราะห์ความต้องการ การออกแบบ การพัฒนา การทดสอบ และการปรับปรุงระบบ ขณะที่แบบจำลอง TAM ใช้สำหรับประเมินการรับรู้และการยอมรับระบบของผู้ใช้งานภายหลังการพัฒนา กรณีศึกษาประกอบด้วยวิสาหกิจชุมชน 2 แห่ง โดยมีผู้ให้ข้อมูลในการวิเคราะห์ความต้องการจำนวน 17 คน ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ จำนวน 3 คน และผู้ใช้งานระบบ จำนวน 60 คน วิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพด้วยการวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) และข้อมูลเชิงปริมาณด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถรวบรวมและนำเสนอข้อมูลวิสาหกิจชุมชน ผลิตภัณฑ์และบริการ ข้อมูลการท่องเที่ยว ข่าวสาร ช่องทางการติดต่อ และบริการดิจิทัลภายนอกผ่าน LINE Official Account ในโครงสร้างบริการเดียว ผลการประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.59$, S.D. = 0.17) ขณะที่ผลการประเมินการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งานโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.64$, S.D. = 0.48) โดยการรับรู้ถึงประโยชน์ของระบบ (Perceived Usefulness) มีค่าเฉลี่ยสูงสุด ($\bar{X} = 4.70$, S.D. = 0.46) รองลงมาคือ การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (Perceived Ease of Use) ($\bar{X} = 4.67$, S.D. = 0.48) ความตั้งใจในการใช้งาน (Behavioral Intention to Use) ($\bar{X} = 4.62$, S.D. = 0.49) และทัศนคติต่อการใช้งาน (Attitude Toward Using) ($\bar{X} = 4.57$, S.D. = 0.50) ตามลำดับ องค์ความรู้จากการวิจัย คือ แนวทางการออกแบบและพัฒนาระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account ที่เชื่อมโยงการวิเคราะห์ความต้องการ การพัฒนาระบบตาม SDLC และการประเมินการยอมรับตามองค์ประกอบของ TAM เข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการพัฒนาระบบในบริบทที่มีลักษณะใกล้เคียง โดยต้องปรับปรุงแบบการให้บริการให้เหมาะสมกับบริบทและความต้องการของผู้ใช้งานในแต่ละพื้นที่

คำสำคัญ: ระบบบริการดิจิทัล, วิสาหกิจชุมชน, ไลน์โอเอ, แบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี

Abstract: This study aimed to (1) design and develop a digital service system via LINE Official Account for community enterprises and (2) evaluate user acceptance of the system based on the Technology Acceptance Model (TAM). A contextual review of the target community enterprises indicated that information regarding products, services, tourism, news, and contact channels was fragmented across disparate communication channels. Consequently, this study sought to develop a digital service system that consolidated these services into a single platform. The study employed Design and Development Research (DDR) and applied the System Development Life Cycle (SDLC) as the development framework, systematically encompassing requirements analysis, system design, development, testing, and refinement, while the TAM framework was utilized to assess user perceptions and system acceptance following implementation. The investigation focused on two community enterprises as case studies, comprising 17 key informants for requirements analysis, 3 information technology experts for system quality evaluation, and 60 end users for technology acceptance evaluation.

Qualitative data were analyzed using content analysis, while quantitative data were analyzed using descriptive statistics, including the mean ($\bar{X}$) and standard deviation (S.D.). The findings revealed that the developed system effectively integrated and presented enterprise information, products and services, tourism data, news, contact channels, and external digital services through LINE Official Account within a unified service structure. The overall system quality evaluated by the experts was at the highest level ($\bar{X} = 4.59$, S.D. = 0.17). Overall user technology acceptance was likewise at the highest level ($\bar{X} = 4.64$, S.D. = 0.48). Among the TAM dimensions, Perceived Usefulness yielded the highest mean score ($\bar{X} = 4.70$, S.D. = 0.46), followed by Perceived Ease of Use ($\bar{X} = 4.67$, S.D. = 0.48), Behavioral Intention to Use ($\bar{X} = 4.62$, S.D. = 0.49), and Attitude Toward Using ($\bar{X} = 4.57$, S.D. = 0.50), respectively, demonstrating that the system effectively met user needs and achieved high acceptance. The key contribution of this research is an integrated design and development framework for LINE Official Account-based digital service systems that connects requirements analysis, SDLC-based development, and TAM-based acceptance evaluation. This framework serves as a practical model for developing and evaluating digital service systems in community enterprises with diverse operational contexts, adaptable to the specific context and user requirements of each area.

Keywords: Digital Service Platform, Community Enterprise, LINE Official Account, Technology Acceptance Model

1. บทนำ

การขับเคลื่อนเศรษฐกิจฐานรากและรายได้ของชุมชนก้าวมาสู่การเปลี่ยนผ่านจากยุคออฟไลน์สู่ยุคดิจิทัล (Digital Transformation) ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการดำเนินงานขององค์กรในทุกระดับชั้นจากระบบแบบดั้งเดิมไปสู่การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (Information and Communication Technology: ICT) เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการ การให้บริการ และการสื่อสารกับผู้ใช้บริการอย่างเป็นระบบ องค์กรในทุกภาคส่วนต่างเร่งพัฒนาระบบบริการดิจิทัลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน ลดข้อจำกัดด้านเวลาและสถานที่ และยกระดับประสบการณ์ของผู้ใช้บริการให้สอดคล้องกับพฤติกรรมของผู้บริโภคในยุคเศรษฐกิจปัจจุบัน ความสำเร็จของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวมีได้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับ การยอมรับของผู้ใช้งาน ซึ่ง Davis [1] เสนอว่า

การรับรู้ถึงประโยชน์และการรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งานเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการยอมรับและความตั้งใจในการใช้งานเทคโนโลยี ขณะที่ Davis, Bagozzi และ Warshaw [2] ยืนยันว่าแบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี (Technology Acceptance Model: TAM) สามารถอธิบายพฤติกรรมการยอมรับระบบสารสนเทศได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่อมา Venkatesh และ Davis (2000) และ Venkatesh และคณะ [3] ได้ขยายกรอบแนวคิดดังกล่าวให้ครอบคลุมปัจจัยด้านสังคมและปัจจัยเชิงพฤติกรรมด้วย ซึ่งส่งผลให้เทคโนโลยีไม่ได้ทำหน้าที่เพียงเป็นเครื่องมือสนับสนุนการดำเนินงานขององค์กรเท่านั้น แต่ยังเป็นกลไกสำคัญในการพัฒนาการตลาดดิจิทัล (Digital Marketing) และการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างผู้ประกอบการกับผู้บริโภคผ่านแพลตฟอร์มออนไลน์ โดยเฉพาะวิสาหกิจชุมชนซึ่งมักมีข้อจำกัดด้านงบประมาณ บุคลากร และโครงสร้างพื้นฐานด้านเทคโนโลยี งานวิจัยก่อนหน้านี้ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาแสดง

ให้เห็นตรงกันว่า ความสามารถด้านการตลาดดิจิทัลมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิผลทางการตลาดและความสามารถในการแข่งขันของวิสาหกิจชุมชน โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลช่วยเพิ่มการเข้าถึงลูกค้า ยกกระตือรือร้นการสื่อสาร และสร้างโอกาสในการขยายตลาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4], [5] ผลการศึกษาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า เทคโนโลยีดิจิทัลมีใช้เพียงเครื่องมือในการประชาสัมพันธ์ แต่เป็นองค์ประกอบสำคัญของการพัฒนาศักยภาพทางธุรกิจและการสร้างความยั่งยืนให้แก่เศรษฐกิจฐานราก

ในประเทศไทย LINE Official Account (LINE OA) ได้รับการพัฒนาและประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในฐานะแพลตฟอร์มบริการดิจิทัล (Digital Service Platform) ที่สามารถรองรับการประชาสัมพันธ์ การให้ข้อมูลสินค้าและบริการ การติดต่อสื่อสาร การบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้า (Customer Relationship Management: CRM) และการเชื่อมโยงผู้ใช้งานเข้าสู่บริการดิจิทัลอื่นภายในแพลตฟอร์มเดียว นอกจากนี้ LINE Official Account สามารถประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการดำเนินงานขององค์กรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการให้บริการข้อมูล การบริหารจัดการข้อมูล และการติดตามผลการดำเนินงาน โดยผู้ใช้งานมีระดับความพึงพอใจและการยอมรับในระดับสูง [6] รวมถึง [7] ยังพบว่า การรับรู้ถึงประโยชน์ ความน่าเชื่อถือ และคุณภาพของข้อมูลบน LINE Official Account มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อสินค้าออนไลน์ของผู้บริโภค ขณะที่งานวิจัยด้านการสื่อสารและประชาสัมพันธ์ผ่าน LINE Official Account รายงานว่า การออกแบบเมนูบริการ (Rich Menu) การส่งข้อความแบบเฉพาะกลุ่ม (Broadcast Message) และการนำเสนอข้อมูลในรูปแบบที่เหมาะสม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารและการเข้าถึงข้อมูลของผู้ใช้บริการได้อย่างชัดเจน [8] สะท้อนให้เห็นว่า LINE Official Account มีศักยภาพในการเป็นแพลตฟอร์มบริการดิจิทัลที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับองค์กรหลากหลายประเภท ไม่จำกัดเฉพาะการตลาดหรือการประชาสัมพันธ์เท่านั้น ผู้วิจัยเลือกใช้ LINE Official Account เป็นแพลตฟอร์มหลักของระบบ เนื่องจากเป็น

เครื่องมือที่สามารถรองรับการประชาสัมพันธ์ การให้ข้อมูลสินค้าและบริการ การติดต่อสื่อสาร การบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้า และการเชื่อมโยงผู้ใช้งานไปยังบริการดิจิทัลอื่นภายในแพลตฟอร์มเดียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถออกแบบเมนูบริการ (Rich Menu) และส่งข้อความแบบเฉพาะกลุ่มได้ ช่วยให้การเข้าถึงข้อมูลมีความสะดวก ลดขั้นตอนการใช้งาน และเหมาะสมกับวิสาหกิจชุมชนที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณ บุคลากร และโครงสร้างพื้นฐานด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ

วิสาหกิจชุมชนเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจฐานรากของประเทศไทย โดยมีบทบาทในการสร้างมูลค่าเพิ่มจากทรัพยากรและภูมิปัญญาท้องถิ่น ส่งเสริมการจ้างงาน และกระจายรายได้สู่ชุมชน ตามข้อมูลของกรมส่งเสริมการเกษตร จังหวัดนครราชสีมาที่มีวิสาหกิจชุมชนที่ได้รับการอนุมัติจดทะเบียนจำนวน 1,328 แห่ง และเครือข่ายวิสาหกิจชุมชนอีก 17 แห่ง ซึ่งครอบคลุมทั้งด้านการเกษตร การแปรรูปผลิตภัณฑ์ การท่องเที่ยว และบริการชุมชน อย่างไรก็ตาม แม้ว่าวิสาหกิจชุมชนจะมีจำนวนมากและมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของจังหวัด แต่ผลการศึกษาล่าสุดบ่งชี้ว่า ผู้ประกอบการชุมชนจำนวนมากยังคงมีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อการประชาสัมพันธ์ การสื่อสารกับลูกค้า และการให้บริการผ่านช่องทางดิจิทัล ส่งผลให้การเข้าถึงกลุ่มลูกค้าและการสร้างความสามารถในการแข่งขันยังไม่เต็มศักยภาพ [6], [9] งานวิจัยด้านพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์และระบบสารสนเทศสำหรับวิสาหกิจชุมชน

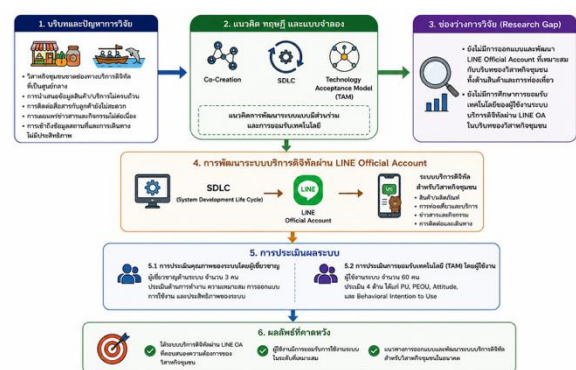
จากการทบทวนและสังเคราะห์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลสำหรับวิสาหกิจชุมชนสามารถจำแนกออกเป็น 4 ประเด็นหลัก ได้แก่ (1) งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ LINE Official Account เพื่อการประชาสัมพันธ์ การสื่อสาร และการจำหน่ายสินค้า (2) งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้วงจรการพัฒนากระบวนการ (System Development Life Cycle: SDLC) เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบสารสนเทศ (3) งานวิจัยด้านการตลาดดิจิทัลที่มุ่งยกระดับศักยภาพและความสามารถในการแข่งขันของวิสาหกิจชุมชน และ (4) งานวิจัยที่ประเมินคุณภาพของระบบและการ

ยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งาน ผลการสังเคราะห์สะท้อนให้เห็นว่า งานวิจัยแต่ละกลุ่มมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาองค์ความรู้ในประเด็นเฉพาะของตน แต่ยังขาดการบูรณาการองค์ความรู้ทั้งด้านการพัฒนาระบบ การให้บริการดิจิทัล และการประเมินการยอมรับของผู้ใช้งานไว้ภายใต้กระบวนการเดียวกันสำหรับวิสาหกิจชุมชน

แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้ LINE Official Account เพื่อสนับสนุนงานการประชาสัมพันธ์ การตลาดดิจิทัล และการให้บริการของวิสาหกิจชุมชน รวมทั้งมีการนำวงจรการพัฒนาแบบ (SDLC) มาใช้ในการพัฒนาระบบสารสนเทศ และใช้แบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี (TAM) ในการประเมินการยอมรับของผู้ใช้งาน แต่การศึกษาส่วนใหญ่มุ่งเน้นการพัฒนาระบบหรือการประเมินผลในประเด็นเฉพาะ จึงยังขาดแนวทางการออกแบบและพัฒนาระบบบริการดิจิทัลที่บูรณาการข้อมูลวิสาหกิจชุมชน ผลิตภัณฑ์และบริการ ข่าวสาร การท่องเที่ยว และช่องทางการติดต่อไว้ในแพลตฟอร์มเดียว ควบคู่กับการประเมินการยอมรับของผู้ใช้งานภายใต้กรอบแนวคิดเดียวกัน ส่งผลให้ยังมีช่องว่างในการพัฒนาแนวทางที่สามารถประยุกต์ใช้กับวิสาหกิจชุมชนที่มีบริบทการดำเนินงานแตกต่างกันได้อย่างเป็นระบบ จากช่องว่างของงานวิจัยดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเสนอแนวทางการออกแบบและพัฒนาระบบบริการดิจิทัลสำหรับวิสาหกิจชุมชน โดยใช้ LINE Official Account เป็นแพลตฟอร์มหลักในการให้บริการ และบูรณาการกระบวนการพัฒนาระบบตาม SDLC ร่วมกับการประเมินการยอมรับของผู้ใช้งานตามแบบจำลอง TAM เพื่อพัฒนาระบบที่สามารถรวบรวมข้อมูล ผลิตภัณฑ์และบริการ ข่าวสาร การท่องเที่ยว และช่องทางการติดต่อไว้ในแพลตฟอร์มเดียว อันเป็นแนวทางที่สามารถประยุกต์ใช้กับวิสาหกิจชุมชนที่มีบริบทการดำเนินงานใกล้เคียงกันได้ เพื่อให้การศึกษามีความสอดคล้องกับช่องว่างของงานวิจัยดังกล่าว ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาวิสาหกิจชุมชนจำนวน 2 แห่ง ที่เป็นกรณีศึกษา คือ วิสาหกิจชุมชนกลุ่มเกษตรแปรรูปถั่วพะยอม ซึ่งดำเนินธุรกิจด้านการผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาสมุนไพรเพื่อสุขภาพ และวิสาหกิจชุมชนการท่องเที่ยว

เชิงอนุรักษ์บ้านแหลมประทับ ในอำเภอนวม จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งให้บริการนำเที่ยวชมโลมาสีชมพูและกิจกรรมท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ แม้ว่าทั้งสองวิสาหกิจจะมีรูปแบบธุรกิจแตกต่างกัน แต่ต่างประสบปัญหาในลักษณะเดียวกัน คือ การขาดระบบบริการดิจิทัลที่สามารถสนับสนุนการสื่อสารกับลูกค้า การให้ข้อมูลสินค้าและบริการ การประชาสัมพันธ์ และการสร้างปฏิสัมพันธ์กับผู้ให้บริการอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account โดยประยุกต์ใช้วงจรการพัฒนาแบบ (SDLC) ในการวิเคราะห์ ออกแบบ พัฒนา และทดสอบระบบ พร้อมทั้งประเมินการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งานด้วยแบบจำลอง Technology Acceptance Model (TAM) [1], [2] ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับวิสาหกิจชุมชนที่มีบริบทการดำเนินงานใกล้เคียงกัน และเป็นต้นแบบในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อสนับสนุนเศรษฐกิจฐานราก

จากการทบทวนวรรณกรรม การสังเคราะห์งานวิจัยที่ผ่านมา และการวิเคราะห์ช่องว่างของงานวิจัย ผู้วิจัยได้กำหนดกรอบแนวคิดการวิจัย (Conceptual Framework) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างบริบทของปัญหา แนวคิดและทฤษฎีที่ใช้กระบวนการออกแบบและพัฒนาระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account ตลอดจนการประเมินผลของระบบตามแบบจำลอง Technology Acceptance Model (TAM) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย (Conceptual Framework)

จากภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัยแสดงให้เห็นว่างานวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาบริบทและความต้องการของวิสาหกิจชุมชน ร่วมกับการทบทวนวรรณกรรมและการวิเคราะห์ช่องว่างของงานวิจัย เพื่อนำไปสู่การออกแบบและพัฒนาระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account โดยประยุกต์ใช้กระบวนการ SDLC และประเมินผลด้วยแบบจำลอง TAM ก่อนสังเคราะห์เป็นแนวทางการออกแบบระบบที่สามารถประยุกต์ใช้กับวิสาหกิจชุมชนที่มีบริบทใกล้เคียงกันกับวิสาหกิจชุมชนในกรณีศึกษา

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อเสนอแนวทางการพัฒนาระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account ที่สามารถประยุกต์ใช้กับวิสาหกิจชุมชนที่มีลักษณะธุรกิจแตกต่างกัน ซึ่งมีวัตถุประสงค์ 2 ข้อ ประกอบด้วย

2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account สำหรับวิสาหกิจชุมชน

2.2 เพื่อประเมินผลการใช้งานและศึกษาการยอมรับระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account

3. ขอบเขตการวิจัย

เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยสามารถตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ผู้วิจัยได้วางกรอบและขอบเขตของการศึกษาโดยครอบคลุมปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ขอบเขตด้านพื้นที่ศึกษา การวิจัยครั้งนี้ดำเนินงานในพื้นที่ตำบลทองเนียน อำเภอนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยเลือกศึกษาวิสาหกิจชุมชนที่มีลักษณะการดำเนินธุรกิจแตกต่างกัน จำนวน 2 แห่ง ได้แก่ (1) วิสาหกิจชุมชนกลุ่มเกษตรแปรรูปถั่วขาวพระ ดำเนินธุรกิจด้านการผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลาสมุนไพรที่มาจากเรือประมงพื้นบ้าน (2) วิสาหกิจชุมชนการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์บ้านแหลมประทับ ดำเนินธุรกิจด้านการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์และการให้บริการเรือนำเที่ยวชมโลมาสีชมพูและสถานที่ท่องเที่ยว คือ เขาหินพับผ้า บ่อน้ำจืดกลางทะเล และสักการะหลวงพ่อทวด ณ เกาะนุ้ย การเลือกกรณีศึกษาทั้งสองแห่งมีวัตถุประสงค์เพื่อ

ศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบบริการดิจิทัลกับวิสาหกิจชุมชนที่มีลักษณะธุรกิจแตกต่างกัน ภายใต้แนวทางการวิเคราะห์ออกแบบและพัฒนาระบบเดียวกัน

3.2 ขอบเขตด้านกลุ่มตัวอย่าง กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

3.2.1 กลุ่มผู้ให้ข้อมูลสำหรับการออกแบบและพัฒนาระบบ ประกอบด้วยประธาน คณะกรรมการ และสมาชิกของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มเกษตรแปรรูปถั่วขาวพระ และวิสาหกิจชุมชนการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์บ้านแหลมประทับ จำนวน 17 คน ซึ่งเป็นผู้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับบริบทการดำเนินงาน ปัญหาและความต้องการของระบบ โดยใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) เพราะเป็นผู้ที่มีความรู้ ความเข้าใจ และมีบทบาทโดยตรงต่อการดำเนินงานของวิสาหกิจชุมชน

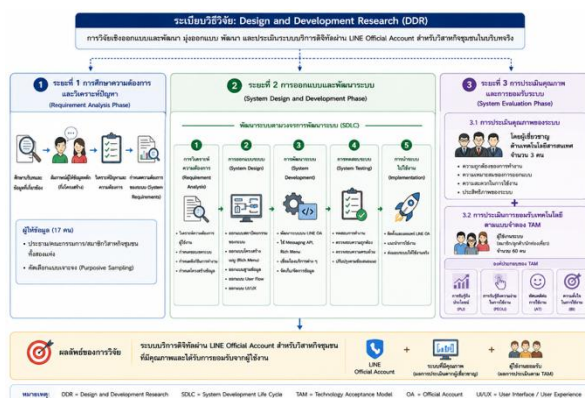
3.2.2 กลุ่มผู้ใช้สำหรับการประเมินการยอมรับระบบ ประกอบด้วยสมาชิกวิสาหกิจชุมชน ลูกค้า และนักท่องเที่ยวที่เข้าใช้งานระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account ภายหลังการพัฒนาระบบเสร็จสมบูรณ์ โดยใช้วิธีการเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบไม่อาศัยความน่าจะเป็น (Non-Probability Sampling) ด้วยวิธีการเลือกแบบสะดวก (Convenience Sampling) จากผู้ที่สมัครใจเข้าใช้งานระบบ จำนวน 60 คน

3.2.3 กลุ่มผู้เชี่ยวชาญ ที่ทำหน้าที่ประเมินระบบบริการดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นได้รับการ โดยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ จำนวน 3 คน

3.3 ขอบเขตด้านระบบ ระบบที่พัฒนาขึ้นเป็นระบบบริการดิจิทัลบนแพลตฟอร์ม LINE Official Account (LINE OA) เพื่อสนับสนุนการให้บริการของวิสาหกิจชุมชน โดยประกอบด้วยฟังก์ชันหลัก ได้แก่ ข้อมูลวิสาหกิจชุมชน ข้อมูลสินค้าและบริการ ข่าวประชาสัมพันธ์และกิจกรรม เมนูบริการ (Rich Menu) ช่องทางการติดต่อ การเชื่อมโยงตำแหน่งที่ตั้งผ่าน Google Maps การเชื่อมโยงสื่อสังคมออนไลน์ และการตอบกลับผู้ใช้งานผ่านระบบ LINE Official Account

4. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงออกแบบและพัฒนา (Design and Development Research) [15] โดยมุ่งออกแบบ พัฒนา และประเมินระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account สำหรับวิสาหกิจชุมชนในบริบทจริง แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับมุมมองของการวิจัยเชิงออกแบบ (Design Science Research) ที่ให้ความสำคัญกับการสร้างและประเมินสิ่งประดิษฐ์หรือระบบเพื่อแก้ปัญหาในบริบทจริง [16] การวิจัยใช้กระบวนการออกแบบและพัฒนาอย่างเป็นระบบ โดยประยุกต์ใช้วงจรการพัฒนา ระบบ (System Development Life Cycle: SDLC) [10] เป็นกรอบในการดำเนินงานด้านการวิเคราะห์ ออกแบบ พัฒนา และทดสอบระบบ ขณะที่แบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี (Technology Acceptance Model: TAM) [1], [2] ใช้เป็นกรอบในการประเมินการยอมรับระบบของผู้ใช้งานภายหลังการพัฒนา รายละเอียดดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กรอบวิธีดำเนินการวิจัย

จากภาพที่ 2 จะเห็นภาพรวมของกระบวนการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ (1) การศึกษาความต้องการและวิเคราะห์ปัญหา (2) การออกแบบและพัฒนา และ (3) การประเมินคุณภาพและการยอมรับระบบ

4.1 ระยะที่ 1 การศึกษาปัญหาและวิเคราะห์ความต้องการของระบบ (Requirement Analysis Phase) ในระยะนี้ ผู้วิจัยศึกษาบริบทการดำเนินงานของวิสาหกิจชุมชน กลุ่มเกษตรกรแปรรูปถั่วเหลือง และวิสาหกิจชุมชนการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์บ้านแหลมประทับ โดยศึกษาจากเอกสาร

ที่เกี่ยวข้อง การสัมภาษณ์แบบกึ่งโครงสร้าง (Semi-Structured Interview) และการสังเกตการดำเนินงาน เพื่อวิเคราะห์สภาพปัญหา กระบวนการดำเนินงาน และความต้องการของผู้ใช้งานระบบ ผู้ให้ข้อมูลประกอบด้วยประธาน คณะกรรมการ และสมาชิกของวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่ง จำนวน 17 คน โดยใช้การเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) เนื่องจากเป็นผู้มีบทบาทโดยตรงต่อการดำเนินงานและสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับปัญหาและความต้องการของระบบได้ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์เชิงเนื้อหา (Content Analysis) เพื่อสังเคราะห์ประเด็นปัญหาและความต้องการ และนำผลการวิเคราะห์ไปกำหนดคุณลักษณะของระบบ (System Requirements) สำหรับใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบระบบบริการดิจิทัลให้สอดคล้องกับบริบทของวิสาหกิจชุมชน

4.2 ระยะที่ 2 การออกแบบและพัฒนา ระบบ (System Design and Development Phase) การดำเนินงานในระยะนี้สอดคล้องกับแนวคิดการวิจัยเชิงออกแบบ (Design Science Research) ที่ให้ความสำคัญกับกระบวนการออกแบบและพัฒนา รวมถึงการประเมินสิ่งที่พัฒนาขึ้น [17] จากนั้นผู้วิจัยดำเนินการออกแบบและพัฒนา ระบบตามวงจรการพัฒนา ระบบ (System Development Life Cycle: SDLC) ซึ่งประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การวิเคราะห์ความต้องการของระบบ (Requirement Analysis) โดยนำข้อมูลจากการศึกษาบริบท ปัญหา และความต้องการของผู้ใช้งานมาวิเคราะห์เพื่อกำหนดขอบเขต ฟังก์ชันการทำงาน และโครงสร้างข้อมูลของระบบ (2) การออกแบบระบบ (System Design) โดยออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ โครงสร้างเมนู (Rich Menu) โครงสร้างข้อมูล เส้นทางการทำงานของผู้ใช้ (User Flow) และส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface) ของ LINE Official Account ให้เหมาะสมกับบริบทของวิสาหกิจชุมชน (3) การพัฒนาระบบ (System Development) โดยพัฒนาระบบบริการดิจิทัลบนแพลตฟอร์ม LINE Official Account และใช้เครื่องมือที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ LINE Official Account Manager, Rich Menu และ Messaging API เพื่อรองรับการนำเสนอข้อมูลสินค้าและบริการ การประชาสัมพันธ์ การติดต่อสื่อสาร และการเชื่อมโยงไปยังบริการดิจิทัล

ที่เกี่ยวข้อง (4) การทดสอบระบบ (System Testing) โดยทดสอบความถูกต้องของฟังก์ชัน ความครบถ้วนของข้อมูล ความสะดวกในการใช้งาน และการตอบสนองของระบบ พร้อมปรับปรุงระบบตามผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ ก่อนนำไปใช้งานจริง และ (5) การนำระบบไปใช้งาน (Implementation) โดยนำระบบ LINE Official Account ไปใช้งานกับวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่ง พร้อมแนะนำการใช้งานแก่ผู้ดูแลระบบและผู้เกี่ยวข้อง

4.3 ระยะที่ 3 การประเมินระบบ (System Evaluation Phase) ผู้วิจัยดำเนินการประเมินระบบหลังจากการพัฒนาและทดสอบระบบแล้ว แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) การประเมินคุณภาพของระบบ โดยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ จำนวน 3 คน ซึ่งคัดเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จากผู้ที่มีความรู้หรือประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบสารสนเทศ การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ หรือการประเมินคุณภาพระบบ โดยใช้แบบประเมินคุณภาพระบบเพื่อประเมินด้านความถูกต้องของการทำงาน ความเหมาะสมของการออกแบบ ความสะดวกในการใช้งาน และประสิทธิภาพของระบบ และ (2) การประเมินการยอมรับเทคโนโลยี โดยผู้ใช้งานระบบ จำนวน 60 คน ประกอบด้วยสมาชิกวิสาหกิจชุมชน ลูกค้า และนักท่องเที่ยวที่เข้าใช้งานระบบ โดยใช้แบบสอบถามการยอมรับเทคโนโลยีที่พัฒนาตามกรอบแนวคิด Technology Acceptance Model (TAM) ครอบคลุม 4 องค์ประกอบ ได้แก่ การรับรู้ถึงประโยชน์ (Perceived Usefulness) การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (Perceived Ease of Use) ทศคติต่อการใช้งาน (Attitude Toward Using) และความตั้งใจในการใช้งาน (Behavioral Intention to Use)

4.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย (1) แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง (Semi-Structured Interview) สำหรับศึกษาบริบท สภาพการดำเนินงาน ปัญหา ความพร้อม และความต้องการด้านการตลาดดิจิทัลของวิสาหกิจชุมชน โดยแบบสัมภาษณ์ประกอบด้วย 6 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ให้ข้อมูล ตอนที่ 2 ข้อมูลทั่วไปของวิสาหกิจชุมชน ตอนที่ 3 ข้อมูลทั่วไปด้านการตลาด ตอนที่ 4 ความพร้อมเพื่อการพัฒนาด้านการตลาดดิจิทัล ตอนที่ 5 ปัญหาและอุปสรรคด้าน

การตลาดของวิสาหกิจชุมชน และตอนที่ 6 ข้อเสนอแนะ ข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์นำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์บริบทและกำหนดความต้องการของระบบ (2) แบบประเมินคุณภาพระบบสำหรับผู้เชี่ยวชาญ ใช้สำหรับประเมินคุณภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นในด้านความถูกต้องของการทำงาน ความเหมาะสมของการออกแบบ ความสะดวกในการใช้งาน และประสิทธิภาพของระบบ และ (3) แบบสอบถามการยอมรับเทคโนโลยีตามแบบจำลอง Technology Acceptance Model (TAM) สำหรับผู้ใช้งานระบบ จำนวน 11 ข้อ ประกอบด้วย การรับรู้ถึงประโยชน์ (Perceived Usefulness: PU) จำนวน 3 ข้อ การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (Perceived Ease of Use: PEOU) จำนวน 3 ข้อ ทศคติต่อการใช้งาน (Attitude Toward Using) จำนวน 2 ข้อ และความตั้งใจในการใช้งาน (Behavioral Intention to Use: BI) จำนวน 3 ข้อ โดยใช้มาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ และผู้วิจัยดำเนินการตรวจสอบคุณภาพของแบบสอบถามการยอมรับเทคโนโลยีตามแบบจำลอง Technology Acceptance Model (TAM) โดยพัฒนาและปรับข้อคำถามให้สอดคล้องกับองค์ประกอบของแบบจำลองและบริบทของระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account สำหรับวิสาหกิจชุมชน จากนั้นตรวจสอบความเชื่อมั่นของแบบสอบถามจากข้อมูลของผู้ใช้งานระบบจำนวน 60 คน โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient) เพื่อประเมินความสอดคล้องภายในของข้อคำถาม ผลการตรวจสอบพบว่า แบบสอบถามด้านการรับรู้ถึงประโยชน์ (Perceived Usefulness: PU) จำนวน 3 ข้อ มีค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 1.000 ด้านการรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (Perceived Ease of Use: PEOU) จำนวน 3 ข้อ มีค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.941 ด้านความตั้งใจในการใช้งาน (Behavioral Intention to Use: BI) จำนวน 3 ข้อ มีค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.925 และด้านการยอมรับหรือทศคติต่อการใช้งาน จำนวน 2 ข้อ มีค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.737 เมื่อพิจารณาข้อคำถามทั้ง 11 ข้อ พบว่ามีค่าความเชื่อมั่นโดยรวมเท่ากับ 0.975 สะท้อนว่าแบบสอบถามมีความ

สอดคล้องภายในในระดับสูง และมีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้เก็บข้อมูลการยอมรับระบบจากผู้ใช้งาน

ตารางที่ 1 ผลการตรวจสอบความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม

องค์ประกอบ	จำนวนข้อ	Cronbach's Alpha
1. การรับรู้ถึงประโยชน์ของระบบ (PU)	3	1.000
2. การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (PEOU)	3	0.941
3. ความตั้งใจในการใช้งาน (BI)	3	0.925
4. ทศนคติต่อการใช้งาน	2	0.737
รวม	11	0.975

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพจากการสัมภาษณ์และการสังเกต วิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงเนื้อหา (Content Analysis) เพื่อนำไปกำหนดความต้องการของระบบและใช้เพื่อประกอบการอภิปรายผล โดยมีการใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่อวิเคราะห์และอธิบายผลของการวิจัย โดยนำผลของค่าเฉลี่ยจากเกณฑ์ในการแปลความหมาย [11] รายละเอียดดังนี้

ค่าเฉลี่ย 4.50 – 5.00 หมายถึงอยู่ในระดับ มากที่สุด

ค่าเฉลี่ย 3.50 – 4.49 หมายถึงอยู่ในระดับ มาก

ค่าเฉลี่ย 2.50 – 3.49 หมายถึงอยู่ในระดับ ปานกลาง

ค่าเฉลี่ย 1.50 – 2.49 หมายถึงอยู่ในระดับ น้อย

ค่าเฉลี่ย 1.00 – 1.49 หมายถึงอยู่ในระดับ น้อยที่สุด

การวิจัยครั้งนี้ได้รับการพิจารณารับรองจริยธรรมการวิจัย ในมนุษย์จากมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ เลขที่รับรอง WU-EC-EX-3-290-67 ก่อนดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยชี้แจงวัตถุประสงค์และรายละเอียดที่เกี่ยวข้องแก่ผู้เข้าร่วมการวิจัย และดำเนินการเก็บรักษาข้อมูลเป็นความลับ โดยนำเสนอผลการวิจัยในภาพรวมและใช้ข้อมูลเพื่อวัตถุประสงค์ทางวิชาการเท่านั้น

5. ผลการวิจัย

ผลของการวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ (1) ผลการศึกษาความต้องการของระบบ (2) ผลการออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ (3) ผลการพัฒนาระบบ (4) ผลการประเมินคุณภาพของระบบ และ (5) ผลการประเมินการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งาน รายละเอียดดังนี้

5.1 ผลการศึกษาความต้องการของระบบ พบว่า ผลการวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งานจากการสัมภาษณ์ ประธาน คณะกรรมการ และสมาชิกของวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่ง จำนวน 17 คน โดยนำข้อมูลจากการสัมภาษณ์ และการสังเกตมาวิเคราะห์เชิงเนื้อหา (Content Analysis) และสังเคราะห์ประเด็นที่มีความเกี่ยวข้องกับการให้บริการ ข้อมูล การประชาสัมพันธ์ การติดต่อสื่อสาร และการเข้าถึงบริการดิจิทัล พบว่า แม้ว่าวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่งมีลักษณะการดำเนินงานแตกต่างกัน โดยวิสาหกิจชุมชนกลุ่มเกษตรแปรรูปถ้าเขาพระมุงเน้นการผลิตและจำหน่ายสินค้า ขณะที่วิสาหกิจชุมชนการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์บ้านแหลมประทับมุงเน้นการให้บริการด้านการท่องเที่ยว แต่มีปัญหาและความต้องการด้านระบบบริการดิจิทัลในลักษณะที่สอดคล้องกัน สามารถสังเคราะห์เป็น 5 ประเด็นสำคัญ ได้แก่ (1) การขาดช่องทางประชาสัมพันธ์ที่เป็นศูนย์กลาง (2) การนำเสนอข้อมูลสินค้าและบริการยังไม่ครบถ้วน (3) การติดต่อสื่อสารกับลูกค้ายังไม่สะดวก (4) การเผยแพร่ข่าวสารและกิจกรรมยังไม่มีอย่างต่อเนื่อง และ (5) การเข้าถึงข้อมูลตำแหน่งและการเดินทางยังไม่มีประสิทธิภาพ จากการสังเคราะห์ข้อมูลดังกล่าว ผู้วิจัยนำแต่ละประเด็นมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัญหา ความต้องการของผู้ใช้ และข้อกำหนดของระบบ (System Requirements) เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account โดยผลการวิเคราะห์พบว่า ความต้องการด้านการเข้าถึงข้อมูลผ่านช่องทางเดียวถูกนำไปกำหนดเป็นโครงสร้าง Rich Menu ความต้องการด้านข้อมูลสินค้าและบริการถูกนำไปกำหนดเป็นโมดูลข้อมูลผลิตภัณฑ์และบริการ ความต้องการด้านการติดต่อสื่อสารถูกนำไปกำหนดเป็นช่องทาง Contact

ความต้องการด้านข่าวสารถูกนำไปกำหนดเป็นโมดูล News และความต้องการด้านการเดินทางถูกนำไปเชื่อมโยงกับ Google Maps โดยรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความต้องการของระบบ

ประเด็นปัญหาที่สังเคราะห์	ความต้องการของผู้ใช้	แนวทางการพัฒนาระบบ
ไม่มีช่องทางประชาสัมพันธ์กลาง	ต้องการเผยแพร่ข้อมูลผ่านมือถือ	LINE Official Account
ข้อมูลสินค้าไม่ครบ	ต้องการรายละเอียดสินค้า	Product Module
ลูกค้าติดต่อได้ยาก	ต้องการช่องทางติดต่อ	Contact Module
ข่าวสารกระจัดกระจาย	ต้องการช่องทางแจ้งข่าวสาร	News Module
นักท่องเที่ยวหาสถานที่ไม่เจอ	ต้องการข้อมูลแผนที่และการเดินทาง	Google Maps
ไม่มีการรวมบริการไว้ในเดียว	ต้องการศูนย์บริการดิจิทัล	Rich Menu

5.2 ผลการออกแบบระบบ (System Design) จากผลการวิเคราะห์ปัญหาและความต้องการของผู้ใช้งานในระยะที่ 1 ผู้วิจัยนำประเด็นที่สังเคราะห์ได้มากำหนดเป็นข้อกำหนดของระบบ (System Requirements) และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account โดยออกแบบให้สามารถรองรับการเข้าถึงข้อมูลและบริการของวิสาหกิจชุมชนผ่านช่องทางเดียว และสามารถปรับโครงสร้างการให้บริการให้สอดคล้องกับลักษณะการดำเนินงานที่แตกต่างกันของวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่ง ผลการออกแบบระบบประกอบด้วย 4 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ (1) โครงสร้างการให้บริการและเมนูหลัก (2) เส้นทางการใช้งานของผู้ใช้ (User Flow) (3) โครงสร้างข้อมูลและการเชื่อมโยงบริการดิจิทัล และ (4) ส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface) โดยออกแบบ Rich Menu เป็นจุดเข้าสู่บริการหลักของระบบ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลผลิตภัณฑ์และบริการ ข่าวสาร ช่องทางการติดต่อ และข้อมูลการเดินทางได้จากหน้าหลักของ LINE Official Account

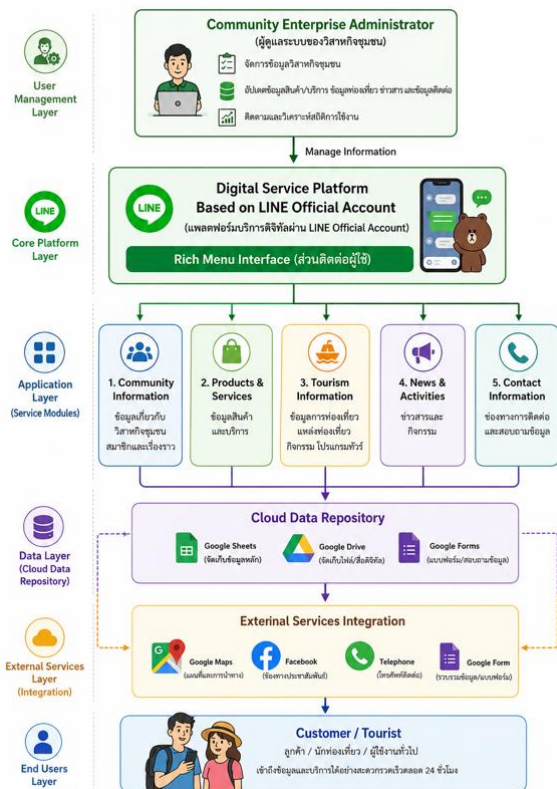
สำหรับวิสาหกิจชุมชนกลุ่มเกษตรแปรรูปถ้าเขาพระ การออกแบบระบบมุ่งเน้นการนำเสนอข้อมูลวิสาหกิจชุมชน ผลิตภัณฑ์ปลาหวานสมุนไพร ช่องทางการติดต่อ และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการประชาสัมพันธ์สินค้า ขณะที่วิสาหกิจชุมชนการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์บ้านแหลมประทับใจ การออกแบบระบบมุ่งเน้นการนำเสนอข้อมูลกิจกรรมการท่องเที่ยว สถานที่ท่องเที่ยว โปรแกรมการให้บริการ ช่องทางการติดต่อ และข้อมูลการเดินทาง ทั้งนี้แม้รายละเอียดของบริการแตกต่างกัน แต่โครงสร้างการออกแบบมีแนวคิดร่วมกัน คือ การรวบรวมข้อมูลและช่องทางบริการที่จำเป็นไว้ภายใต้ LINE Official Account เพื่อให้ผู้ใช้งานเข้าถึงข้อมูลได้สะดวกและลดขั้นตอนในการค้นหาข้อมูล ผลการออกแบบดังกล่าวนำไปสู่โครงสร้างระบบที่เชื่อมโยงระหว่างข้อมูลของวิสาหกิจชุมชนกับบริการดิจิทัลที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ LINE Official Account เป็นช่องทางหลัก และเชื่อมโยงไปยังบริการภายนอก เช่น Google Maps และช่องทางการติดต่อของวิสาหกิจชุมชนตามความต้องการของผู้ใช้งาน ดังแสดงในภาพที่ 3

5.2.1 การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ (System Architecture Design) ผลการวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งานจากระยะ Requirement Analysis แสดงให้เห็นว่าวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่งมีความต้องการระบบที่สามารถรวบรวมข้อมูล ผลิตภัณฑ์ บริการ ข่าวสาร การติดต่อสื่อสารและบริการสนับสนุนต่าง ๆ ไว้ในแพลตฟอร์มเดียว เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ลูกค้าและนักท่องเที่ยวในการเข้าถึงข้อมูลผ่านอุปกรณ์เคลื่อนที่ ผู้วิจัยจึงนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมากำหนดเป็นข้อกำหนดของระบบ (System Requirements) และออกแบบสถาปัตยกรรมระบบภายใต้แนวคิด Digital Service Platform โดยใช้ LINE Official Account เป็นศูนย์กลางของการให้บริการ ดังแสดงในภาพที่ 3 จากข้อกำหนดดังกล่าว ผู้วิจัยจึงกำหนดโครงสร้างระบบให้ประกอบด้วยส่วนของผู้ใช้งาน แพลตฟอร์มการให้บริการ โมดูลการทำงาน แหล่งจัดเก็บข้อมูล และบริการภายนอก เพื่อให้แต่ละองค์ประกอบทำหน้าที่สอดคล้องกับความต้องการที่สังเคราะห์ได้จากระยะการวิเคราะห์ความต้องการ

แนวคิดการออกแบบสถาปัตยกรรมระบบใช้แนวคิด Layered Architecture เพื่อจัดองค์ประกอบของระบบให้มีหน้าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน และกำหนดขอบเขตการทำงานของแต่ละส่วนให้สอดคล้องกับข้อกำหนดของระบบ และบริบทการให้บริการของวิสาหกิจชุมชน

โดยสถาปัตยกรรมของระบบประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) User Layer เป็นชั้นของผู้ใช้งานระบบ ประกอบด้วยลูกค้า นักท่องเที่ยว และผู้ดูแลระบบ ซึ่งสามารถเข้าถึงบริการผ่านแอปพลิเคชัน LINE บนอุปกรณ์ที่ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงระบบได้ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลและบริการโดยใช้ LINE Official Account เป็นช่องทางบริการหลัก (2) Presentation Layer เป็นชั้นของส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface) ทำหน้าที่รับคำสั่งและแสดงผลข้อมูลผ่าน LINE Official Account โดยใช้ Rich Menu เป็นจุดเชื่อมโยงหลักในการเข้าถึงบริการต่างๆ ภายในระบบ เช่น ข้อมูลวิสาหกิจชุมชน ผลิตภัณฑ์ การท่องเที่ยว ข่าวสาร และช่องทางการติดต่อ ทั้งนี้ การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งานเน้นการลดขั้นตอนในการเข้าถึงข้อมูล ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบด้านการรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (Perceived Ease of Use) ของ TAM (3) Application Layer เป็นชั้นของกระบวนการทำงานหลักของระบบ ประกอบด้วยโมดูลบริการ ได้แก่ ข้อมูลวิสาหกิจชุมชน (Community Information Module) ข้อมูลผลิตภัณฑ์และบริการ (Product and Service Module) ข้อมูลการท่องเที่ยว (Tourism Information Module) ข่าวสารและกิจกรรม (News and Activities Module) และข้อมูลการติดต่อ (Contact Module) โดยแต่ละโมดูลได้รับการออกแบบจากผลการวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งานเพื่อรองรับลักษณะการดำเนินงานของวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่ง (4) Data Layer เป็นชั้นจัดเก็บและบริหารจัดการข้อมูลของระบบ ประกอบด้วย Google Sheets สำหรับจัดเก็บข้อมูลหลักของระบบ Google Drive สำหรับจัดเก็บเอกสารและสื่อดิจิทัล และ Google Forms สำหรับรวบรวมข้อมูลจากผู้ใช้งาน และ (5) External Service Layer เป็นชั้นการเชื่อมโยงบริการภายนอก โดยเชื่อมโยงกับ Google Maps

สำหรับข้อมูลตำแหน่งและการนำทาง Facebook สำหรับการประชาสัมพันธ์ข้อมูลเพิ่มเติม หมายเลขโทรศัพท์สำหรับการติดต่อโดยตรง และ Google Forms สำหรับการรับข้อเสนอแนะหรือข้อมูลจากผู้ใช้งาน ทั้งนี้ การเชื่อมโยงบริการดังกล่าวช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลและบริการที่เกี่ยวข้องผ่าน LINE Official Account และเชื่อมโยงไปยังบริการที่กำหนดไว้ในระบบ



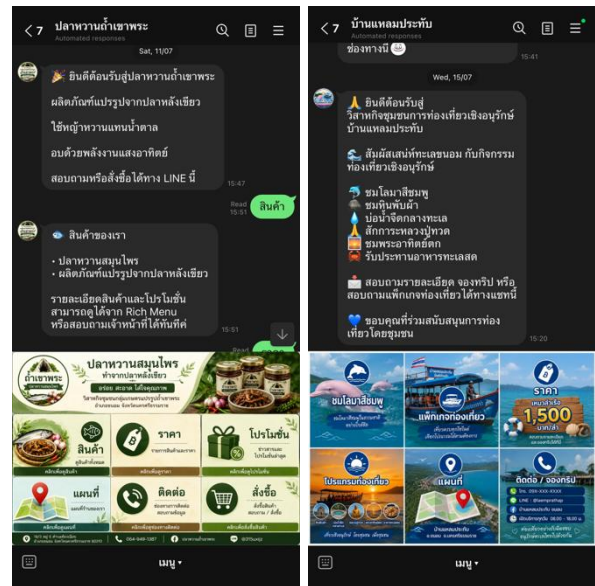
ภาพที่ 3 แผนภาพโครงสร้างของระบบ

จากการออกแบบสถาปัตยกรรมดังกล่าว ระบบสามารถเชื่อมโยงผู้ใช้งาน โมดูลการให้บริการ แหล่งจัดเก็บข้อมูล และบริการภายนอกเข้าด้วยกันภายใต้โครงสร้างเดียว โดยโครงสร้างดังกล่าวสอดคล้องกับข้อกำหนดของระบบที่ได้จากการวิเคราะห์ความต้องการในระยะที่ 1 และทำให้สามารถนำข้อมูลและบริการที่จำเป็นของวิสาหกิจชุมชนมาให้บริการผ่าน LINE Official Account ได้

5.2.2 การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface Design) จากผลการวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งานในระยะที่ 1 ผู้วิจัยนำข้อกำหนดด้านการเข้าถึงข้อมูล

และบริการมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface: UI) บนแพลตฟอร์ม LINE Official Account โดยมุ่งจัดโครงสร้างการนำเสนอข้อมูลให้มีความชัดเจน สอดคล้องกับลักษณะการให้บริการของวิสาหกิจชุมชน และลดความซับซ้อนในการเข้าถึงข้อมูล การออกแบบกำหนดให้ Rich Menu เป็นจุดเริ่มต้นของการเข้าถึงบริการ และจัดหมวดหมู่ข้อมูลตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่ ข้อมูลวิสาหกิจชุมชน ผลิตภัณฑ์และบริการ ข้อมูลการท่องเที่ยว ข่าวสารและกิจกรรม และช่องทางการติดต่อ

ผลการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ของวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่งใช้โครงสร้างการนำเสนอข้อมูลในลักษณะที่สอดคล้องกัน แต่ปรับรายละเอียดของเนื้อหาและบริการให้เหมาะสมกับบริบทของแต่ละวิสาหกิจชุมชน โดยวิสาหกิจชุมชนกลุ่มเกษตรแปรรูปถั่วเหลืองพระเน้นการนำเสนอข้อมูลผลิตภัณฑ์และบริการ ขณะที่วิสาหกิจชุมชนการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์บ้านแหลมประทับเน้นข้อมูลกิจกรรมและบริการด้านการท่องเที่ยว ทั้งนี้ การจัดวางองค์ประกอบของส่วนติดต่อผู้ใช้คำนึงถึงความสอดคล้องของโครงสร้างเมนูรูปแบบการนำเสนอ และลำดับการเข้าถึงข้อมูล เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถทำความเข้าใจรูปแบบการใช้งานและนำทางไปยังบริการที่ต้องการได้อย่างต่อเนื่อง ในด้านการนำทาง (Navigation) ผู้วิจัยออกแบบให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกบริการจาก Rich Menu และเชื่อมโยงไปยังข้อมูลหรือบริการที่เกี่ยวข้องตามหมวดหมู่ที่กำหนด โดยจัดลำดับการเข้าถึงข้อมูลให้มีขั้นตอนที่ชัดเจนและหลีกเลี่ยงการนำทางที่ไม่จำเป็น แนวทางดังกล่าวเป็นผลจากข้อกำหนดด้านการเข้าถึงข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ความต้องการ และสอดคล้องกับองค์ประกอบด้านการรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (Perceived Ease of Use: PEOU) ของแบบจำลอง TAM เนื่องจากการออกแบบมุ่งให้ผู้ใช้งานสามารถทำความเข้าใจโครงสร้างการให้บริการและเข้าถึงข้อมูลตามความต้องการได้โดยไม่เพิ่มขั้นตอนที่ไม่จำเป็น ดังแสดงในภาพที่ 4

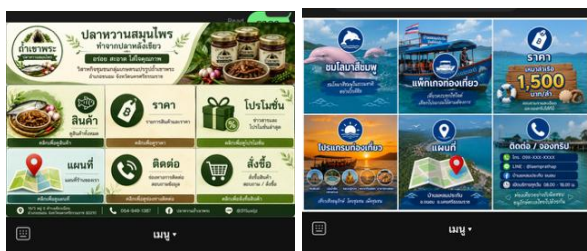


ภาพที่ 4 แสดงตัวอย่างส่วนติดต่อผู้ใช้ของระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account

จากผลการออกแบบดังกล่าว ได้โครงสร้างส่วนติดต่อผู้ใช้ที่เชื่อมโยงข้อมูลและบริการของวิสาหกิจชุมชนผ่าน LINE Official Account โดยมี Rich Menu เป็นจุดเชื่อมโยงหลัก และมีการจัดหมวดหมู่ข้อมูลให้สอดคล้องกับลักษณะการดำเนินงานของวิสาหกิจชุมชนแต่ละแห่ง ผลการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้นี้จึงถูกนำไปใช้เป็นองค์ประกอบของระบบในขั้นตอนการพัฒนาและทดสอบระบบต่อไป

5.2.3 การออกแบบโครงสร้างเมนูบริการ (Rich Menu Structure Design) จากผลการวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งาน พบว่า การเข้าถึงข้อมูลและบริการของวิสาหกิจชุมชนจำเป็นต้องมีโครงสร้างเมนูที่จัดหมวดหมู่ข้อมูลอย่างชัดเจน ผู้วิจัยจึงออกแบบ Rich Menu ให้เป็นจุดเชื่อมโยงหลักของการเข้าถึงบริการภายใน LINE Official Account โดยกำหนดเมนูหลัก ได้แก่ ข้อมูลวิสาหกิจชุมชน ผลิตภัณฑ์และบริการ ข้อมูลการท่องเที่ยว ข่าวสารและกิจกรรม และช่องทางการติดต่อ ทั้งนี้ แต่ละเมนูได้รับการกำหนดเส้นทางเชื่อมโยงไปยังข้อมูลหรือบริการที่เกี่ยวข้องตามหมวดหมู่ที่กำหนด เพื่อให้โครงสร้างการเข้าถึงบริการมีลำดับที่ชัดเจนและสอดคล้องกับข้อกำหนดของระบบจากระยะการวิเคราะห์ความต้องการ การออกแบบ Rich Menu ใช้ข้อความและสัญลักษณ์ (Icons) ที่สื่อความหมายสัมพันธ์

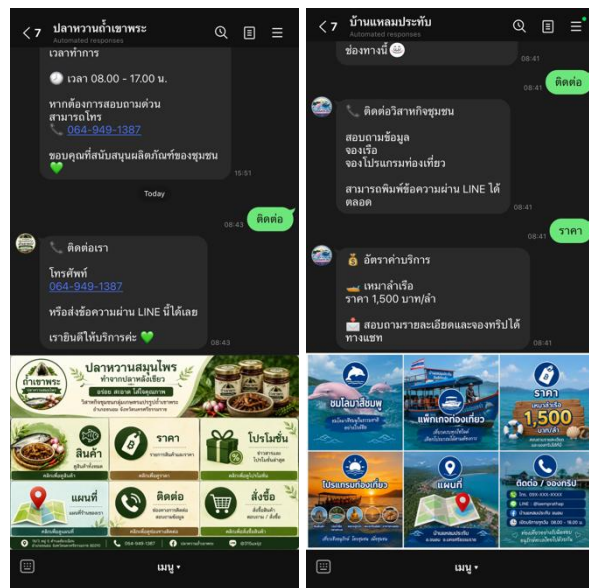
กับประเภทของบริการ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถระบุและเลือกบริการที่ต้องการจากเมนูหลักได้อย่างชัดเจน โดยโครงสร้างเมนูของวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่งใช้หลักการจัดหมวดหมู่ในลักษณะเดียวกัน แต่ปรับรายละเอียดของเมนูและเนื้อหาให้สอดคล้องกับลักษณะการดำเนินงานของแต่ละวิสาหกิจชุมชน โดยเมนูที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์และบริการจะเน้นข้อมูลของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มเกษตรแปรรูปถ้าเขาพระ ขณะที่เมนูด้านการท่องเที่ยวจะเน้นข้อมูลกิจกรรมและบริการของวิสาหกิจชุมชนการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์บ้านแหลมประทับ การออกแบบดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดการรับรู้ถึงความสะดวกในการใช้งาน (Perceived Ease of Use: PEOU) ของแบบจำลอง TAM เนื่องจากกำหนดโครงสร้างเมนูและเส้นทางการเข้าถึงบริการให้มีความชัดเจนและสอดคล้องกับประเภทข้อมูลที่ผู้ใช้งานต้องการ ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 โครงสร้าง Rich Menu ของระบบบริการดิจิทัล

5.2.4 การออกแบบการเชื่อมโยงบริการดิจิทัล (Digital Service Integration) จากผลการวิเคราะห์ความต้องการของวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่ง ผู้วิจัยกำหนดให้ระบบสามารถเชื่อมโยงบริการดิจิทัลภายนอกที่เกี่ยวข้องกับการให้ข้อมูลและการติดต่อสื่อสารของวิสาหกิจชุมชนผ่าน LINE Official Account โดยเลือกใช้บริการที่สอดคล้องกับลักษณะการดำเนินงาน ได้แก่ Google Maps สำหรับแสดงข้อมูลตำแหน่งและการนำทาง Facebook สำหรับเชื่อมโยงไปยังข้อมูลและประชาสัมพันธ์เพิ่มเติม หมายเลขโทรศัพท์สำหรับการติดต่อโดยตรง และ Google Forms สำหรับการรับข้อมูลหรือข้อเสนอแนะจากผู้ใช้งาน การออกแบบการเชื่อมโยงบริการดังกล่าวกำหนดให้บริการภายนอกเป็น

ส่วนสนับสนุนการทำงานของระบบ โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกบริการจากเมนูหรือจุดเชื่อมโยงที่กำหนดภายใน LINE Official Account แล้วเข้าสู่บริการที่เกี่ยวข้องตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น การเลือกข้อมูลสถานที่เพื่อเชื่อมต่อไปยัง Google Maps การเลือกช่องทางประชาสัมพันธ์เพื่อเข้าสู่ Facebook หรือการเลือกช่องทางติดต่อเพื่อโทรศัพท์หรือส่งข้อมูลผ่าน Google Forms ทั้งนี้การกำหนดเส้นทางการเชื่อมโยงพิจารณาจากประเภทของข้อมูลและบริการที่ผู้ใช้งานต้องการเข้าถึง เพื่อให้โครงสร้างการให้บริการมีความสอดคล้องกับข้อกำหนดของระบบจากระยะการวิเคราะห์ความต้องการ ในด้านการจัดให้บริการที่เกี่ยวข้องอยู่ภายใต้จุดเชื่อมโยงของ LINE Official Account และกำหนดเส้นทางการเข้าถึงตามประเภทของบริการ โดยผลการออกแบบการเชื่อมโยงบริการดิจิทัลแสดงดังภาพที่ 6



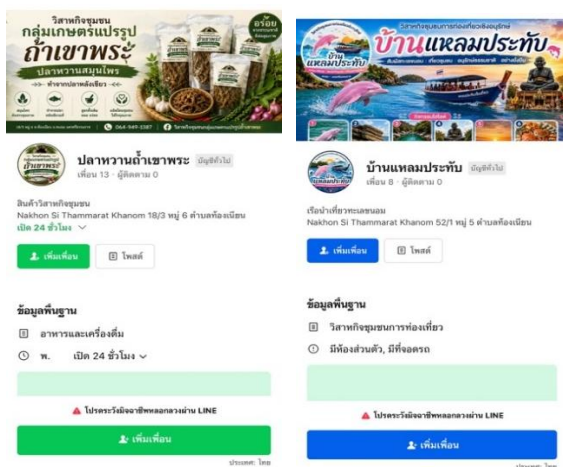
ภาพที่ 6 การเชื่อมโยงบริการดิจิทัลของระบบผ่าน LINE Official Account

5.3 ผลการพัฒนาระบบ (System Development)

หลังจากดำเนินการออกแบบระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account ตามผลการวิเคราะห์ความต้องการและการออกแบบสถาปัตยกรรมระบบในระยะ System Design ผู้วิจัยได้นำข้อกำหนดของระบบและแบบออกแบบที่ได้จาก

กระบวนการดังกล่าวมาพัฒนาเป็นระบบบริการดิจิทัลที่สามารถนำไปใช้งานจริงกับวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่ง โดยใช้ LINE Official Account เป็นแพลตฟอร์มหลัก และเชื่อมโยงกับบริการดิจิทัลที่กำหนดไว้ในสถาปัตยกรรมระบบเพื่อรองรับการนำเสนอข้อมูล การประชาสัมพันธ์ การติดต่อสื่อสาร และการให้บริการของวิสาหกิจชุมชน ผลการพัฒนาระบบประกอบด้วย 4 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ (1) การพัฒนาส่วนติดต่อผู้ใช้ (2) การพัฒนาฟังก์ชันการให้บริการ (3) การเชื่อมโยงบริการดิจิทัลภายนอก และ (4) ภาพรวมของระบบที่พัฒนา โดยแต่ละองค์ประกอบเป็นผลจากการนำข้อกำหนดของระบบในระยะ Requirement Analysis และผลการออกแบบในระยะ System Design มาดำเนินการพัฒนาตามกระบวนการ SDLC รายละเอียดดังต่อไปนี้

5.3.1 การพัฒนาส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface Development) ผู้วิจัยได้นำผลการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้และโครงสร้างเมนูจากระยะ System Design มาพัฒนาเป็นส่วนติดต่อผู้ใช้จริงบนแพลตฟอร์ม LINE Official Account โดยประกอบด้วยหน้าหลัก (Home) และ Rich Menu ซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นในการเข้าถึงข้อมูลและบริการของระบบ ทั้งนี้ การจัดวางองค์ประกอบของส่วนติดต่อผู้ใช้ได้รับการพัฒนาให้สอดคล้องกับโครงสร้างข้อมูลและประเภทบริการที่กำหนดไว้สำหรับวิสาหกิจชุมชนแต่ละแห่ง ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ตัวอย่างส่วนติดต่อผู้ใช้ของระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account

จากผลการพัฒนา พบว่าส่วนติดต่อผู้ใช้ของวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่งมีโครงสร้างการนำเสนอข้อมูลในลักษณะเดียวกัน แต่มีการปรับองค์ประกอบด้านสี สัญลักษณ์ และภาพประกอบให้สอดคล้องกับอัตลักษณ์และลักษณะการดำเนินงานของแต่ละวิสาหกิจชุมชน โดยวิสาหกิจชุมชนกลุ่มเกษตรแปรรูปถ้าเขาพระใช้โทนสีเขียวเป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะผลิตภัณฑ์ปลาที่เกี่ยวข้องกับสมุนไพรและสุขภาพ ขณะที่วิสาหกิจชุมชนการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์บ้านแหลมประทับใช้โทนสีฟ้าเป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อสื่อถึงบริบทการท่องเที่ยวทางทะเล ผลการพัฒนาส่วนนี้ จึงสะท้อนการนำข้อกำหนดด้านข้อมูลและการนำเสนอของวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่งมาปรับใช้เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้ที่แตกต่างกันตามบริบท โดยยังคงโครงสร้างการเข้าถึงบริการที่สอดคล้องกัน

5.3.2 การพัฒนาฟังก์ชันการให้บริการ (Service Functions Development) จากสถาปัตยกรรมระบบและข้อกำหนดที่ได้จากระยะ Requirement Analysis ผู้วิจัยได้พัฒนาฟังก์ชันการให้บริการบน LINE Official Account ให้สอดคล้องกับประเภทข้อมูลและลักษณะการดำเนินงานของวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่ง โดยประกอบด้วยข้อมูลวิสาหกิจชุมชน ผลิตภัณฑ์และบริการ ข้อมูลการท่องเที่ยว ข่าวสารและกิจกรรม รวมถึงช่องทางการติดต่อ ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้งานผ่าน Rich Menu ได้โดยตรง สำหรับวิสาหกิจชุมชนกลุ่มเกษตรแปรรูปถ้าเขาพระ ระบบนำเสนอข้อมูลผลิตภัณฑ์ รายละเอียดสินค้า และข้อมูลการติดต่อเพื่อสนับสนุนการประชาสัมพันธ์และการสั่งซื้อ ขณะที่วิสาหกิจชุมชนการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์บ้านแหลมประทับ ระบบนำเสนอข้อมูลโปรแกรมการท่องเที่ยว สถานที่ท่องเที่ยว และกิจกรรมต่าง ๆ เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้บริการได้อย่างเหมาะสม การพัฒนาฟังก์ชันดังกล่าวช่วยรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นไว้ในแพลตฟอร์มเดียว ลดข้อจำกัดของการเผยแพร่ข้อมูลผ่านข้อความทั่วไป และเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารระหว่างวิสาหกิจชุมชนกับผู้ใช้งาน ผลดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ฟังก์ชันการให้บริการของระบบผ่าน LINE Official Account

ผลการพัฒนาฟังก์ชันดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถจัดหมวดหมู่ข้อมูลและบริการให้แตกต่างกันตามบริบทของวิสาหกิจชุมชนแต่ละแห่ง ขณะที่ยังคงใช้โครงสร้างบริการบนแพลตฟอร์ม LINE Official Account ในรูปแบบเดียวกัน ทำให้สามารถนำแนวทางการออกแบบเดียวกันไปปรับใช้กับบริบทของวิสาหกิจชุมชนที่มีลักษณะการดำเนินงานแตกต่างกันได้

5.3.3 การเชื่อมโยงบริการดิจิทัลภายนอก (Digital Service Integration) ผู้วิจัยได้นำผลการออกแบบการเชื่อมโยงบริการดิจิทัลในระยะ System Design มาพัฒนาให้ระบบสามารถเชื่อมโยงไปยังบริการภายนอกที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ Google Maps สำหรับข้อมูลตำแหน่งและการนำทาง Facebook สำหรับข้อมูลและการประชาสัมพันธ์เพิ่มเติม หมายเลขโทรศัพท์สำหรับการติดต่อโดยตรง และ Google Forms สำหรับการรับข้อมูลหรือข้อเสนอแนะจากผู้ใช้งาน ดังภาพที่ 9

ภาพที่ 9 การเชื่อมโยงบริการดิจิทัลภายนอกของระบบ

ผลการพัฒนาส่วนนี้ทำให้ LINE Official Account สามารถทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมโยงไปยังบริการดิจิทัลที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานของวิสาหกิจชุมชน โดยกำหนดเส้นทางการเข้าถึงให้สัมพันธ์กับประเภทของบริการ เช่น การเชื่อมโยงข้อมูลสถานที่ไปยัง Google Maps การเชื่อมโยงข้อมูลประชาสัมพันธ์ไปยัง Facebook การติดต่อผ่านหมายเลขโทรศัพท์ ทั้งนี้ บริการภายนอกดังกล่าวทำหน้าที่เป็นส่วนสนับสนุนระบบตามโครงสร้างสถาปัตยกรรมที่ออกแบบไว้

5.3.4 ภาพรวมของระบบบริการที่พัฒนา ผลการพัฒนาระบบแสดงให้เห็นว่า ระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account สามารถนำข้อกำหนดและแบบออกแบบจากระยะก่อนหน้ามาพัฒนาเป็นระบบที่ประกอบด้วยส่วนติดต่อผู้ใช้ โครงสร้าง Rich Menu ฟังก์ชันการให้บริการ และการเชื่อมโยงบริการดิจิทัลภายนอก โดย Rich Menu ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมโยงหลักไปยังข้อมูลวิสาหกิจชุมชน ผลิตภัณฑ์และบริการ ข้อมูลการท่องเที่ยว ข่าวสาร ช่องทางการติดต่อ และบริการดิจิทัลที่เกี่ยวข้อง เมื่อพิจารณาผลการพัฒนาระบบในภาพรวม พบว่าองค์ประกอบของระบบที่พัฒนาขึ้นสอดคล้องกับข้อกำหนดที่กำหนดจากระยะ Requirement Analysis และสามารถนำไปใช้งานกับวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่งที่มีลักษณะการดำเนินงาน

แตกต่างกันได้ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นถูกนำเข้าสู่ขั้นตอนการประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ และหลังจากปรับปรุงตามข้อเสนอแนะแล้วจึงนำไปประเมินการยอมรับของผู้ใช้งานจริงในขั้นตอนถัดไป

5.4 ผลการประเมินคุณภาพของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ (Expert Evaluation) หลังจากพัฒนาระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account แล้ว ผู้วิจัยได้นำระบบที่พัฒนาขึ้นไปประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ จำนวน 3 ท่าน เพื่อประเมินความเหมาะสมของระบบก่อนนำไปประเมินการยอมรับจากกลุ่มผู้ใช้งานจริง การประเมินครอบคลุม 4 ด้าน ได้แก่ (1) ด้านการทำงานของระบบ (Functional Requirements) (2) ด้านการใช้งาน (Usability) (3) ด้านการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface Design) และ (4) ด้านคุณภาพโดยรวมของระบบ (Overall System Quality) โดยใช้แบบประเมินมาตรฐานประมาณค่า 5 ระดับ (Rating Scale) ผลการประเมินแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลการประเมินของผู้เชี่ยวชาญ

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	ระดับ
ด้านการทำงานของระบบ	4.67	0.47	มากที่สุด
ด้านการใช้งาน (Usability)	4.67	0.47	มากที่สุด
ด้านการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้	4.33	0.58	มาก
ด้านคุณภาพโดยรวมของระบบ	4.67	0.47	มากที่สุด
รวม	4.59	0.17	มากที่สุด

จากตารางที่ 3 พบว่า ผู้เชี่ยวชาญประเมินคุณภาพของระบบโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.59 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.17 เมื่อพิจารณารายด้าน พบว่า ด้านการทำงานของระบบ ด้านการใช้งาน และด้านคุณภาพโดยรวมของระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.67 อยู่ในระดับมากที่สุด ขณะที่ด้านการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้มีค่าเฉลี่ย 4.33 อยู่ในระดับมาก ซึ่งเป็นด้านที่มีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบอื่น ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า จุดแข็งของระบบที่ได้รับการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญอยู่ที่ด้านการทำงาน การใช้งาน และคุณภาพ

โดยรวมของระบบ ขณะที่ด้านการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ยังเป็นองค์ประกอบที่ควรได้รับการปรับปรุงเพิ่มเติม โดยผลการประเมินด้านนี้สอดคล้องกับข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญที่เสนอให้ปรับปรุงการแสดงผล การจัดวางองค์ประกอบของส่วนติดต่อผู้ใช้ และการนำเสนอข้อมูล ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำข้อเสนอแนะดังกล่าวไปใช้ในการปรับปรุงระบบก่อนนำไปประเมินการยอมรับเทคโนโลยีกับกลุ่มผู้ใช้งานจริง การนำผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญไปใช้ในการปรับปรุงระบบดังกล่าวเป็นขั้นตอนสำคัญของกระบวนการพัฒนาระบบเนื่องจากทำให้ผลการประเมินไม่ได้ถูกใช้เพียงเพื่อรายงานระดับคุณภาพของระบบ แต่ยังถูกนำกลับไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับการปรับปรุงระบบก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการประเมินกับผู้ใช้งานจริง ซึ่งสอดคล้องกับกระบวนการทดสอบและปรับปรุงระบบ (Testing and Refinement) ตามกรอบ SDLC ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

5.5 ผลการประเมินการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งาน (Technology Acceptance Evaluation) ภายหลังจากการปรับปรุงระบบตามข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ ผู้วิจัยได้นำระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account ไปทดลองใช้กับผู้ใช้งานจริง จำนวน 60 คน ประกอบด้วยสมาชิกวิสาหกิจชุมชน ลูกค้า และนักท่องเที่ยว เพื่อประเมินการยอมรับเทคโนโลยีตามแบบจำลอง Technology Acceptance Model (TAM) ของ Davis [1] [2] โดยแบบสอบถามประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ ได้แก่ (1) การรับรู้ถึงประโยชน์ของระบบ (Perceived Usefulness: PU) จำนวน 3 ข้อ (2) การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (Perceived Ease of Use: PEOU) จำนวน 3 ข้อ (3) ทศคติต่อการใช้งาน (Attitude Toward Using) จำนวน 2 ข้อ และ (4) ความตั้งใจในการใช้งาน (Behavioral Intention to Use: BI) จำนวน 3 ข้อ รวมทั้งสิ้น 11 ข้อ โดยใช้มาตราประมาณค่า 5 ระดับ ผลการประเมิน ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการประเมินการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งาน
ตามแบบจำลอง TAM

ด้านการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	ระดับความคิดเห็น
1.การรับรู้ถึงประโยชน์ของระบบ (PU)	4.70	0.46	มากที่สุด
2.การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (PEOU)	4.67	0.48	มากที่สุด
3.ความตั้งใจในการใช้งาน (BI)	4.62	0.49	มากที่สุด
4.ทัศนคติต่อการใช้งาน (Attitude)	4.57	0.50	มากที่สุด
รวม	4.64	0.48	มากที่สุด

จากตารางที่ 4 พบว่า ผู้ใช้งานมีการยอมรับระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account โดยรวมอยู่ในระดับ มากที่สุด ($\bar{X} = 4.64$, S.D. = 0.48) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่า ทุกด้านมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด โดยด้านการรับรู้ถึงประโยชน์ของระบบ (Perceived Usefulness) มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด ($\bar{X} = 4.70$, S.D. = 0.46) รองลงมา ได้แก่ การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (Perceived Ease of Use) ($\bar{X} = 4.67$, S.D. = 0.48) ความตั้งใจในการใช้งาน (Behavioral Intention to Use) และทัศนคติต่อการใช้งาน ตามลำดับ

ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ผู้ใช้งานให้ความสำคัญกับประโยชน์ที่ได้รับจากระบบมากที่สุด โดยเฉพาะความสามารถของระบบในการรวบรวมและนำเสนอข้อมูลของวิสาหกิจชุมชน ผลิตภัณฑ์และบริการ ข่าวสาร และช่องทางการติดต่อผ่านโครงสร้างบริการเดียว ผลการประเมินด้านการรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (PEOU) ที่อยู่ในระดับมากที่สุดยังสอดคล้องกับการออกแบบระบบที่ใช้โครงสร้าง Rich Menu และการจัดหมวดหมู่บริการอย่างชัดเจน ขณะที่ค่าความตั้งใจในการใช้งาน (BI) ในระดับมากที่สุดสะท้อนว่าผู้ใช้งานมีความตั้งใจที่จะใช้ระบบต่อไปภายหลังจากทดลองใช้งาน อย่างไรก็ตาม ค่าเฉลี่ยเพียงอย่างเดียวสามารถสะท้อนระดับความคิดเห็นของผู้ใช้งาน

แต่ยังไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของการยอมรับเทคโนโลยีของผู้ใช้งานตามแบบจำลอง TAM ได้ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้วย ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) เพื่อพิจารณาทิศทางและระดับความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของแบบจำลอง TAM จากข้อมูลผู้ใช้งานทั้ง 60 คน ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของแบบจำลอง TAM

ตัวแปร	PU	PEOU	Attitude	BI
PU	1	.974	.715	.881
PEOU	.974	1	.744	.925
Attitude	.715	.744	1	.874
BI	.881	.925	.874	1

หมายเหตุ: **p < .001

จากตารางที่ 5 พบว่าองค์ประกอบของแบบจำลอง TAM ทุกคู่มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ p < .001 โดยความสัมพันธ์ระหว่างการรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (PEOU) กับความตั้งใจในการใช้งาน (BI) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูง (r = .925) ขณะที่การรับรู้ถึงประโยชน์ (PU) กับความตั้งใจในการใช้งาน (BI) มีความสัมพันธ์ในระดับสูงเช่นกัน (r = .881) และทัศนคติต่อการใช้งาน (Attitude) กับความตั้งใจในการใช้งาน (BI) มีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูง (r = .874) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้านการรับรู้ พบว่า PU และ PEOU มีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก (r = .974, p < .001) ขณะที่ทั้ง PU และ PEOU มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ Attitude โดยมีค่า r เท่ากับ .715 และ .744 ตามลำดับ ผลดังกล่าวสะท้อนว่าในกลุ่มผู้ใช้งานที่ศึกษา การรับรู้ถึงประโยชน์และการรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งานมีความสัมพันธ์กับทัศนคติและความตั้งใจในการใช้งานระบบในทิศทางเดียวกัน

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสอดคล้องกับกรอบแนวคิดแบบจำลอง TAM ที่ใช้ในการวิจัย โดยเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่าง PU และ PEOU กับ BI ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่สะท้อนการยอมรับและความตั้งใจในการใช้ระบบ ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์เป็นการแสดง ความสัมพันธ์ทางสถิติ ของตัวแปรจากกลุ่มตัวอย่างที่ศึกษา ไม่ควรตีความว่าเป็นความสัมพันธ์เชิงสาเหตุโดยตรง เมื่อเชื่อมโยงผลการประเมินกับผลการออกแบบและพัฒนาระบบ พบว่าองค์ประกอบของระบบที่เน้นการรวบรวมข้อมูลและบริการไว้ภายใน LINE Official Account สอดคล้องกับค่า PU ที่มีระดับสูงที่สุด ขณะที่การออกแบบ Rich Menu และการจัดหมวดหมู่บริการที่ชัดเจนสอดคล้องกับระดับ PEOU ที่อยู่ในระดับมากที่สุด ผลดังกล่าวจึงแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องระหว่างข้อกำหนดของผู้ใช้งาน → การออกแบบระบบ → ผลการรับรู้ของผู้ใช้งานตามแบบจำลอง TAM

6. สรุปผลและอภิปรายผล

จากการออกแบบและพัฒนาระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account สำหรับวิสาหกิจชุมชนกลุ่มเกษตรแปรรูปถั่วเขาพระ และวิสาหกิจชุมชนการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์บ้านแหลมประทับ โดยประยุกต์ใช้กระบวนการพัฒนาระบบตามแนวคิด System Development Life Cycle (SDLC) และใช้ Technology Acceptance Model (TAM) เป็นกรอบในการประเมินการยอมรับของผู้ใช้งาน สามารถสรุปและอภิปรายผลการวิจัยได้ดังนี้

6.1 สรุปผล ผลการวิจัย พบว่า ผู้วิจัยสามารถพัฒนาระบบบริการดิจิทัลผ่าน LINE Official Account สำหรับวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่ง โดยนำผลการศึกษาปัญหาและความต้องการของผู้ให้ข้อมูลมาพัฒนาเป็นข้อกำหนดของระบบ และดำเนินการออกแบบและพัฒนาตามกระบวนการ SDLC ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยข้อมูลวิสาหกิจชุมชน ผลิตภัณฑ์และบริการ ข้อมูลการท่องเที่ยว ข่าวสารและกิจกรรม ช่องทางการติดต่อ และการเชื่อมโยงบริการดิจิทัลภายนอก โดยปรับรูปแบบข้อมูลและการนำเสนอให้สอดคล้องกับบริบทของวิสาหกิจชุมชนแต่ละแห่ง

ผลการประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ จำนวน 3 คน พบว่า คุณภาพของระบบโดยรวมอยู่ในระดับ มากที่สุด ($\bar{X} = 4.59$, S.D. = 0.17) โดยด้านการทำงานของระบบ ด้านการใช้งาน และด้านคุณภาพโดยรวมของระบบมีค่าเฉลี่ย 4.67 อยู่ในระดับมากที่สุด ขณะที่ด้านการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้มีค่าเฉลี่ย 4.33 อยู่ในระดับมาก ซึ่งเป็นด้านที่มีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุด ผู้วิจัยจึงนำเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับการแสดงผล การจัดวางองค์ประกอบ และการนำเสนอข้อมูลไปใช้ในการปรับปรุงระบบก่อนนำไปประเมินกับผู้ใช้งานจริง ภายหลังการปรับปรุงระบบ ผลการประเมินการยอมรับเทคโนโลยีจากผู้ใช้งาน จำนวน 60 คน ตามองค์ประกอบของแบบจำลอง TAM พบว่า ทุกองค์ประกอบมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด โดย การรับรู้ถึงประโยชน์ของระบบ (PU) มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด ($\bar{X} = 4.70$, S.D. = 0.46) รองลงมาคือ การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (PEOU) ($\bar{X} = 4.67$, S.D. = 0.48) ความตั้งใจในการใช้งาน (BI) ($\bar{X} = 4.62$, S.D. = 0.49) และทัศนคติต่อการใช้งาน (Attitude) ($\bar{X} = 4.57$, S.D. = 0.50) ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของ TAM ด้วย Pearson's Correlation พบว่า ทุกองค์ประกอบมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < .001$ โดยเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างการรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งานกับความตั้งใจในการใช้งาน ($r = .925$) การรับรู้ถึงประโยชน์กับความตั้งใจในการใช้งาน ($r = .881$) และทัศนคติต่อการใช้งานกับความตั้งใจในการใช้งาน ($r = .874$) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของ TAM ที่ศึกษาในครั้งนี้มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันในกลุ่มผู้ใช้งานที่ศึกษา

โดยสรุป ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถนำข้อกำหนดจากบริบทของวิสาหกิจชุมชนมาพัฒนาเป็นบริการดิจิทัลบน LINE Official Account และผ่านการประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญก่อนนำไปประเมินกับผู้ใช้งานจริง ผลการประเมินการยอมรับและความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของ TAM สะท้อนว่าผู้ใช้งานมีการรับรู้และทัศนคติเชิงบวกต่อระบบในบริบทของกรณีศึกษาที่ทำการวิจัย

6.2 อภิปรายผลการวิจัย มีประเด็นดังต่อไปนี้

ประเด็นที่ 1 การพัฒนาระบบตาม SDLC และการตอบสนองต่อบริบทของวิสาหกิจชุมชน ผลการวิจัย พบว่า การนำกระบวนการ SDLC มาใช้ในการวิเคราะห์ความต้องการ ออกแบบ พัฒนา ทดสอบ และปรับปรุงระบบ ทำให้สามารถพัฒนาระบบบริการดิจิทัลที่สอดคล้องกับบริบทของวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่ง แม้ว่าวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่งจะมีลักษณะการดำเนินงานแตกต่างกัน โดยแห่งหนึ่งเน้นผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูป ขณะที่อีกแห่งเน้นบริการท่องเที่ยว แต่สามารถใช้โครงสร้างบริการดิจิทัลบนแพลตฟอร์มเดียวกัน และปรับเนื้อหาให้เหมาะสมกับลักษณะของแต่ละวิสาหกิจชุมชนได้ ข้อค้นพบดังกล่าวสะท้อนความสำคัญของการเริ่มต้นพัฒนาระบบจากการศึกษาปัญหาและความต้องการของผู้ใช้งานก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการออกแบบและพัฒนา โดยข้อมูลจากการสัมภาษณ์และการสังเกตถูกนำมาวิเคราะห์เชิงเนื้อหาและใช้กำหนด System Requirements ส่งผลให้โครงสร้างบริการที่พัฒนาขึ้นมีความเชื่อมโยงกับบริบทการดำเนินงานจริงของวิสาหกิจชุมชน ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญซึ่งมีค่าเฉลี่ยรวม 4.59 อยู่ในระดับมากที่สุด จึงสนับสนุนว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมในองค์ประกอบที่นำมาประเมิน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ ณัฐกร สีดา และคณะ [12] ที่พัฒนาช่องทางการขายผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วย LINE Official Account และพบว่าการพัฒนาระบบจากปัญหาและความต้องการของผู้ใช้งานมีส่วนช่วยให้ระบบสอดคล้องกับบริบทของกลุ่มเป้าหมาย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยครั้งนี้มีลักษณะที่แตกต่างออกไป โดยไม่ได้มุ่งเฉพาะช่องทางการจำหน่ายสินค้า แต่พัฒนาโครงสร้างบริการที่ครอบคลุมทั้งข้อมูลวิสาหกิจชุมชน ผลิตภัณฑ์และบริการ ข้อมูลการท่องเที่ยว ข่าวสาร ช่องทางการติดต่อ และบริการดิจิทัลภายนอก ทำให้ LINE Official Account ถูกนำมาใช้ในลักษณะของระบบบริการดิจิทัลสำหรับบริบทของวิสาหกิจชุมชน

ประเด็นที่ 2 การรับรู้ถึงประโยชน์ของระบบเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการยอมรับเทคโนโลยีมากที่สุด ผลการประเมินพบว่า การรับรู้ถึงประโยชน์ของระบบ (Perceived Usefulness: PU) มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด ($\bar{X} = 4.70$, S.D. = 0.46)

ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าผู้ใช้งานในกลุ่มที่ศึกษารับรู้วาระบบมีประโยชน์ต่อการเข้าถึงข้อมูลและบริการของวิสาหกิจชุมชน โดยเฉพาะการรวบรวมข้อมูลผลิตภัณฑ์ บริการ ข่าวสาร การท่องเที่ยว และช่องทางการติดต่อไว้ในระบบเดียว ผลดังกล่าวสามารถอธิบายได้ตามแนวคิดของ Davis [1] และ Davis, Bagozzi และ Warshaw [2] ซึ่งให้ความสำคัญกับการรับรู้ถึงประโยชน์ในฐานะองค์ประกอบสำคัญของการยอมรับเทคโนโลยี และสอดคล้องกับงานวิจัยของ ธัญญรัตน์ ไชยวงศ์ และคณะ [13] ที่พัฒนาระบบ Chatbot ผ่าน LINE Official Account สำหรับการท่องเที่ยวและพบว่าการนำเสนอข้อมูลผ่านช่องทางดิจิทัลที่เข้าถึงได้สะดวกช่วยให้ผู้ใช้งานรับรู้ถึงประโยชน์ของระบบในระดับสูง สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ ผลดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับลักษณะการออกแบบระบบที่รวบรวมบริการหลายประเภทไว้ภายใต้ LINE Official Account โดยเฉพาะการเชื่อมโยงข้อมูลผลิตภัณฑ์หรือบริการ ข้อมูลการท่องเที่ยว และบริการภายนอก เช่น Google Maps และ Facebook จึงทำให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับความต้องการของตนเองจากจุดเชื่อมโยงเดียว

ประเด็นที่ 3 การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งานของระบบ ผลการประเมินพบว่า การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (Perceived Ease of Use: PEOU) มีค่าเฉลี่ย 4.67 (S.D. = 0.48) อยู่ในระดับมากที่สุด สะท้อนว่าผู้ใช้งานในกลุ่มที่ศึกษารับรู้วาระบบสามารถเรียนรู้และใช้งานได้โดยไม่ซับซ้อน ผลดังกล่าวสัมพันธ์กับแนวทางการออกแบบระบบที่ใช้ Rich Menu เป็นจุดเชื่อมโยงหลัก และแบ่งข้อมูลออกเป็นหมวดหมู่ตามประเภทบริการ ทำให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกเข้าสู่ข้อมูลที่ต้องการจากโครงสร้างเมนูที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ การใช้ LINE Official Account เป็นแพลตฟอร์มหลักยังทำให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงระบบผ่านแพลตฟอร์มที่คุ้นเคยอยู่แล้ว ข้อค้นพบนี้สอดคล้องกับแนวคิดของ Venkatesh และ Davis [14] ที่อธิบายความสำคัญของความง่ายในการใช้งานต่อการรับรู้และการยอมรับเทคโนโลยี และสอดคล้องกับ Venkatesh และคณะ [15] ที่ให้ความสำคัญกับความคาดหวังด้านความพยายามในการใช้งานเทคโนโลยี อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยครั้งนี้

นี้ควรตีความในขอบเขตของกลุ่มผู้ใช้งานที่ศึกษา และไม่ได้หมายความว่าผู้ใช้งานทุกกลุ่มจะมีการรับรู้ในลักษณะเดียวกัน

ประเด็นที่ 4 ความตั้งใจในการใช้งานของผู้ใช้งาน ผลการประเมินพบว่า ความตั้งใจในการใช้งาน (Behavioral Intention: BI) มีค่าเฉลี่ย 4.62 (S.D. = 0.49) อยู่ในระดับมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้งานกลุ่มที่ศึกษาแสดงความตั้งใจที่จะใช้งานระบบในระดับสูงภายหลังจากได้ทดลองใช้ระบบ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิด TAM ที่ให้ความสำคัญกับความตั้งใจในการใช้งานเป็นองค์ประกอบสำคัญของการยอมรับเทคโนโลยี โดยในงานวิจัยครั้งนี้ ความตั้งใจในการใช้งานมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการรับรู้ถึงประโยชน์ ($r = .881$, $p < .001$) การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน ($r = .925$, $p < .001$) และทัศนคติต่อการใช้งาน ($r = .874$, $p < .001$) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ในกลุ่มผู้ใช้งานที่ศึกษา ผู้ที่มีระดับการรับรู้ถึงประโยชน์ การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน และทัศนคติต่อระบบในระดับสูง มีแนวโน้มที่จะมีความตั้งใจในการใช้งานระบบในระดับสูงเช่นกัน ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์ทางสถิติ และไม่ ควรตีความ เป็นความสัมพันธ์เชิงสาเหตุ และเมื่อผู้ใช้งานรู้ว่าจะมีประโยชน์ใช้งานง่าย และอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการใช้งาน จะส่งผลให้เกิดความตั้งใจในการใช้งานในระยะยาว [2], [14]

นอกจากนี้ ยังมีทิศทางเดียวกับงานวิจัยด้านการพัฒนา LINE Chatbot สำหรับวิสาหกิจชุมชน ซึ่งรายงานว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในทุกด้านอยู่ในระดับมากที่สุด และเห็นว่าแพลตฟอร์มดังกล่าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารและขยายโอกาสทางการตลาดของชุมชนได้อย่างมีนัยสำคัญ

ประเด็นที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของแบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี ผลการวิเคราะห์ Pearson's Correlation พบว่าองค์ประกอบของแบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี ทุกคู่มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < .001$ โดย PEOU มีความสัมพันธ์กับ BI สูงที่สุด ($r = .925$) รองลงมาคือ PU กับ BI ($r = .881$) และ Attitude กับ BI ($r = .874$) ขณะที่ PU กับ PEOU มีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมาก ($r = .974$) ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับแนวคิดพื้นฐานของ TAM ที่มองว่าการรับรู้

เกี่ยวกับประโยชน์และความง่ายในการใช้งานมีความเกี่ยวข้องกับการยอมรับและความตั้งใจในการใช้งานเทคโนโลยี อย่างไรก็ตาม งานวิจัยครั้งนี้ใช้การวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพื่อศึกษาทิศทางและระดับความสัมพันธ์ของตัวแปร จึงสามารถกล่าวได้เฉพาะว่าองค์ประกอบดังกล่าวมีความสัมพันธ์กันในกลุ่มผู้ใช้งานที่ศึกษา ไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์เชิงเหตุและผลได้ เมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการพัฒนาระบบ พบว่าองค์ประกอบของระบบที่ออกแบบให้เข้าถึงข้อมูลผ่าน Rich Menu และจัดหมวดหมู่บริการอย่างชัดเจนมีความสอดคล้องกับผลการประเมินทั้งด้าน PU และ PEOU ขณะที่ผลการประเมิน BI และความสัมพันธ์กับองค์ประกอบอื่นของ TAM สะท้อนว่าผู้ใช้งานมีการรับรู้ต่อระบบในทิศทางเดียวกันกับโครงสร้างแนวคิดที่นำมาใช้ในการประเมิน

จากผลการวิจัยครั้งนี้ งานวิจัยได้นำ LINE Official Account มาประยุกต์ใช้เป็นแพลตฟอร์มบริการดิจิทัลสำหรับวิสาหกิจชุมชน โดยบูรณาการข้อมูลวิสาหกิจชุมชน ผลิตภัณฑ์และบริการ ข้อมูลการท่องเที่ยว ข่าวสาร ช่องทางการติดต่อและบริการดิจิทัลภายนอกไว้ภายใต้โครงสร้างบริการเดียว และพัฒนาระบบตามกระบวนการ System Development Life Cycle (SDLC) จากการวิเคราะห์บริบทและความต้องการของวิสาหกิจชุมชนทั้งสองแห่ง ก่อนประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญและการยอมรับของผู้ใช้งานตามกรอบ Technology Acceptance Model (TAM) ผลการวิจัยจึงนำเสนอแนวทางการออกแบบและพัฒนาระบบบริการดิจิทัลที่เชื่อมโยงกระบวนการพัฒนาระบบกับการประเมินการยอมรับของผู้ใช้งาน ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้ LINE Official Account ในบริบทของวิสาหกิจชุมชนที่มีลักษณะการดำเนินงานใกล้เคียงกันได้

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะในการวิจัย หน่วยงานหรือวิสาหกิจชุมชนที่มีความประสงค์จะพัฒนาช่องทางบริการดิจิทัลสามารถนำแนวทางการออกแบบและพัฒนา LINE Official Account ตามกระบวนการ System Development Life Cycle (SDLC) ไปพิจารณาประยุกต์ใช้เป็นแนวทางเบื้องต้น

โดยควรเริ่มจากการศึกษาบริบท ปัญหา และความต้องการของผู้ใช้งานก่อนกำหนดโครงสร้างและรูปแบบการให้บริการ เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะผลิตภัณฑ์ บริการ และกลุ่มผู้ใช้งานของแต่ละวิสาหกิจชุมชน ผลจากการพัฒนาระบบในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า LINE Official Account สามารถใช้เป็นช่องทางสำหรับรวบรวมและนำเสนอข้อมูลผลิตภัณฑ์ บริการ ข่าวสาร และช่องทางการติดต่อไว้ในช่องทางเดียว ช่วยอำนวยความสะดวกในการสื่อสารและการให้ข้อมูลแก่ลูกค้าหรือผู้ให้บริการ ทั้งนี้ การนำแนวทางดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ควรปรับรูปแบบเมนู เนื้อหา และบริการให้เหมาะสมกับบริบทของแต่ละพื้นที่ รวมทั้งควรกำหนดผู้รับผิดชอบในการดูแลและปรับปรุงข้อมูลให้มีความถูกต้องและเป็นปัจจุบันอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ระบบสามารถใช้งานได้เหมาะสมและเกิดประโยชน์ต่อการให้บริการ

7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป การวิจัยครั้งต่อไปควรขยายการศึกษาจากกรณีศึกษาจำนวน 2 แห่งไปยังวิสาหกิจชุมชนที่มีลักษณะผลิตภัณฑ์ บริการ และบริบทพื้นที่ที่แตกต่างกัน รวมทั้งเพิ่มจำนวนกลุ่มผู้ใช้งานเพื่อเปรียบเทียบการใช้งานและการยอมรับระบบในบริบทที่หลากหลาย และควรมีการติดตามผลการใช้งานในระยะยาว โดยพิจารณาข้อมูลที่สะท้อนการใช้งานจริง เช่น จำนวนผู้ติดตาม อัตราการมีส่วนร่วม (Engagement Rate) ความถี่ในการใช้บริการ ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน และการเข้าถึงข้อมูลของวิสาหกิจชุมชนเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของการใช้งานภายหลังการนำระบบไปใช้จริง นอกจากนี้ การศึกษาด้านการยอมรับเทคโนโลยีในอนาคตอาจประยุกต์ใช้ Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) หรือ UTAUT2 ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการยอมรับและการใช้งานเทคโนโลยีในมิติที่กว้างกว่า TAM โดยพิจารณาปัจจัยเพิ่มเติม เช่น ความคาดหวังด้านประสิทธิภาพ ความคาดหวังด้านความพยายาม อิทธิพลทางสังคม และเงื่อนไขที่เอื้อต่อการใช้งาน เพื่อให้สามารถอธิบายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการยอมรับเทคโนโลยีได้ครอบคลุมมากขึ้น และอาจศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพิ่มเติม เช่น Artificial Intelligence (AI), Chatbot หรือระบบแนะนำสินค้า

และแหล่งท่องเที่ยว (Recommendation System) ตามความเหมาะสมของบริบทและความต้องการของผู้ใช้งาน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบบริการดิจิทัลให้มีรูปแบบการให้บริการที่หลากหลายมากขึ้นในอนาคต

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Davis, F. D. 1989. "Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology," *MIS Quarterly*, 13(3): pp. 319-340. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2307/249008>
- [2] Davis, F. D., Bagozzi, R. P. and Warshaw, P. R. 1989. "User acceptance of computer technology: A comparison of two theoretical models," *Management Science*, 35(8): pp. 982-1003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1287/mnsc.35.8.982>
- [3] Venkatesh, V. and et al. 2003. "User acceptance of information technology: Toward a unified view," *MIS Quarterly*, 27(3): pp. 425-478. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2307/30036540>
- [4] Tongdhamachart, N. and Niyomsilpa, S. 2022. "Mediating effect of digital marketing capability on marketing effectiveness of community enterprises in Nakhon Pathom Province, Thailand," *Jurnal Komunikasi: Malaysian Journal of Communication*, 38(1): pp. 201-220. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17576/JKMJC-2022-3801-11>
- [5] Matman, P. 2024. "Developing LINE BOT to enhancing customer relationship management of local community enterprise in Khlong Khuean District, Chachoengsao Province," *The Journal of Pacific Institute of*

- Management Science*, 10(2): pp. 100-116.
[Online]. Available: <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/pacific/article/view/274121>
(in Thai)
- [6] Sapaso, O. and Sirigraiwan, A. 2024. "The development on information system for monitoring and evaluation on planning and budget via LINE Official Account," *Journal for Developing the Social and Community*, 11(3): pp. 295-312. [Online]. Available: <https://so03.tci-thaijo.org/index.php/rdirmu/article/view/277728> (in Thai)
- [7] Pongsuwan, P. and Pankham, S. 2024. "Developing a structural equation model for using LINE Official Account to trading product online in Thailand," *Rangsit Journal of Information Technology*, 30(2): pp. 79-92. [Online]. Available: <https://rilj.rsu.ac.th/journal/62/article/315> (in Thai)
- [8] Trakulmaykee, N. and et al. 2024. "Factors of tourist's intention to use Line OA for Songkhla Lagoon tourism," *Journal of Information Science Research and Practice*, 42(1): pp. 13-28. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14456/jiskku.2024.2> (in Thai)
- [9] Buangam, P. and Sriyom, U. 2025. "The development of information system for distribution of local rice processed products: A case study of the Sammachep Chumchon Tambon Ban Phoeng community enterprises in Pak Phanang District, Nakhon Si Thammarat," *DRIRDI Research for Community Service Journal*, 11(2): pp. 1-12. [Online]. Available: <https://so02.tci-thaijo.org/index.php/DRURDI/article/view/280521> (in Thai)
- [10] Preechapanich, O. 2015. *System Analysis and Design*. Nonthaburi, Thailand: IDC Premier. (in Thai)
- [11] Srisa-ard, B. 2002. *Introduction to Research*, 7th ed. Bangkok, Thailand: Suweeriyasarn. (in Thai)
- [12] Seetha, N., Tanasirathum, P. and Senrit, D. 2024. "Developing sales channels for processed meat products via the LINE application platform," *Journal of Applied Information Technology*, 10(1): pp. 143-154. [Online]. Available: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/project-journal/article/view/253456> (in Thai)
- [13] Chaipayong, T., Liampreecha, W. and Pomanant, K. 2025. "Developing an automated conversational system to provide tourism information in Sukhothai Province for the elderly group," *Journal of Management Science Udon Thani Rajabhat University*, 7(2): pp. 1-13. [Online]. Available: <https://so08.tci-thaijo.org/index.php/MSJournal/article/view/3393> (in Thai)
- [14] Venkatesh, V. and Davis, F. D. 2000. "A theoretical extension of the technology acceptance model: Four longitudinal field studies," *Management Science*, 46(2): pp. 186-204. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1287/mnsc.46.2.186.11926>
- [15] Richey, R. C. and Klein, J. D. 2007. *Design and Development Research: Methods,*

Strategies, and Issues. Mahwah, NJ:

Lawrence Erlbaum Associates

- [16] Hevner, A. R. and et al. 2004. "Design science in information systems research," *MIS Quarterly*, 28(1): pp. 75-105. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2307/25148625>
- [17] Peffers, K. and et al. 2007. "A design science research methodology for information systems research," *Journal of Management Information Systems*, 24(3): pp. 45-77. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับ

“วารสารนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม” เป็นวารสารที่ครอบคลุมสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี บทความมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาทางด้านนวัตกรรมเทคโนโลยี อุตสาหกรรม อาทิ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ อุตสาหกรรมศึกษา เทคนิคและอาชีพศึกษา อุตสาหกรรมศิลป์ สถาปัตยกรรมและการออกแบบ และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับเทคโนโลยีอุตสาหกรรม โดยนำเสนอในรูปแบบบทความวิจัย บทความวิชาการ บทความวิจารณ์/บทความปริทัศน์ ซึ่งผู้นำเสนอบทความเป็นนักศึกษา คณาจารย์ บุคลากร นักวิชาการ ตลอดจนผู้สนใจทั้งภายในและภายนอก

ทั้งนี้ บทความจะผ่านขั้นตอนการประเมินเบื้องต้นถึงคุณภาพและขอบเขตของเนื้อหา ความถูกต้องของรูปแบบการเตรียมบทความ ความซ้ำซ้อน และการคัดลอกวรรณกรรม (Duplication and Plagiarism) โดยกองบรรณาธิการวารสารฯ จากนั้นบทความจะได้รับการประเมินคุณภาพทางวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิทางสาขา ที่เกี่ยวข้องไม่น้อยกว่า 3 ท่านซึ่งผู้นิพนธ์ (Author) และผู้ประเมิน (Reviewer) จะไม่ทราบข้อมูลของกันและกัน (Double-Blinded Peer Reviews) โดยบทความที่ผ่านการปรับปรุงตามผลการประเมินจะได้รับพิจารณาอนุมัติให้ตีพิมพ์บทความ ขั้นตอนสุดท้าย กองบรรณาธิการจะดำเนินการตรวจสอบบทความและพิสูจน์อักษรก่อนที่จะเผยแพร่บทความแบบออนไลน์ และจัดพิมพ์บทความทั้งหมดรวมเล่มเพื่อดำเนินการเผยแพร่ต่อไป

อนึ่งผลงานวิจัยและผลงานทางวิชาการที่ปรากฏเผยแพร่ในวารสารฯ เป็นความคิดเห็นอิสระของผู้แต่ง โดยผู้แต่งเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความเผยแพร่นั้น ซึ่งกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

1. ประเภทของเรื่องที่จะลงตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research articles or Original article) เป็นบทความที่ผู้เขียนเรียบเรียงขึ้นจากงานวิจัยของ

ตนซึ่งเป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยเรื่องใดเรื่องหนึ่ง ได้แก่ บทความวิจัยทางสังคมศาสตร์ รวมทั้งสาขาวิชาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและจะเป็นประโยชน์กับวิชาชีพต่าง ๆ

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่ผู้เขียนมุ่งนำเสนอเนื้อหาสาระเรื่องใดเรื่องหนึ่งเพียงเรื่องเดียว ได้จากการศึกษาค้นคว้าเอกสารสิ่งพิมพ์ต่าง ๆ และนำมาถ้อยแถลงเรียบเรียงขึ้นโดยผู้เขียน

1.3 บทความวิจารณ์/บทความปริทัศน์ (Review article) เป็นบทความที่ผู้เขียนวิเคราะห์ สังเคราะห์ วิพากษ์วิจารณ์ เรื่อง/ประเด็นใดประเด็นหนึ่งเพื่อนำเสนอแนวคิดใหม่หรือองค์ความรู้ใหม่

2. ขั้นตอนในการส่งเรื่องเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารอื่น ๆ

2.1 เป็นเรื่องที่ไม่เคยลงตีพิมพ์หรือกำลังรอตีพิมพ์ในวารสารอื่น ๆ

2.2 ต้นฉบับ ทุกเรื่องจะต้องผ่านการประเมินหรือได้รับความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิ เพื่อตรวจสอบเนื้อหา (Peer review) ถ้าได้รับคำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไข กองบรรณาธิการจะส่งเรื่องที่จะลงตีพิมพ์ที่ได้รับคำแนะนำให้ปรับปรุงแก้ไข หรือเพิ่มเติมไปยังเจ้าของต้นฉบับ (ผู้เขียน) ซึ่งเจ้าของต้นฉบับจะต้องส่งต้นฉบับที่ปรับปรุงแก้ไขแล้วกลับคืนให้กับกองบรรณาธิการภายใน 2 สัปดาห์ กองบรรณาธิการจะตอบรับการตีพิมพ์ก็ต่อเมื่อต้นฉบับได้รับการแก้ไขจนครบถ้วน สมบูรณ์จากเจ้าของต้นฉบับแล้วเท่านั้น

2.3 ให้ผู้เขียนส่งต้นฉบับมายังกองบรรณาธิการวารสารฯ ไม่เกิน 40 วันก่อนการตีพิมพ์แต่ละฉบับ เพื่อเรื่องที่จะลงตีพิมพ์จะได้รับการดำเนินการตามขั้นตอนการวินิจฉัย และพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารต่อไป

2.4 ต้นฉบับที่ส่งมาเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ ต้องเป็นไปตามข้อกำหนด คำแนะนำในการตีพิมพ์ต้นฉบับ

2.5 เรื่องที่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ ผู้เขียนสามารถดาวน์โหลดจากเว็บไซต์ของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

3. การเตรียมต้นฉบับ

3.1 ต้นฉบับพิมพ์ เป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ องค์ประกอบต่าง ๆ ของบทความ วิจัยหรือบทความวิชาการให้จัดทำตามคำแนะนำการเตรียมต้นฉบับนี้ การใช้ภาษาไทยให้ยึดหลักการใช้คำศัพท์และการเขียนทับศัพท์ภาษาอังกฤษตามหลักของราชบัณฑิตยสถาน ควรหลีกเลี่ยงการเขียนภาษาอังกฤษปนภาษาไทยในข้อความ ยกเว้นกรณีจำเป็น เช่น ศัพท์ทางวิชาการที่ไม่มีคำแปลหรือคำที่ใช้แล้วทำให้เข้าใจง่ายขึ้น คำศัพท์ภาษาอังกฤษที่เขียนปนภาษาไทยให้ใช้ตัวเล็กทั้งหมด ยกเว้นชื่อเฉพาะ สำหรับต้นฉบับภาษาอังกฤษควรได้รับการตรวจสอบความถูกต้องด้านการใช้ภาษาจากผู้เชี่ยวชาญด้านภาษาเป็นเบื้องต้นก่อน

3.2 การพิมพ์ ให้จัดพิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word ขนาดของต้นฉบับใช้กระดาษขนาด Executive (18.8 X 26.6 เซนติเมตร) ตั้งค่าหน้ากระดาษสำหรับการพิมพ์ห่างจากขอบกระดาษด้านบน ด้านล่าง ด้านขวา ด้านละ 2.5 เซนติเมตร ด้านซ้าย 2.3 เซนติเมตร จัดเป็นคอลัมน์เดียวกระจายเต็มบรรทัด การลำดับหัวข้อของเนื้อเรื่อง หัวข้อหลักหรือหัวข้อใหญ่ พิมพ์ชิดซ้าย เป็นหัวข้อลอย ไม่มีภาษาอังกฤษหรือข้อความใด ๆ ต่อท้าย เป็นหัวข้อที่ใช้ตัวเลขกำกับข้อ หากมีหัวข้อย่อย หัวข้อย่อย และหัวข้อย่อย ๆ ให้ใช้เลขระบบทศนิยมกำกับหัวข้อดังกล่าว เช่น หัวข้อย่อย หมายเลข 1.1 หัวข้อย่อย หมายเลข 1.1.1 หัวข้อย่อย ๆ หมายเลข 1.1.1.1 และ 1) เป็นต้น

3.3 รูปแบบตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษใช้ตัวอักษรแบบ TH Sarabun PSK ขนาดตัวอักษรทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษใช้ขนาดเดียวกัน ดังนี้ ชื่อเรื่องใช้ตัวอักษรขนาด 18 pt. ตัวพิมพ์หนา ชื่อผู้เขียนและหัวข้อหลักใช้ตัวอักษรขนาด 15pt. ตัวพิมพ์หนา หัวข้อย่อยใช้ตัวอักษรขนาด 15 pt. ตัวพิมพ์หนา เนื้อความทุกส่วนใช้ตัวอักษรขนาด 15 pt. ตัวพิมพ์ปกติ เชิงอรรถหน้าแรก ที่เป็นชื่อ-สกุล ตำแหน่งทางวิชาการ และที่อยู่ของผู้เขียนบทความใช้ตัวอักษรขนาด 13 pt.ตัวพิมพ์ปกติ

3.4 จำนวนหน้า ความยาวของบทความไม่ควรเกิน

15 หน้า รวมตาราง ภาพ และเอกสารอ้างอิง

3.5 ตารางและภาพ ให้จัดแทรกไว้ในเนื้อเรื่องโดยคัดเลือกเฉพาะที่จำเป็นเท่านั้นและเรียงลำดับให้สอดคล้องกับเนื้อเรื่อง

3.5.1 ตาราง เมื่อวางรูปตารางข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ต้อง “กำกับ” ไว้ที่ด้านบนของตารางด้วยข้อความที่เป็น “ตารางที่...(และชื่อตารางหรือคำอธิบายสั้น)” ส่วน “ที่มา” ของตาราง(ถ้ามี)ให้อยู่ด้านล่างของตาราง “ที่มา” ของตารางใช้รูปแบบเดียวกับการอ้างอิงทุกประการ คือ (ชื่อ-สกุล, ปี) หากเป็นตารางที่สร้างขึ้นเองอาจไม่ระบุ “ที่มา” ก็ได้

3.5.2 ภาพ เป็นภาพที่ใช้ประกอบเนื้อหาได้แก่ ภาพถ่าย ภาพวาด ภาพกราฟิก ภาพดิจิทัล แผนภูมิ แผนผังผังโน้ตส์ แผนที่ ลายแทง ฯลฯ อาจจัดทำเป็นภาพขาวดำหรือภาพสีก็ได้ เมื่อจัดภาพเสร็จแล้วต้อง “กำกับ” ไว้ที่ได้ภาพด้วยข้อความที่เป็น ภาพที่....และชื่อภาพหรือคำอธิบายภาพสั้น ๆ และบรรทัดที่ถัดลงมาคือ “ที่มา:....” ของภาพ(ถ้ามี) ที่มาของภาพใช้รูปแบบเดียวกับที่มาของตารางทุกประการ

4. การเตรียมต้นฉบับแต่ละประเภท

4.1 บทความวิจัย (Research articles) เป็นการนำเสนอผลงานวิจัยที่เสร็จสมบูรณ์แล้วซึ่งผู้เขียนได้ดำเนินการด้วยตนเองมีองค์ประกอบดังนี้

4.1.1 ส่วนประกอบตอนต้น มีองค์ประกอบดังนี้

1) **ชื่อเรื่อง (Title)** ควรสั้นกะทัดรัด ไม่ยาวจนเกินไป ให้เขียนชื่อเรื่องเป็นภาษาไทยก่อนแล้วตามด้วยภาษาอังกฤษ(ตัวพิมพ์ใหญ่)ในบรรทัดถัดไป

2) **ชื่อผู้เขียนบทความ (Authors and co-authors/ Corresponding Author)** ระบุเฉพาะชื่อและนามสกุลเต็มทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ สำหรับภาษาอังกฤษใช้อักษรตัวพิมพ์ใหญ่เฉพาะอักษรตัวแรกของชื่อตัวและนามสกุล ถ้ามีผู้วิจัยหลายคนให้ใช้ตัวเลขยกกำกับ (1) และใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) สำหรับผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author) ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ และชื่อหน่วยงานของผู้วิจัยที่ส่วนล่างของหน้าแรกพร้อม E-mail

address (กรณีเป็นนักศึกษาให้ระบุระดับการศึกษา สาขาวิชา และสถาบันการศึกษา)

3) **บทคัดย่อ (Abstract)** ให้มีทั้งภาษาไทย และภาษาอังกฤษ พิมพ์คอลัมน์เดียว ความยาวไม่เกินอย่างละ 15 บรรทัด บทคัดย่อที่เขียนควรเป็นแบบ Indicative abstract คือสั้น ตรงประเด็น และให้สาระสำคัญเท่านั้น ไม่ควรเขียนแบบ Informative abstract ตามแบบที่เขียนในวิทยานิพนธ์ หรือรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โดยให้ลำดับบทคัดย่อ ภาษาไทยขึ้นก่อนตามด้วยบทคัดย่อภาษาอังกฤษ

4) **คำสำคัญ (Keywords)** ให้ใช้คำที่ปรากฏ อยู่ในเนื้อเรื่องซึ่งเป็นตัวแทนบอกวิธีการวิจัย ประเด็นที่วิจัย ผลการวิจัย การใช้ประโยชน์หรือสถานที่ที่ทำการวิจัย คำสำคัญนี้ ให้เขียนทั้งในภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใส่ไว้ท้ายบทคัดย่อ ของแต่ละภาษาอย่างละไม่เกิน 5 คำ

4.1.2 **เนื้อหาในบทความวิจัย** สาขาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี โดยมุ่งเน้นเผยแพร่บทความวิชาการทางด้าน นวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม อาทิเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ อุตสาหกรรมศึกษา เทคนิคและอาชีวศึกษา อุตสาหกรรมศิลป์ สถาปัตยกรรมและการออกแบบ และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับเทคโนโลยี อุตสาหกรรม ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้

1) **บทนำ (Introduction)** อธิบายถึงที่มา ความสำคัญของปัญหา และเหตุผลที่นำไปสู่การศึกษาวิจัย ให้ ข้อมูลทางวิชาการที่มีการตรวจเอกสาร(literature review) โดย ระบุถึงแหล่งที่มาของข้อมูล(อ้างอิง) และจุดมุ่งหมาย ที่เกี่ยวข้อง

2) **วัตถุประสงค์ (Research Objectives)** ระบุ ความมุ่งหมายที่ผู้วิจัยต้องการค้นหาคำตอบหรือข้อเท็จจริงโดยวิธีการวิจัย

3) **ขอบเขตการวิจัย (Research Scopes)** (ถ้ามี) เป็นการชี้แจงจำกัดให้แน่นอนว่าจะศึกษาพิจารณาใน ขอบเขตแค่ไหน เช่น ขอบเขตของประชากร กลุ่มตัวอย่าง ขอบเขตของตัวแปร ขอบเขตเนื้อหา ขอบเขตของช่วงเวลา (งานวิจัยเชิงทดลอง)

4) **วิธีดำเนินการวิจัย (Research methods)** อธิบายกระบวนการดำเนินการวิจัย โดยบอกรายละเอียดวัสดุ

วิธีการศึกษา สิ่งที่น่าสนใจศึกษา จำนวน ลักษณะเฉพาะของ ตัวอย่างที่ศึกษา ตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการ ศึกษา อธิบายแบบแผนการวิจัย การเลือกตัวอย่าง วิธีการ เก็บข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล และสถิติที่ใช้

5) **ผลการวิจัย (Results)** รายงานผลการวิจัย ให้ได้ใจความชัดเจนและตรงประเด็นโดยยึดแนวทางตาม วัตถุประสงค์เป็นหลักควรอธิบายผลการวิจัยด้วยคำบรรยาย เป็นหลักแต่ถ้ามีตัวเลขหรือตัวแปรมากควรนำเสนอเป็นภาพ และตารางแทรกในเนื้อหา พร้อมอธิบายผลการวิจัยให้ได้สาระ ครบถ้วนอย่างสั้น ๆ

6) **การอภิปรายผลหรือการวิจารณ์และสรุป (Discussion and conclusion)** เป็นการชี้แจงผลการวิจัยว่า ตรงกับวัตถุประสงค์/สมมติฐานของการวิจัย สอดคล้องหรือ ขัดแย้งกับผลการวิจัยของผู้อื่นที่มีอยู่ก่อนหรือไม่อย่างไร เหตุผลใดจึงเป็นเช่นนั้น และให้จบด้วยข้อเสนอแนะที่จะนำ ผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ หรือทิ้งประเด็นคำถามการวิจัย ซึ่ง เป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไป

7) **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** (ถ้ามี) โดยให้ระบุสั้น ๆ ว่างานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนหรือ ความช่วยเหลือจากองค์กรใด และบุคคลใดบ้าง

8) **เอกสารอ้างอิง (References)** ให้ระบุ เฉพาะเอกสารที่ผู้เขียนบทความได้นำมาอ้างอิงในบทความวิจัย อย่างครบถ้วน โดยระบุรายละเอียดและใช้รูปแบบการเขียน ที่ถูกต้อง และครบถ้วน (ตามข้อ3) จัดเรียงลำดับตามตัวอักษร ถ้าเป็นบทความภาษาไทยนำโดยกลุ่มเอกสารภาษาไทยและ ตามด้วยกลุ่มเอกสารภาษาอังกฤษ

4.2 **บทความทางวิชาการ บทความวิจารณ์ และบทความปริทัศน์ (Review articles)** เป็นบทความที่ผู้เขียนได้เรียบเรียง โดยศึกษาค้นคว้าจากเอกสาร งานแปล และผลงานจาก ประสบการณ์ของผู้เขียนหรือได้รับการถ่ายทอดจากผู้อื่น มี วัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ องค์ความรู้ การเสนอความคิดเห็นที่มีคุณค่าและเป็นประโยชน์ทางวิชาการของสาขา ต่าง ๆ

4.2.1 **ส่วนประกอบตอนต้น** มีองค์ประกอบ ดังนี้

1) ชื่อเรื่อง (Title) ให้เป็นภาษาไทยก่อน

และบรรทัดถัดลงมาเป็นภาษาอังกฤษ โดยภาษาอังกฤษใช้ตัวพิมพ์ใหญ่ ยกเว้น Article และ Preposition ใช้ตัวพิมพ์เล็ก ส่วนชื่อวิทยาศาสตร์ (Scientific name) ให้พิมพ์ด้วยตัวเอนไม่ต้องขีดเส้นใต้ กรณีระบุชื่อภาษาไทยหรือชื่อสามัญของสิ่งมีชีวิต (เป็นภาษาอังกฤษ) ให้ใส่ชื่อวิทยาศาสตร์ด้วย

2) ชื่อผู้เขียน (Authors and co-authors)

ระบุเฉพาะชื่อและนามสกุลเต็มทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ สำหรับภาษาอังกฤษใช้อักษรตัวพิมพ์ใหญ่เฉพาะอักษรตัวแรกของชื่อตัวและนามสกุล ถ้ามีผู้วิจัยหลายคนให้ใช้ตัวเลขยกกำกับ⁽¹⁾ พร้อมระบุตำแหน่งทางวิชาการ (ถ้ามี) ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ และชื่อหน่วยงานของผู้วิจัยที่ส่วนล่างของหน้าแรก พร้อม E-mail address (กรณีเป็นนักศึกษาให้ระบุระดับการศึกษา สาขาวิชาและสถาบัน การศึกษา)

3) สารสังเขป (Summary) เป็นการย่อ

เนื้อความของบทความทั้งเรื่องให้สั้นได้เนื้อหาสาระครบถ้วน

4) คำสำคัญ (Keywords) (ถ้ามี) ให้ใช้คำที่

ปรากฏอยู่ในเนื้อเรื่องซึ่งเป็นตัวแทนบอกริธีการ สิ่งศึกษา ผลการศึกษา สาขา การใช้ประโยชน์และสถานที่ คำสำคัญให้เขียนทั้งคำสำคัญภาษาไทย และภาษาอังกฤษแต่ละชุดไม่เกิน 5 คำ

4.2.2 เนื้อหา (Main texts) ในบทความทางวิชาการมีองค์ประกอบดังนี้

1) บทนำ (Introduction) กล่าวถึงความ

น่าสนใจของเรื่องที่น่าสนใจก่อนเข้าสู่เนื้อหา

2) เนื้อความ (Content) ควรนำเสนอ

พัฒนาการของเรื่องได้อย่างน่าสนใจ และเนื้อเรื่องมีเนื้อหาใหม่เหมาะสมกับสภาพปัจจุบัน

3) สรุป (Conclusion) เป็นการย่อเฉพาะ

ข้อมูลจากเนื้อความให้สั้นได้เนื้อหาสาระของเนื้อหาครบถ้วน

4) เอกสารอ้างอิง (References) ให้ระบุ

เฉพาะเอกสารที่ผู้เขียนบทความได้นำมาอ้างอิงในบทความวิชาการอย่างครบถ้วนรูปแบบของการเขียนเอกสารอ้างอิงให้จัดทำตามที่ระบุไว้ในข้อ 2.3 (เอกสารอ้างอิง)

4.3 การอ้างอิง (References)

การอ้างอิงในบทความวิจัยและบทความวิชาการสำหรับวารสารวิชาการนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กำหนดให้อ้างอิงตามรูปแบบ IEEE (อ้างอิงจาก <https://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf> หรือจาก http://www.ieee.org/documents/style_manual.pdf) โดยต้องเขียนอ้างอิงเป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น หากบทความที่อ้างอิงมาจากบทความภาษาไทยต้องแปลเป็นภาษาอังกฤษให้ถูกต้อง สำหรับการใส่อ้างอิงในเนื้อเรื่อง (In-text citations) ให้ใช้เครื่องหมาย [] โดยมีตัวอย่างการเขียน เช่น [1] หรือ [2] หรือ [1], [2] หรือ [1], [3]-[8] หรือ [9], [10], [15], [16] หากมีการอ้างอิงซ้ำบทความเดิมให้ใช้หมายเลขเดิม ในส่วนของการอ้างอิงส่วนท้าย (Reference list) จะต้องเรียงตามลำดับบทความที่เขียนอ้างอิงในเนื้อเรื่อง เอกสารอ้างอิงที่เป็นภาษาไทยให้แปลเป็นภาษาอังกฤษ ให้เพิ่มคำว่า (in Thai) ไว้ตอนท้ายการอ้างอิง

รายละเอียดของเอกสารประกอบด้วย ชื่อผู้เขียน ชื่อหนังสือหรือชื่อของบทความ ชื่อของเอกสารที่พิมพ์ สำนักหรือสถานที่พิมพ์ ปีที่ (ฉบับที่) พิมพ์ และเลขหน้าที่ย่อ และทุกเรื่องที่ปรากฏในรายการเอกสารอ้างอิงต้องมีการอ้างอิง ในเนื้อเรื่อง โดยต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น

การเขียนชื่อผู้ร่วมแต่งบทความไม่เกิน 3 คน ให้เขียนเรียงทุกคน และคั่นด้วย จุลภาค (,) คนสุดท้ายให้เชื่อมด้วย “and” ในกรณีที่ร่วมแต่งบทความเกิน 3 คน ให้เขียนเฉพาะชื่อผู้เขียนคนแรกและตาม ด้วย “and et al.” ตัวอย่างเช่น

[1] Johnson, C. and Timothy F. 2002. “In the Eyes of the State: Negotiating a “Rights-Based Approach” to Forest Conservation in Thailand,” *World Development*. 30(9): 1591-1605.

[2] Martin, J. R. and et al. 1997. *Working with Functional Grammar*. London: Arnold.

รูปแบบการเขียนจากแหล่งอ้างอิงต่าง ๆ (Reference)

1) การอ้างอิงจากบทความในวารสาร (Journal Articles)

รูปแบบ:

[1] Author. Year. "Title of Article," *Title of Journal*, Volume(Issue): Pages.

ตัวอย่าง:

- [3] Johnson, C. and Timothy F. 2002. "In the Eyes of the State: Negotiating a "Rights-Based Approach" to Forest Conservation in Thailand," *World Development*. 30(9): pp. 1591-1605.
- [4] Koolkalya, S., Matchakuea, U. and Jutagate, T. 2016. "Catch status and trend analysis of Brachyuran fisheries in the Gulf of Thailand," *Burapha Science Journal*. 22(1): pp. 240-252. (in Thai)

2) การอ้างอิงจากการนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ (Conference Technical Articles)

รูปแบบ:

[1] Author. Year. "Title of paper," in *Title of Conference*, Conference date, Editor, Ed. Location: Publisher, Country, Pages.

ตัวอย่าง:

- [5] Jagacinski, N. and Gongjin, Z. 1990. "Agricultural Sacrifice and Village Culture of Dai People," In *Proceedings of the 4th International Conference in Thai Studies*, 11-13 May 1990. Kunming, China, pp. 1150-1163.
- [6] Ployyod, Y. and Porntrai, S. 2016. "Chromosome simulation: activity for teaching mitotic cell division," In *Proceedings of the 10th National Research Conference of Ubon Ratchathani University*, 7-8 July 2016. Ubon Ratchathani, Thailand, pp. 279-291. (in Thai) Thesis / Dissertation

3) การอ้างอิงจากหนังสือ (Books)

รูปแบบ:

[1] Author. Year. *Title of Book*, Editor, ed. Location: Publisher.

ตัวอย่าง:

- [7] Wyatt, D.K. 1984. *Thailand: A Short History*. New Haven: Yale University Press.
- [8] Hibbeler, R. C. 2013. *Mechanics of Materials*, 9th ed. Boston: Pearson.
- [9] Burton, R. M., Obel, B., & DeSanctis, G. 2011. *Organizational Design: A Step-by-Step Approach*, 2nd ed. New York: Cambridge University Press.
- [10] Suvamaraksha, A. 2013. *Ichthyology*. Chiangmai: Maejo University Press. (in Thai)

4) การอ้างอิงจากบทในหนังสือ (Edited Book Chapter)

รูปแบบ:

[1] Author. Year. "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, Country if not USA: Abbrev. of Publisher, ch. x, sec. x, pp. xxx-xxx.

ตัวอย่าง:

- [11] Wambugu, F. 2002. "Why Africa needs agricultural biotech?" In *M. Ruse and D. Castle (eds.) Genetically Modified Foods: Debating Biotechnology*. NY: Prometheus Books, pp. 78-79.
- [12] Stein, L. 1994. "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed. New York: Wiley, pp. 55-70.
- [13] Myer, R. L. 1977. "Parametric oscillators and nonlinear materials," in *Nonlinear Optics*, vol. 4, P. G. Harper and B. S. Wherret, 1st ed. San Francisco, CA: Academic, pp. 47-160.
- [14] Young, G. O. 1964. "Synthetic structure of industrial plastics," in *Plastics*, vol. 3, Polymers of

Hexadromicon, J. Peters, Ed., 2nd ed. New York: McGraw-Hill, pp. 15-64.

- [15] Sukosol, T. 1980. "Antigen and antibody," In Sarasombat S. (ed.) Immunology, Bangkok, K-T Printing, pp. 125. (in Thai)

5) การอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ (Theses and Dissertations)

รูปแบบ:

- [1] Author. year. "Title of dissertation," Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State.
- [2] Author. year. "Title of thesis," M.S. thesis, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State.

ตัวอย่าง:

- [16] Williams, J. O. 1993. "Narrow-band analyzer," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Harvard Univ., Cambridge, MA.
- [17] Kawasaki, N. 1993. "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow," M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan.
- [18] Amer, N. M. 1995. "The effects of homogeneous magnetic fields on developments of tribolium confusum," Ph.D. dissertation, Radiation Lab., Univ. California, USA.
- [19] Sidthilaw, S. 1996. "Impact Force and Kinematic Analysis of Roundhouse Kicks in Thai Boxing," Ph.D. Dissertation, Department of Biomechanics, Oregon State Univ. Oregon, USA.
- [20] Hanmanop, S. 2010. "The Therapeutic Effects of White Kwao Krua Pueraria mirifica Airy, Shaw & Suvatabandhu on Ovariectomy-induced Osteoporotic Rats," M.Sc. Thesis, Chulalongkorn Univ. Bangkok, Thailand. (in Thai)

6) การอ้างอิงจากรายงานวิจัย/รายงานโครงการ (Research report/Project report)

รูปแบบ:

- [1] Author. year. "Title of Research report," Research report. Location, Publisher.
- [2] Author. year. "Title of Research report," Project report. Location, Publisher.

ตัวอย่าง:

- [21] Niyom, S. 2021. "Development of ready-to-drink pomelo juice products. Pasteurization and hot filling to increase the value of Tha Khoi pomelo," Research report. Bangkok: Promotion and Coordination Division for Scientific Benefits Research and innovation Office of the Permanent Secretary, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation. (in Thai)
- [22] Chaengim, R., Saenbudda, W., & Thaoklang, P. 2022. "Community product development and upgrading Product standards Under the strategic plan of Rajabhat University for local development Fiscal year 2022," Project report. Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima Rajabhat University. (in Thai)

7) การอ้างอิงจากเว็บไซต์ (Web site)

รูปแบบ:

- [1] Author. Year. Title (edition) [Type of medium]. Available: [http://www.\(URL\)](http://www.(URL)). Accessed day month year.

ตัวอย่าง:

- [23] Buis, A. & Lynch, P. 2016. NASA Releases New Eye-Popping View of Carbon Dioxide. [Online]. Available: <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=6701>. Accessed 14 January 2017.

[24] Jones, J. 1991. *Networks (2nd ed.)*. [Online].
Available: <http://www.atm.com>. Accessed 21 June 2016.

[25] Pantoom, J. 2008. *Food from Corn*. [Online].
Available: <http://www.ku.ac.th/agri/cornn/corn.html>. Accessed 14 February 2017. (in Thai)

8) การอ้างอิงจากสิทธิบัตร (Patents)

รูปแบบ:

[1] Author. year. “*Title of patent*,” U.S. Patent x xxx
xxx, Abbrev. day month year.

ตัวอย่าง:

[26] Wilkinson, J. P. 1990. “Nonlinear resonant circuit devices,” U.S. Patent 3 624 125, 16 July 1996.

9) การอ้างอิงจากมาตรฐาน (Standards)

รูปแบบ:

[1] *Title of Standard*, Standard number, date.

ตัวอย่าง:

[27] *IEEE Criteria for Class IE Electric Systems*, IEEE
Standard 308, 1969.

[28] *Letter Symbols for Quantities*, ANSI Standard
Y10.5-1968.

10) การอ้างอิงจากคู่มือ (Handbooks)

รูปแบบ:

[1] *Name of Manual/Handbook*, x Ed., Abbrev. Name
of Co., City of Co., Abbrev. State, year, pp. xx-xx.

ตัวอย่าง:

[29] *Transmission Systems for Communications*, 3rd
Ed., Western Electric Co., Winston-Salem, NC,
1985, pp. 44–60.

[30] *Motorola Semiconductor Data Manual*, Motorola
Semiconductor Products Inc., Phoenix, AZ, 1989.

[31] *RCA Receiving Tube Manual*, Radio Corp. of
America, Electronic Components and Devices,
Harrison, NJ, Tech. Ser. RC-23, 1992.

11) การอ้างอิงจากการสัมภาษณ์ (Handbooks)

รูปแบบ:

[1] Interviewee name. Year, Date. *Interview*. City,
Country. Interview.

ตัวอย่าง:

[32] Thongsom, S. 2020, April 21. *Benefits of tourism in Thailand*. Bangkok, Thailand. Bangkok,
Thailand. Interview. (In Thai)

5. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

การเขียนหน่วยต่าง ๆ ควรใช้ระบบ SI และเป็นสากล ถ้าหากต้องการย่อหน่วย ควรใช้ตัวย่อเป็นภาษาอังกฤษที่ถูกต้องและเป็นสากลการใช้ศัพท์วิทยาศาสตร์ให้ยึดคำบัญญัติของราชบัณฑิตยสถาน ชื่อสถานที่ต่าง ๆ ให้ใช้ตามประกาศของสำนักนายกรัฐมนตรี การเขียนคำที่มาจากภาษาต่างประเทศหากต้องการทับศัพท์เป็นภาษาไทยหรือต้องการแปลเป็นภาษาไทย การแปลหรือเขียนทับศัพท์ครั้งแรกควรใส่คำศัพท์เดิมไว้ในวงเล็บต่อท้ายคำแปลด้วย ซึ่งถ้าคำศัพท์ใดที่ไม่ใช่คำศัพท์เฉพาะก็ไม่จำเป็นต้องขึ้นต้นด้วยตัวใหญ่เช่น “การเหนี่ยวนำ (induction)” “เวเบอร์ (weber)” และเมื่อต้องการใช้คำแปลเดิมซ้ำอีก ให้ใช้ภาษาไทยโดยไม่ต้องใส่ภาษาอังกฤษกำกับ

จริยธรรมในการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสาร (Publication Ethics)

หน้าที่และความรับผิดชอบของผู้เขียนบทความ (Author Ethical Responsibilities)

- บทความที่ส่งให้พิจารณาตีพิมพ์ในวารสารจะต้องเป็นบทความที่ไม่เคยตีพิมพ์ที่ไหนมาก่อนและไม่ส่งต้นฉบับบทความซ้ำซ้อนกับวารสารอื่น
- บทความที่ส่งให้พิจารณาตีพิมพ์จะต้องไม่มีส่วนใดที่เป็นการคัดลอกผลงานวิชาการ ทั้งของตนเองและผู้อื่น และมีการอ้างอิงผลงานอย่างถูกต้องและครบถ้วน
- ผู้เขียนต้องตรวจสอบความถูกต้องของรายการเอกสารอ้างอิง ทั้งในด้านรูปแบบและเนื้อหา
- ผู้เขียนต้องเขียนบทความตามรูปแบบและขนาดตัวอักษรตามแบบฟอร์ม (template) ที่วารสารกำหนดไว้
- ผู้เขียนที่มีชื่อปรากฏในบทความทุกคน ต้องเป็นผู้ที่มีส่วนในการดำเนินการบทความจริง
- ผู้เขียนต้องระบุแหล่งทุนที่สนับสนุนในการทำวิจัยนี้ และ/หรือมีผลประโยชน์ทับซ้อนจะต้องระบุในบทความ และแจ้งให้บรรณาธิการทราบ
- ผู้เขียนจะต้องไม่รายงานข้อมูลที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ไม่ว่าจะเป็นการสร้างข้อมูลเท็จ หรือการปลอมแปลง บิดเบือน รวมไปถึงการตกแต่ง หรือ เลือกแสดงข้อมูลเฉพาะที่สอดคล้องกับข้อสรุป
- ผู้เขียนต้องยินยอมโอนลิขสิทธิ์ให้แก่วารสารก่อนการตีพิมพ์ และไม่นำผลงานไปเผยแพร่หรือตีพิมพ์กับแหล่งอื่น ๆ หลังจากที่ได้รับการตีพิมพ์กับวารสารธรรมศาสตร์แล้ว
- กรณีที่ผลงานเป็นการศึกษาวิจัยและทำการทดลองในคนหรือสัตว์ทดลอง โดยการทดลองในคนอาจส่งผลกระทบต่อศักดิ์ศรี สิทธิ ความเป็นส่วนตัว และสุขภาพของคน ขอให้แนบหนังสือรับรองจริยธรรมจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลอง ทั้งนี้ การอนุมัติให้ลงตีพิมพ์ขึ้นอยู่กับพิจารณาจากกองบรรณาธิการวารสารฯ ถือเป็นที่สุด

หน้าที่และความรับผิดชอบของบรรณาธิการวารสาร (Editor Roles and Responsibility)

- บรรณาธิการมีหน้าที่พิจารณาและตรวจสอบบทความที่ส่งเข้ารับการพิจารณาตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารของตนเอง โดยพิจารณาเนื้อหาบทความที่สอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของวารสาร รวมถึงการตรวจสอบคุณภาพบทความในกระบวนการประเมินและคุณภาพบทความก่อนการตีพิมพ์
- บรรณาธิการมีหน้าที่ตรวจสอบบทความในด้านความซ้ำซ้อนหรือในด้านการคัดลอกผู้อื่น (Plagiarism) โดยใช้โปรแกรมตรวจสอบความซ้ำซ้อน หากตรวจสอบพบความซ้ำซ้อนหรือการคัดลอกผลงานของผู้อื่นในกระบวนการประเมินบทความ บรรณาธิการต้องหยุดกระบวนการประเมิน และติดต่อผู้นิพนธ์หลักทันทีเพื่อขอคำชี้แจง เพื่อประกอบการ “ตอบรับ” หรือ “ปฏิเสธ” การตีพิมพ์บทความนั้น
- บรรณาธิการต้องไม่เปิดเผยข้อมูลของผู้เขียน และผู้ประเมินบทความแก่ผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องในระยะเวลาของการประเมินคุณภาพผลงานวิชาการ และจนกว่าบทความได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่
- บรรณาธิการมีหน้าที่พิจารณาตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยที่มีระเบียบวิธีวิจัยที่ถูกต้อง ใช้เหตุผลทางวิชาการในการพิจารณาบทความทุกครั้งโดยปราศจากอคติที่มีต่อบทความและผู้นิพนธ์ในด้านเชื้อชาติ เพศ ศาสนา วัฒนธรรม การเมือง และสังกัดของผู้นิพนธ์

- บรรณาธิการต้องไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้นิพนธ์หรือผู้ทรงคุณวุฒิ ไม่นำบทความหรือวารสารไปใช้ประโยชน์ในเชิงธุรกิจหรือนำไปเป็นผลงานทางวิชาการของตนเอง
- บรรณาธิการต้องไม่แก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหาบทความและผลประเมินของผู้ทรงคุณวุฒิ รวมถึงไม่ปิดกั้นหรือแทรกแซงข้อมูลที่ใช้แลกเปลี่ยนระหว่างผู้ทรงคุณวุฒิและผู้นิพนธ์
- บรรณาธิการต้องไม่ตีพิมพ์บทความที่เคยตีพิมพ์ในวารสารอื่นมาแล้ว

หน้าที่และความรับผิดชอบของผู้ประเมินบทความ (Reviewer Roles and Responsibilities)

- ผู้ประเมินบทความต้องไม่เปิดเผยข้อมูลของบทความที่พิจารณาแก่บุคคลอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความ และจนกว่าบทความจะได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่
- หากผู้ประเมินบทความมีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้เขียนผู้ประเมินบทความจะต้องแจ้งให้บรรณาธิการวารสารทราบและปฏิเสธการประเมินบทความนั้น
- ผู้ประเมินบทความควรรับประเมินบทความเฉพาะสาขาวิชาที่ตนมีความเชี่ยวชาญ และหากมีส่วนใดของบทความที่มีความเหมือนกัน หรือซ้ำซ้อนกับผลงานชิ้นอื่นๆ ผู้ประเมินบทความต้องแจ้งให้บรรณาธิการทราบ
- ต้องรักษาระยะเวลาประเมินตามกรอบเวลาประเมินที่กำหนด รวมถึงไม่เปิดเผยข้อมูลของบทความให้ผู้ที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องได้รับรู้
- ผู้ประเมินบทความควรประเมินด้วยความซื่อตรง ปราศจากอคติ และไม่มีเจตนาอื่นแอบแฝง

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาบทความวารสารวิชาการนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ประจำปี 4 ฉบับที่ 2 (พฤษภาคม - สิงหาคม) ปี พ.ศ. 2569

- | | |
|---|--|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แก้วเกื้อกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์เทพ วีระพงศ์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.วีระชัย แสงฉาย | มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ จิตงาม | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.อรุณ ลูกจันทร์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรติ เส็มหมัด | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก(อุเทนถวาย) |
| 7. รองศาสตราจารย์ ดร.สันติรัฐ นันสะอาจ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงธรรม ดีวานิชสกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 9. ศาสตราจารย์ ดร.อัศศิริ ฟูตระกูล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 10. รองศาสตราจารย์ ดร.วรางคณา จุติดำรงพันธ์ | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ นพรัตน์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี |
| 12. รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ธนิตยธีรพันธ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 13. รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ จันทรมณี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย |
| 14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรสิริณัฐ โรจนวรรณ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาส
ราชนครินทร์ |
| 15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รักถิ่น เหลาหา | มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม |
| 16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธาดา จันทะคุณ | มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม |
| 17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมสันต์ สุวรรณโรจน์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช |

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาภาษาอังกฤษวารสารวิชาการนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ประจำปี 4 ฉบับที่ 2 (พฤษภาคม - สิงหาคม) ปี พ.ศ. 2569

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1. ดร.ธานี จินตสุทธีศักดิ์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไยฟ้า ตระกูลสันติ | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช |



แบบประเมินคุณภาพตามความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิสำหรับการตีพิมพ์บทความวิจัย/บทความวิชาการ
วารสารนวัตกรรมอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิตและคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

เรื่อง

แบบประเมินคุณภาพตามความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิสำหรับการตีพิมพ์บทความวิจัย:

1. ชื่อเรื่อง: รายละเอียดการแก้ไขบทความ ข้อเสนอแนะ คำชี้แจง หรือข้อสังเกต
.....
2. บทคัดย่อ: รายละเอียดการแก้ไขบทความ ข้อเสนอแนะ คำชี้แจง หรือข้อสังเกต
.....
3. บทนำ: รายละเอียดการแก้ไขบทความ ข้อเสนอแนะ คำชี้แจง หรือข้อสังเกต
.....
4. วิธีการวิจัย: รายละเอียดการแก้ไขบทความ ข้อเสนอแนะ คำชี้แจง หรือข้อสังเกต
.....
5. ผลการวิจัย: รายละเอียดการแก้ไขบทความ ข้อเสนอแนะ คำชี้แจง หรือข้อสังเกต
.....
6. อภิปรายผลและสรุปผลการวิจัย: รายละเอียดการแก้ไขบทความ ข้อเสนอแนะ คำชี้แจง หรือข้อสังเกต
.....
7. ข้อค้นพบและข้อเสนอแนะ: รายละเอียดการแก้ไขบทความ ข้อเสนอแนะ คำชี้แจง หรือข้อสังเกต
.....
8. เอกสารอ้างอิง: รายละเอียดการแก้ไขบทความ ข้อเสนอแนะ คำชี้แจง หรือข้อสังเกต
.....

(ลงนาม).....

(.....)

ผู้ประเมิน

**หมายเหตุ การประเมินนี้ผ่านแบบประเมินในเว็บไซต์ของวารสารเท่านั้น



แบบสรุปผลการประเมินบทความเพื่อตีพิมพ์
ในวารสารวิชาการนวัตกรรมอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

เรื่อง.....

1. ประเภทของบทความ ☐ ดีมาก ☐ ดี ☐ พอใช้ ☐ ควรปรับปรุง ☐ ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน
2. ความคิดเห็นของผู้ประเมิน
☐ รับผิดชอบตามรูปแบบที่เสนอมาโดยไม่ต้องแก้ไข
☐ รับผิดชอบตามรูปแบบที่เสนอมาโดยปรับปรุงและแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิและไม่ต้องประเมินใหม่
☐ รับผิดชอบตามรูปแบบที่เสนอมาโดยปรับปรุงและแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิและต้องประเมินใหม่
☐ ไม่รับผิดชอบ
3. คำวิพากษ์และข้อเสนอแนะ
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
4. ระดับคุณภาพของบทความ (โปรดเลือกเพียงข้อเดียว)
☐ ปรับปรุง ☐ พอใช้ ☐ ดี ☐ ดีมาก ☐ ดีเด่น

(ลงนาม)

(.....)

ผู้ประเมิน

**หมายเหตุ การประเมินนี้ผ่านแบบประเมินในเว็บไซต์ของวารสารเท่านั้น



หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

พิมพ์ที่

สำนักงานหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

1812 อาคาร 18 เลขที่ 1 หมู่ที่ 4 ตำบลท่าจั่ว อำเภอเมืองนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280

โทรศัพท์: 075-377-439 e-mail: techinstru.editorjournal@gmail.com