



วารสารวิชาการ ISSN: 3027-8090 (Online)

นวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

Academic Journal of Industrial Technology Innovation



ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 มกราคม - เมษายน 2569 Vol. 4 No. 1 January - April 2026

วารสารวิชาการกลุ่มสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชานวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

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



วารสารวิชาการนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชานวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
Academic Journal of Industrial Technology Innovation, Doctor of Philosophy Program in Innovation of Industrial Technology
and Faculty of Industrial Technology Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 มกราคม - เมษายน 2569, Vol. 4 No. 1 January - April 2026, ISSN: 2822-1125 (Print), ISSN: 3027-8090 (Online)

เจ้าของ หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชานวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

บรรณาธิการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิศันย์ 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 เทคนิคและอาชีพศึกษา อุตสาหกรรมจากภูมิปัญญาชุมชน การจัดการและบริหารภูมิปัญญาด้านการผลิตเชิงอุตสาหกรรม ชุมชนเพื่อก้าวสู่สากล
- ส่งเสริมธรรมาภิบาลในการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ เช่น การไม่คัดลอกผลงาน การตีพิมพ์ซ้ำซ้อน การปลอมแปลงหรือสร้างข้อมูลอันเป็นเท็จเพื่อประโยชน์ของตนเองและองค์กร

ขอบเขตบทความ

เป็นวารสารที่ครอบคลุมสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี บทความมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาทางด้านนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม อาทิ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ อุตสาหกรรมศึกษา เทคนิคและอาชีพศึกษา 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 คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
--------------------------------------	---

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

อาจารย์ประภัสสร กุลทอง	สาขาวิชาการจัดการนวัตกรรมอุตสาหกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล ปานศรีนวล	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
คณะผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบภาษาอังกฤษ	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โยฟ้า ตระกูลสันติ	สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรมและจีستิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ดร.ธานี จินตสุทธศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และอุตสาหกรรมดิจิทัล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ดร.ปิสุตา สังข์ศรี	สาขาวิชาการจัดการนวัตกรรมอุตสาหกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม 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 คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
นายโพธิ์เศรษฐ์ โพธิ์ปลอด	นักวิชาการโสตทัศนศึกษา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
นางสาวชาลิสา พรหมณัฐ	นักวิเคราะห์นโยบายและแผน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
นางสาวพัชณีย์สินี แก้วคงจันทร์	นักวิชาการเงินและบัญชี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ปก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย แก้วดี

สำนักงาน 1812 อาคาร 18 คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
เลขที่ 1 หมู่ที่ 4 ตำบลท่าจี่ อำเภอมะนัง นครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280
โทรศัพท์: 075-377-439 e-mail: technstru.editorjournal@gmail.com

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

พิมพ์ที่ สำนักงานหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏ
นครศรีธรรมราช 1812 อาคาร 18
เลขที่ 1 หมู่ที่ 4 ตำบลท่าจี่ อำเภอมะนัง นครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280
โทรศัพท์บรรณาธิการ: 089-729-2549 e-mail editor: technstru.editorjournal@gmail.com

ข้อกำหนดเฉพาะของวารสาร

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

ค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์บทความ :

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

บทบรรณาธิการ

“วารสารวิชาการนวัตกรรมอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี” ปัจจุบันเป็นฉบับที่ 1 ของปีที่ 4 โดยเป็นวารสารของหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ซึ่งจัดทำขึ้นเพื่อส่งเสริมและสนับสนุนให้นักศึกษา คณาจารย์ บุคลากร นักวิชาการ ตลอดจนผู้สนใจทั้งภายในและภายนอกในการพัฒนางานวิจัย บทความวิชาการ บทความวิจารณ์ และบทความปริทัศน์ ได้มีช่องทางในการนำเสนอความคิด และผลผลิตจากการพัฒนางานวิจัยในระดับสูง สื่อสารผลงานวิชาการสู่ภายนอกอย่างเป็นระบบในช่องทางวิชาการ โดยการจัดทำวารสารมีเป้าหมายสู่การรับรองในกลุ่มภายในประเทศและวางกรอบสูงระดับนานาชาติในอนาคต

ขอบเขตของผลงานในวารสาร “วารสารวิชาการนวัตกรรมอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี” เน้นเผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการ บทความวิจารณ์ และบทความปริทัศน์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี บทความมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องอาทิเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ อุตสาหกรรมศึกษา เทคนิคและอาชีวศึกษา อุตสาหกรรมศิลป์ สถาปัตยกรรมและการออกแบบ และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับเทคโนโลยีอุตสาหกรรม เพื่อในกรอบความคิดและการนำเสนอเป็นศาสตร์เดียวกัน โดยมีการจัดพิมพ์ฉบับนี้เป็นบทความวิจัยจำนวน 7 เรื่อง โดยมีผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความเรื่องละ 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	
นวัตกรรมแม่พิมพ์ลายนะโมจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ สำหรับการผลิตผ้าบาติก จังหวัดนครศรีธรรมราช NAMO PATTERN MOLD INNOVATION VIA 3D PRINTING FOR BATIK PRODUCTION IN NAKHON SI THAMMARAT ฉัตรชัย แก้วดี	1-15
การสร้างนวัตกรรมศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบของ ‘การเชิดสิงโต’ ในฐานะมรดกทางวัฒนธรรม ที่จับต้องไม่ได้ ภายใต้กรอบแนวคิดการถ่ายทอดความหมายทางวัฒนธรรม CREATION OF INTERACTIVE DIGITAL ART INNOVATION OF ‘LION DANCE’ AS INTANGIBLE CULTURAL HERITAGE UNDER THE FRAMEWORK OF CULTURAL SEMANTIC TRANSMISSION นา เชี่ยว, เกรียงศักดิ์ เขียวมั่ง, มียอง ขอ	16-36
การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของคันทางเสริมแรงด้วยจีโอเท็กซ์ไทล์บนชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนัง ที่ปรับปรุงโดยขนทางบนเสาเข็ม FINITE ELEMENT ANALYSIS OF GEOTEXTILE-REINFORCED EMBANKMENT ON PAK PANANG SOFT CLAY STABILIZED BY BERM ON PILES วีระศักดิ์ ชำนิธุระการ1*, ภาณุ พร้อมพุดธางกูร	37-55
การประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจต่อการใช้งานเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วย กึ่งอัตโนมัติแบบทูอินวันสำหรับงานกายภาพบำบัด EFFICIENCY AND USER SATISFACTION EVALUATION OF A SEMI-AUTOMATED 2-IN-1 WALKING AND LIFTING ASSIST DEVICE FOR PHYSICAL THERAPY อภิพงศ์ ชื่นประกอบเกิด, ฉัตรชัย แก้วดี, วีรพล ปานศรีนวล, วีระยุทธ สุตสมบุรณ์	56-69
APPLICATION OF BAMBOO POWDER COMPOSITES IN FRUIT PACKAGING การประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบจากผงไม้ไผ่ในบรรจุภัณฑ์ผลไม้ Yumei Fu, Miyoung Seo, Kriangsak Khiaomang	70-85

ชั้นพื้นทางจากส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์นำกลับมาใช้ใหม่และดินลูกรังผสมกับซีเมนต์

BASE DERIVED FROM RAP AND LATERITIC SOIL MIXED WITH CEMENT

86-106

วงศ์ เสาวนีย์พิทักษ์, ภาณุ พร้อมพุดธางกูร

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรและการวิเคราะห์แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ORGANIZATION CARBON FOOTPRINT ASSESSMENT AND HOTSPOT ANALYSIS OF
GREENHOUSE GAS EMISSIONS AT NAKHON SI THAMMARAT RAJABHAT UNIVERSITY

107-127

รอยหทัย แก้วใหม่, เอกลักษณ์ กาญจนเพ็ญ, ฉัตรชัย แก้วดี, สันติ ขำตรี, ศรีวรรณ ขำตรี

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับ

128

จริยธรรมในการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสาร (Publication Ehtics)

135

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาบทความวารสารวิชาการนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

137

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาภาษาอังกฤษวารสารวิชาการนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ปีที่ 4 เล่มที่ 1 (มกราคม - เมษายน 2569)

แบบประเมินคุณภาพตามความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิสำหรับการตีพิมพ์บทความวิจัย/บทความ

138

วิชาการวารสารนวัตกรรมอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิตและคณะเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

แบบสรุปผลการประเมินบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารนวัตกรรมอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

139

หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิตและคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

นวัตกรรมแม่พิมพ์ลายนะโมจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ สำหรับการผลิตผ้าบาติก

จังหวัดนครศรีธรรมราช

NAMO PATTERN MOLD INNOVATION VIA 3D PRINTING FOR BATIK PRODUCTION
IN NAKHON SI THAMMARATฉัตรชัย แก้วดี^{1*}Chatchai Kaewdee^{1*}¹ ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชานวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

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

วันที่รับบทความ: 23 ธันวาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 8 เมษายน 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 11 เมษายน 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 29 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ลายนะโมด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) 2) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนและประสิทธิภาพของวัสดุระหว่างพลาสติกชนิด ABS และ PLA ในกระบวนการทำผ้าบาติก และ 3) เพื่อพัฒนาและประเมินผลชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์สำหรับถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติก จังหวัดนครศรีธรรมราช ระเบียบวิธีวิจัยใช้การวิจัยและพัฒนา (Research and Development) โดยเก็บข้อมูลจากกลุ่มทดลองนำร่องและกลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติก ผลการวิจัยพบว่าแม่พิมพ์ลายนะโมที่พัฒนาขึ้นมีความคมชัดและลดต้นทุนการผลิตได้ถึงร้อยละ 94.60 เมื่อเทียบกับแม่พิมพ์โลหะดั้งเดิม วัสดุ ABS มีความเหมาะสมเชิงวิศวกรรมสูงสุดเนื่องจากมีเสถียรภาพทางมิติโดยเสียรูปเพียงร้อยละ 0.15 ขณะที่วัสดุ PLA เกิดการเสียรูปจนสูญเสียสภาพ สำหรับชุดองค์ความรู้มีประสิทธิภาพ (E1/E2) เท่ากับ 93.20/90.00 และสร้างความพึงพอใจในระดับมากที่สุด คุณูปการของงานวิจัยนี้คือการนำเสนอแนวทางบูรณาการนวัตกรรมการพิมพ์ 3 มิติ เพื่อยกระดับงานหัตถกรรมพื้นถิ่นให้สามารถพึ่งพาตนเองและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันเชิงสร้างสรรค์ได้อย่างมีระบบ

คำสำคัญ: การพิมพ์ 3 มิติ, แม่พิมพ์ผ้าบาติก, ลายนะโม, เสถียรภาพทางความร้อน

Abstract: The objectives of this research were 1) to design and develop Namu pattern molds using 3D printing technology, 2) to compare the thermal properties and material efficiency between ABS and PLA plastics in the batik production process, and 3) to develop and evaluate a knowledge set on mold fabrication for technology transfer to batik producers in Nakhon Si Thammarat province. Using a Research and Development (R&D) methodology, the study combined engineering testing with data collection from a pilot group and local batik producers. The results revealed that the developed molds were accurate to the traditional identity and reduced production costs by 94.60% compared to metal molds. ABS was found to be the most suitable material due to its high dimensional stability with a deformation rate of only 0.15% during immersion in hot

wax, whereas PLA suffered structural failure. The developed knowledge set achieved an efficiency (E1/E2) of 93.20/90.00 with the highest level of user satisfaction. This research contributes a practical framework for integrating 3D printing technology into traditional crafts, enhancing self-reliance and creative competitiveness for community enterprises.

Keywords: 3D printing, Batik stamp, Namo pattern, Thermal stability

1. บทนำ

อุตสาหกรรมผ้าทอและสิ่งทอพื้นเมืองของประเทศไทยถือเป็นหนึ่งในกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจฐานราก (Local Economy) ตามนโยบายเศรษฐกิจสร้างสรรค์ (Creative Economy) โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคใต้ จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งมีชื่อเสียงด้านหัตถกรรม "ผ้าบาติก" หรือผ้ายกเมืองนคร ที่มีอัตลักษณ์โดดเด่น [1] อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันกระบวนการผลิตผ้าบาติกแบบดั้งเดิมกำลังเผชิญกับความท้าทายในด้านต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น โดยเฉพาะขั้นตอนการทำ "แม่พิมพ์" (Batik Stamp/Cap) ซึ่งวัสดุส่วนใหญ่ทำจากทองแดงหรือโลหะผสมที่มีราคาสูง มีน้ำหนักมากส่งผลกระทบต่อสรีระของผู้ปฏิบัติงานเมื่อใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลานาน และที่สำคัญคือการขาดแคลนช่างฝีมือในการดัดแปลงลายโลหะที่มีความละเอียดซับซ้อน ส่งผลให้การพัฒนาลวดลายใหม่ ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดทำได้ล่าช้า [2]

จากข้อจำกัดดังกล่าว เทคโนโลยีการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing) หรือ "การพิมพ์ 3 มิติ" (3D Printing) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการปฏิวัติกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) เนื่องจากสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงได้อย่างรวดเร็ว (Rapid Prototyping) มีความแม่นยำ และมีต้นทุนต่ำกว่าการขึ้นรูปโลหะแบบดั้งเดิม [3] มีงานวิจัยหลายฉบับในต่างประเทศ โดยเฉพาะในประเทศอินโดนีเซียและมาเลเซีย ที่ได้เริ่มนำเทคโนโลยี Fused Deposition Modeling (FDM) มาประยุกต์ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ผ้าบาติกทดแทนโลหะ ซึ่งพบว่าสามารถลดต้นทุนการผลิตได้มากกว่าร้อยละ 80 และเพิ่มความยืดหยุ่นในการออกแบบลวดลาย [4], [5]

อย่างไรก็ตาม ประเด็นท้าทายสำคัญของการนำแม่พิมพ์พลาสติกจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติมาใช้ในการกระบวนการทำผ้าบาติก คือ "สมบัติทางความร้อน" (Thermal Properties) เนื่องจากน้ำเทียนที่ใช้ในการเขียนลาย (Wax Resist Dyeing) มีอุณหภูมิใช้งานอยู่ที่ประมาณ 80-100 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงหรือสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature: T_g) ของพลาสติกทั่วไป เช่น Polylactic Acid (PLA) ที่เริ่มอ่อนตัว ที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ทำให้แม่พิมพ์เกิดการเสียรูปเมื่อใช้งานจริง [6] ในขณะที่พลาสติกชนิด Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) มีสมบัติทนความร้อนได้สูงกว่า แต่ต้องแลกมาด้วยความยากในการพิมพ์และการควบคุมการหดตัว [7] ดังนั้น การศึกษาเปรียบเทียบเชิงลึกเพื่อหาวัสดุและพารามิเตอร์การพิมพ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับบริบทการใช้งานจริงของช่างทำผ้าบาติกจึงเป็นเรื่องจำเป็นเร่งด่วน

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลาย "นะโม" ซึ่งเป็นตราสัญลักษณ์ที่เป็นมงคลและเป็นอัตลักษณ์ทางวัฒนธรรมที่สำคัญของจังหวัดนครศรีธรรมราช [8] ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยทำการเปรียบเทียบสมบัติทางวิศวกรรมและการใช้งานจริงระหว่างวัสดุ ABS และ PLA เพื่อสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบที่มีคุณภาพ ทนความร้อน และมีราคาที่เกษตรกรหรือผู้ประกอบการรายย่อยสามารถเข้าถึงได้ การวิจัยนี้ไม่เพียงแต่มุ่งเน้นผลลัพธ์เชิงผลิตภัณฑ์ แต่ยังให้ความสำคัญกับการสร้าง "ชุดองค์ความรู้" เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน อันจะนำไปสู่การยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันลดต้นทุนการผลิต และอนุรักษ์ลวดลายพื้นถิ่นให้คงอยู่คู่กับนวัตกรรมสมัยใหม่อย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ลายระโนมด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing)

2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนและประสิทธิภาพของวัสดุระหว่างพลาสติกชนิด ABS และ PLA ในกระบวนการทำผ้าบาติก

2.3 เพื่อพัฒนาและประเมินผลชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์สำหรับถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติกจังหวัดนครศรีธรรมราช

3. ขอบเขตการวิจัย

เพื่อให้การศึกษามีเรื่อง "การพัฒนาชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลายระโนมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติสำหรับกลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติกจังหวัดนครศรีธรรมราช" บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของการดำเนินงานไว้ดังนี้

3.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา การวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) เพื่อสร้างนวัตกรรมแม่พิมพ์ผ้าบาติก โดยมีขอบเขตเนื้อหาที่ครอบคลุม 2 มิติหลัก ดังนี้

3.1.1 การออกแบบและวิศวกรรมวัสดุ มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางวิศวกรรมเพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดของแม่พิมพ์ดั้งเดิม โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานดังนี้

1) การถอดรหัสสัญลักษณ์และออกแบบแม่พิมพ์ (Pattern Decoding & CAD Design) โดยศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้าง "ลายระโนม" ซึ่งเป็นอัตลักษณ์ดั้งเดิมของจังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อถอดแบบเป็นไฟล์ดิจิทัลและดำเนินการออกแบบแม่พิมพ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (Computer Aided Design: CAD) โดยคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ทางวิศวกรรมที่สำคัญ ได้แก่ ความลึกของลวดลาย (Relief Depth) ที่เหมาะสมต่อการอุ้มน้ำเทียน, มุมสอป (Draft Angle) เพื่อลดแรงเสียดทานขณะยกแม่พิมพ์ออกจากผ้า, และการออกแบบด้ามจับตามหลักสรีรศาสตร์ (Ergonomics) เพื่อลดความเมื่อยล้าของผู้ใช้งาน

2) กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน (3D Printing Fabrication) โดยสร้างต้นแบบแม่พิมพ์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ระบบ Fused Deposition Modeling (FDM) และศึกษาการตั้งค่าพารามิเตอร์การพิมพ์ (Slicing Parameters) ที่เหมาะสม เช่น ความหนาแน่นของโครงสร้างภายใน (Infill Density) และรูปแบบโครงสร้าง (Infill Pattern) เพื่อให้แม่พิมพ์มีความแข็งแรงและกักเก็บความร้อนได้ดีที่สุด

3) การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติวัสดุ (Material Property Comparison) โดยเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) และสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ของพลาสติกวิศวกรรม 2 ชนิด คือ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) และ Polylactic Acid (PLA) และทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานจริง (Field Testing) โดยการแช่ในน้ำเทียนผสม (Wax) ที่อุณหภูมิใช้งานจริง (ประมาณ 80-100 องศาเซลเซียส) เพื่อวิเคราะห์การเสียรูป (Deformation), ความเสถียรของมิติ (Dimensional Stability), และความคมชัดของลวดลายที่ปรากฏบนผืนผ้าหลังการพิมพ์

3.1.2 การจัดการความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยี

มุ่งเน้นการสังเคราะห์องค์ความรู้จากผลการทดลองทางวิศวกรรม เพื่อสร้างเครื่องมือในการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน ดังนี้

1) การพัฒนาชุดองค์ความรู้ (Knowledge Set Development) โดยสร้างสื่อการเรียนรู้ที่ประกอบด้วย “คู่มือปฏิบัติการ (Manual)” และ “สื่อวิดีโอสาธิต (Video Demonstration)” และเนื้อหาครอบคลุมตั้งแต่พื้นฐานการออกแบบลายระโนม การเลือกใช้วัสดุ (ABS vs PLA) ขั้นตอนการพิมพ์ 3 มิติ เทคนิคการขัดแต่งผิวชิ้นงาน (Post-processing) เช่น การอบไออะซิโตนสำหรับ ABS และวิธีการดูแลรักษาแม่พิมพ์

2) การหาประสิทธิภาพของชุดองค์ความรู้ (Efficiency Testing) โดยนำชุดองค์ความรู้ไปทดสอบหาประสิทธิภาพตามเกณฑ์มาตรฐาน (E1/E2) เพื่อให้มั่นใจว่า

สื่อที่ผลิตขึ้นมีคุณภาพและสามารถสร้างความเข้าใจให้กับผู้เรียนได้จริง

3) การถ่ายทอดเทคโนโลยีและการประเมินผล (Technology Transfer & Evaluation) โดยจัดอบรมเชิงปฏิบัติการให้กับกลุ่มเป้าหมาย เพื่อถ่ายทอดทักษะการสร้างและการใช้งานแม่พิมพ์และประเมินผลความสำเร็จผ่านการเปรียบเทียบความรู้ก่อนและหลังการอบรม (Pre-test/Post-test) และศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อชุดองค์ความรู้และนวัตกรรมแม่พิมพ์ต้นแบบ

3.2 ขอบเขตด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยได้กำหนดกลุ่มเป้าหมายในการศึกษาออกเป็น 2 ระยะ เพื่อตรวจสอบคุณภาพของนวัตกรรมและประเมินผลการใช้งานจริง ดังนี้

3.2.1 ระยะที่ 1 กลุ่มทดลองนำร่อง ใช้สำหรับทดสอบประสิทธิภาพของชุดองค์ความรู้และนวัตกรรม (Try-out) เพื่อหาข้อบกพร่องและปรับปรุงแก้ไขก่อนนำไปใช้จริง กลุ่มตัวอย่าง คือ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชานวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา จำนวน 5 คน ประกอบด้วยนักศึกษาระดับปริญญาเอก (หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต) จำนวน 2 คน และ นักศึกษาระดับปริญญาโท (หลักสูตรเทคโนโลยีมหาบัณฑิต) จำนวน 3 คน

3.2.2 ระยะที่ 2 กลุ่มเป้าหมายการถ่ายทอดเทคโนโลยี ใช้สำหรับศึกษาผลสัมฤทธิ์ของการนำนวัตกรรมไปใช้จริงในเชิงพาณิชย์ กลุ่มตัวอย่าง คือ ผู้ประกอบการหรือสมาชิกกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตผ้าบาติก ในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา จำนวน 30 คน ซึ่งได้มาจากการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกคือเป็นผู้ที่มีประสบการณ์ในการทำผ้าบาติกไม่น้อยกว่า 3 ปี และมีความสนใจในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่

3.3 ขอบเขตด้านตัวแปร ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรที่ศึกษาเพื่อให้ครอบคลุมทั้งมิติทางวิศวกรรม (Engineering Dimension) และมิติทางสังคมศาสตร์ (Social Science Dimension) โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 ตัวแปรต้น คือ สิ่งที่ผู้วิจัยกำหนดขึ้นหรือจัดกระทำเพื่อศึกษาผลที่ตามมา ประกอบด้วย

1) ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์แม่พิมพ์ 3 มิติ (Types of 3D Printing Filament) ศึกษาเปรียบเทียบพลาสติกวิศวกรรม 2 ชนิด ที่มีคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างกัน เพื่อค้นหาวัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการทำผ้าบาติก ได้แก่ (1) Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติเด่นด้านความแข็งแรง ทนต่อแรงกระแทก และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) สูง (ประมาณ 105 องศาเซลเซียส) และ (2) Polylactic Acid (PLA) พลาสติกชีวภาพที่พิมพ์ขึ้นรูปได้ง่าย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ต่ำกว่า (ประมาณ 60-65 องศาเซลเซียส)

2) ชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลายณะโมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (Knowledge Set on Fabricating Namo Pattern Molds) คือ นวัตกรรมกระบวนการที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น ประกอบด้วย สื่อการเรียนรู้แบบผสมผสาน ได้แก่ (1) คู่มือการปฏิบัติงาน (Handbook) (2) คลิปวิดีโอสาธิตขั้นตอนการออกแบบและการพิมพ์ (Video Demonstration) และ (3) ไฟล์ต้นแบบดิจิทัล (Digital Prototype Files) สำหรับถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน

3.3.2 ตัวแปรตาม คือ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการกระทำของตัวแปรต้น ซึ่งวัดผลได้ใน 4 ด้าน ดังนี้

1) ประสิทธิภาพของแม่พิมพ์ (Mold Efficiency) ประเมินจากสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนจากการใช้งานจริง ประกอบด้วย (1) การคงรูป (Dimensional Stability) ความสามารถของแม่พิมพ์ในการรักษารูปร่างและมิติ (Dimensions) ไม่ให้เกิดการบิดเบี้ยว (Warping) หรือหดตัวหลังจากผ่านความร้อน (2) การทนความร้อน (Thermal Resistance) ความสามารถในการทนต่อน้ำเยียนที่มีอุณหภูมิใช้งานจริง (80-100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่อเนื่องโดยไม่เกิดการอ่อนตัวหรือเสียสภาพ และ (3) ความคมชัดของลวดลาย (Pattern Sharpness) คุณภาพของรอย

พิมพ์เทียนบนผืนผ้า ซึ่งต้องมีความต่อเนื่อง สม่ำเสมอ และแสดงรายละเอียดของ "ลายนะโม" ได้อย่างถูกต้องชัดเจน

2) ประสิทธิภาพของชุดองค์ความรู้ (E1/E2) การประเมินคุณภาพของกระบวนการถ่ายทอดเทคโนโลยีตามเกณฑ์มาตรฐาน 80/80 ประกอบด้วย (1) ประสิทธิภาพของกระบวนการ (E1) ประเมินจากคะแนนเฉลี่ยของการทำแบบฝึกหัดหรือการปฏิบัติงานระหว่างกระบวนการ และ (2) ประสิทธิภาพของผลลัพธ์ (E2) ประเมินจากคะแนนเฉลี่ยของการทำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์หลังการอบรม (Post-test)

3) ความรู้ความเข้าใจของผู้เข้ารับการอบรม (Knowledge and understanding) วัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ของผู้เข้าร่วมโครงการ โดยเปรียบเทียบคะแนนจากการทำแบบทดสอบก่อนเรียน (Pre-test) และหลังเรียน (Post-test) เพื่อวิเคราะห์พัฒนาการทางความรู้เกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยี 3D Printing ในงานหัตถกรรม

4) ความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมาย (Satisfaction) ประเมินระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อ “ชุดองค์ความรู้” (ความเข้าใจง่ายและความชัดเจน) และ “แม่พิมพ์ต้นแบบ” (การใช้งานจริง การลดต้นทุน และความสะดวกสบาย) โดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า (Likert Scale)

3.4 ขอบเขตด้านพื้นที่ พื้นที่ดำเนินการวิจัยครอบคลุม 2 ส่วน ได้แก่

3.4.1 พื้นที่ปฏิบัติการทดลอง คือ ห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช (สำหรับการทดสอบวัสดุและกลุ่มทดลองนำร่อง)

3.4.2 พื้นที่ขยายผล คือ สถานประกอบการของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผ้าบาติก ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช

3.5 ขอบเขตด้านระยะเวลา ดำเนินการวิจัยระหว่างเดือน พฤษภาคม 2567 ถึง เดือนสิงหาคม 2567 (รวมระยะเวลา 4 เดือน)

4. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลายนะโมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติสำหรับกลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติกจังหวัดนครศรีธรรมราช” เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) โดยมี ขั้นตอนการดำเนินงาน 4 ระยะ ดังนี้

4.1 ระยะที่ 1 การศึกษาและออกแบบแม่พิมพ์ ในระยะนี้ ผู้วิจัยมุ่งเน้นการรวบรวมองค์ความรู้พื้นฐานและการพัฒนาต้นแบบเชิงความคิด (Conceptual design) ให้มีความถูกต้องตามหลักวิศวกรรมและสอดคล้องกับอัตลักษณ์ท้องถิ่น โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานละเอียดดังนี้

4.1.1 การศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐาน ผู้วิจัยดำเนินการรวบรวมข้อมูลทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิจากแหล่งข้อมูลที่เชื่อถือได้เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลหลักในการวิเคราะห์และกำหนดกรอบแนวคิดในการวิจัย ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ ดังนี้

1) การศึกษาอัตลักษณ์ลวดลายหัวนะโม (Namo pattern identity) ศึกษาเอกสารทางประวัติศาสตร์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ “หัวนะโม” ของจังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อทำความเข้าใจประวัติความเป็นมา ความหมายเชิงสัญลักษณ์ และองค์ประกอบทางภาพ (Visual elements) ที่เป็นลักษณะเด่น [9] เช่น รูปทรงกลม อักษรโบราณ และสัดส่วนของเส้นสาย เพื่อนำมาถอดรหัส (Decoding) เป็นลวดลายดิจิทัลที่ยังคงความถูกต้องของรากฐานวัฒนธรรมเดิม

2) การศึกษาคุณสมบัติวัสดุวิศวกรรม (Material property study) ศึกษาคุณสมบัติทางกลและทางความร้อนของพลาสติกสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D printing filament) สองชนิด ได้แก่ ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) และ PLA (Polylactic Acid) โดยเน้นการเปรียบเทียบค่าวิกฤตที่ส่งผลต่อการใช้งานในกระบวนการทำผ้าบาติก ได้แก่ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature: T_g) จุดหลอมเหลว (Melting point) และสัมประสิทธิ์การขยายตัว

เมื่อได้รับความร้อน (Coefficient of thermal expansion) เพื่อคาดการณ์พฤติกรรมของวัสดุเมื่อต้องสัมผัสกับน้ำเย็น ที่มีอุณหภูมิสูง 80-100 องศาเซลเซียส

4.1.2 การออกแบบและจำลองแม่พิมพ์ ผู้วิจัยนำ ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาดำเนินการออกแบบเชิงวิศวกรรม (Engineering design) เพื่อสร้างไฟล์ต้นแบบดิจิทัล โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ (3D modeling) ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer-Aided Design: CAD) เช่น SolidWorks หรือ Fusion 360 ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ลายนิ้วให้เป็นไฟล์ดิจิทัล (.STL หรือ .OBJ) ที่มีความละเอียดสูง

2) การกำหนดค่าพารามิเตอร์การออกแบบ (Design parameters) กำหนดค่าทางวิศวกรรม ที่สำคัญ เพื่อแก้ปัญหาทางเทคนิคของแม่พิมพ์ปั๊มเทียน ได้แก่ (1) ความลึกของลวดลาย (Relief depth) กำหนดให้อยู่ในช่วง 3.0 - 5.0 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมที่สุด ที่ช่วยให้แม่พิมพ์สามารถอุ้มน้ำเทียนได้ในปริมาณที่พอเหมาะ ไม่แห้งเร็วเกินไป และไม่เยิ้มจนทำให้ลายผ้าเสียหาย (2) มุมสอบ (Draft angle) กำหนดมุมเอียงของผนังลวดลายประมาณ 3 - 5 องศา (ทดลองค่ามุมที่ 0-7 องศา) เพื่อลดแรงเสียดทานและแรงตึงผิวระหว่างพลาสติกกับน้ำเทียน ช่วยให้การยกแม่พิมพ์ออกจากผ้าทำได้ง่ายและเส้นเทียนมีความคมชัด ไม่ขาดตอน และ (3) การออกแบบด้ามจับ (Handle design) ออกแบบด้ามจับให้สอดคล้องกับหลักสรีรศาสตร์ (Ergonomics) และมีการเว้นระยะห่างจากหน้าสัมผัสความร้อน เพื่อความปลอดภัยและความสะดวกในการจับถือของผู้ปฏิบัติงานขณะปั๊มลายต่อเนื่องเป็นเวลานาน

4.2 ระยะที่ 2 การพัฒนาแม่พิมพ์ และทดสอบประสิทธิภาพวัสดุ ในระยะนี้ ผู้วิจัยมุ่งเน้นการสร้างต้นแบบจริงและการพิสูจน์ทราบสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ เพื่อให้มั่นใจว่าแม่พิมพ์ที่ผลิตขึ้นสามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงของกระบวนการทำผ้าบาติกได้ โดยมีขั้นตอนละเอียดดังนี้

4.2.1 การขึ้นรูปชิ้นงาน ผู้วิจัยดำเนินการพิมพ์แม่พิมพ์ต้นแบบลายนิ้วที่ได้จากการออกแบบในระยะที่ 1 ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D Printer) ระบบฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Fused Deposition Modeling: FDM) โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์การพิมพ์ (Printing parameters) ให้มีความละเอียดสูง (Layer height 0.15 - 0.20 mm) และกำหนดความหนาแน่นของโครงสร้างภายใน (Infill density) ที่ร้อยละ 100 เพื่อให้แม่พิมพ์มีความแข็งแรงและสามารถกักเก็บความร้อนได้ดีที่สุด โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม ตามชนิดของวัสดุ ได้แก่

1) ชุดการทดลองที่ 1 ใช้วัสดุ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ซึ่งเป็นพลาสติกวิศวกรรมที่มีจุดเด่นด้านความแข็งแรงและทนความร้อนสูง

2) ชุดการทดลองที่ 2 ใช้วัสดุ Polylactic Acid (PLA) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพที่พิมพ์ขึ้นรูปได้ง่ายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

4.2.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน ดำเนินการทดสอบการใช้งานจริง (Field testing) ในสภาวะควบคุม (Controlled environment) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุทั้งสองชนิด ดังนี้

1) การเตรียมการทดสอบ เตรียมอ่างต้มเทียนควบคุมอุณหภูมิ (Wax pot) ที่บรรจุน้ำเทียนผสม (เทียนขี้ผึ้งและพาราฟิน) ซึ่งเป็นสูตรมาตรฐานที่ใช้ในชุมชน

2) ขั้นตอนการทดสอบ นำแม่พิมพ์ต้นแบบทั้ง ABS และ PLA แช่ลงในน้ำเทียนที่อุณหภูมิใช้งานจริงคือ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่อเนื่อง 60 นาที

3) การเก็บข้อมูล สังเกตและบันทึกการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพทุก ๆ 10 นาที โดยพิจารณาตัวชี้วัดสำคัญ ได้แก่ การเสียรูป (Deformation) การบิดงอ (Warping) และความอ่อนตัวของวัสดุ รวมถึงการวัดมิติ (Dimension measurement) ก่อนและหลังการทดสอบด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ เพื่อคัดเลือกวัสดุที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงสุด (High thermal stability) มาใช้ในการผลิตแม่พิมพ์สำหรับถ่ายทอดองค์ความรู้ต่อไป

4.3 ระยะที่ 3 การสร้างชุดองค์ความรู้และทดลองใช้กับกลุ่มนำร่อง ระยะนี้เป็นการแปลงเทคโนโลยีสู่สื่อการเรียนรู้และการตรวจสอบคุณภาพของนวัตกรรมก่อนนำไปเผยแพร่ มีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 การสร้างเครื่องมือ ได้แก่

1) พัฒนาชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ 3 มิติ ที่ประกอบด้วย (1) คู่มือการใช้งาน (Manual) ที่อธิบายขั้นตอนการออกแบบและการพิมพ์อย่างละเอียด และ (2) สื่อวิดีโอสาธิต (Video demonstration) ที่แสดงเทคนิคปฏิบัติจริง

2) สร้างเครื่องมือวัดผล สร้างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน (Knowledge test) และแบบประเมินความพึงพอใจ (Satisfaction questionnaire) เป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Likert scale)

3) การตรวจสอบคุณภาพ (IOC) นำชุดองค์ความรู้และเครื่องมือวัดผลไปให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน ตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (Content validity) โดยหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Item-Objective Congruence: IOC) ซึ่งต้องมีค่าดัชนีตั้งแต่ 0.50 ขึ้นไป จึงจะถือว่าผ่านเกณฑ์

4.3.2 การทดลองใช้ (Try-out) นำนวัตกรรมไปทดลองใช้ (Try-out) กับ กลุ่มทดลองนำร่อง (Pilot group) จำนวน 5 คน ซึ่งประกอบด้วย 1) นักศึกษาระดับปริญญาโท (หลักสูตรเทคโนโลยีมหาบัณฑิต) จำนวน 3 คน และ 2) นักศึกษาระดับปริญญาเอก (หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต) จำนวน 2 คน โดยกลุ่มนี้จะทำหน้าที่ตรวจสอบความถูกต้องทางเทคนิค ความชัดเจนของเนื้อหา และความเป็นไปได้ในการปฏิบัติจริง ก่อนนำไปใช้กับชุมชน

4.4 ระยะที่ 4 การถ่ายทอดเทคโนโลยีและประเมินผล ระยะสุดท้ายคือการนำนวัตกรรมสู่ชุมชนและประเมินความสำเร็จของการวิจัย มีขั้นตอนดังนี้

4.4.1 การคัดเลือกกลุ่มเป้าหมาย ดำเนินการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างโดยใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive sampling) ได้แก่ กลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติกในจังหวัด

นครศรีธรรมราช จำนวน 30 คน โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกคือ เป็นผู้ประกอบการหรือสมาชิกกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่มีประสบการณ์ในการทำผ้าบาติก และมีความสนใจในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่

4.4.2 การดำเนินการถ่ายทอดเทคโนโลยี

จัดโครงการอบรมเชิงปฏิบัติการ (Workshop) เรื่อง “การสร้างและใช้งานแม่พิมพ์ลายระโนมจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ” โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1) ทดสอบก่อนเรียน (Pre-test) เพื่อวัดระดับความรู้พื้นฐานของผู้เข้ารับการอบรม

2) การถ่ายทอดองค์ความรู้ บรรยายให้ความรู้ประกอบการใช้คู่มือและวิดีโอสาธิต และฝึกปฏิบัติการ (Hands-on practice) การใช้งานแม่พิมพ์ร่วมกับเทคนิคการทำผ้าบาติก

3) ทดสอบหลังเรียน (Post-test) เพื่อวัดพัฒนาการและความเข้าใจที่เพิ่มขึ้น

4) การนำไปใช้จริง ให้กลุ่มเป้าหมายนำแม่พิมพ์ต้นแบบไปทดลองผลิตชิ้นงานจริง (Product trial) เพื่อประเมินผลเชิงประจักษ์

4.4.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

รวบรวมข้อมูลจากคะแนนสอบและแบบ สอบถามความพึงพอใจ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ดังนี้

1) สถิติพื้นฐาน วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) สำหรับข้อมูลความพึงพอใจ

2) สถิติทดสอบสมมติฐาน เปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ก่อนและหลังการอบรมด้วยสถิติ t-test แบบกลุ่มตัวอย่างไม่เป็นอิสระต่อกัน (Dependent samples t-test) เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของชุดองค์ความรู้ที่พัฒนาขึ้น โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ .05

5. ผลการวิจัย

จากการดำเนินการวิจัยและพัฒนาชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลายระโนมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อยกระดับกระบวนการผลิตผ้าบาติกของวิสาหกิจชุมชนจังหวัด

นครศรีธรรมราช ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลองตามลำดับวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 ผลการออกแบบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุแม่พิมพ์ ผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบและสร้างต้นแบบแม่พิมพ์ลายนะโม โดยมุ่งเน้นการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมของแม่พิมพ์โลหะดั้งเดิม และทดสอบสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของวัสดุพลาสติกวิศวกรรม เพื่อคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมที่สุด โดยมีผลการดำเนินงานดังนี้

5.1.1 ผลการออกแบบเชิงวิศวกรรม ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลอง 3 มิติ (3D model) ของลายนะโมที่มีความสมมาตร และถูกต้องตามอัตลักษณ์ศิลปกรรมท้องถิ่น โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์การออกแบบ (Design parameters) ที่สำคัญเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานร่วมกับน้ำเทียน ดังนี้

1) ขนาดมิติ (Dimensions) กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ที่ 5.0 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานที่เหมาะสมต่อการจัดวางลวดลาย บนผืนผ้า ทั้งการทำลายหลักและลายประกอบ

2) ความลึกของลวดลาย (Relief depth) กำหนดความลึกของร่องลายที่ 4.0 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะความลึกวิกฤต (Critical depth) ที่ช่วยให้แม่พิมพ์สามารถอุ้มน้ำเทียนได้ในปริมาณที่เพียงพอต่อการปั๊ม 1 ครั้ง โดยไม่ทำให้น้ำเทียนแห้งเร็วเกินไปหรือเอี่ยมจนเสียรูป

3) มุมสอ (Draft angle) กำหนดมุมเอียงของผนังลวดลายที่ 5 องศา เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างพลาสติกกับน้ำเทียน (Surface tension reduction) ช่วยให้การยกแม่พิมพ์ออกจากผืนผ้าทำได้ง่าย น้ำเทียนหลุดออกจากแม่พิมพ์ได้หมดจด และไม่เกิดปัญหาสุญญากาศ (Vacuum effect) ที่ทำให้น้ำเทียนขาดตอน

5.1.2 ผลการขึ้นรูปและทดสอบวัสดุ (Fabrication and material testing) ผู้วิจัยได้ทำการขึ้นรูปแม่พิมพ์ต้นแบบด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ Fused Deposition Modeling (FDM) โดยกำหนดความละเอียดชั้นพิมพ์ (Layer height) ที่ 0.2 มิลลิเมตร และความหนาแน่น (Infill Density) ร้อยละ 100 เพื่อให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสูงสุด จากนั้นนำแม่พิมพ์

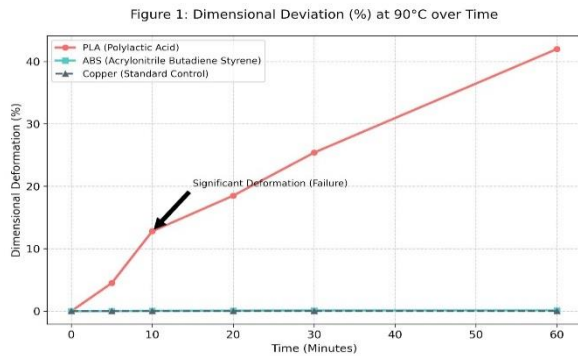
ที่ผลิตจากวัสดุ Polylactic Acid (PLA) และ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ไปทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal Resistance) โดยการแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่บรรจุน้ำเทียนร้อน 90 องศาเซลเซียส (90 องศาเซลเซียส) และสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพแสดงดังนี้

1) การวิเคราะห์เสถียรภาพทางมิติเมื่อได้รับความร้อน (Dimensional stability analysis) เพื่อขยายความเรื่อง “การเสียรูปของ PLA ภายใน 5 นาที” และ “ABS คงรูปได้ดี” ซึ่งแสดงไว้ตามตารางบันทึกผลการวัดค่าความเบี่ยงเบนของมิติ (Dimensional Deviation) ของแม่พิมพ์เมื่อแช่ในน้ำเทียน 90 องศาเซลเซียส เทียบกับเวลาดังตารางที่ 1 และภาพที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยร้อยละการเปลี่ยนแปลงของมิติ (% ΔL)

เมื่อได้รับความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส เทียบกับเวลา (n=5)

เวลา (นาที)	แม่พิมพ์ PLA (% การเสียรูป)	แม่พิมพ์ ABS (% การเสียรูป)	แม่พิมพ์โลหะ (% Control)
0	0.00	0.00	0.00
5	4.50	0.02	0.00
10	12.80	0.05	0.00
30	25.40	0.12	0.01
60	42.00	0.15	0.01
	(เสียรูปทรงสิ้นเชิง)	(คงรูป)	



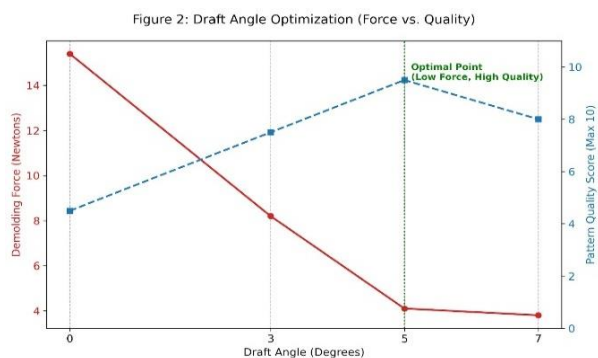
ภาพที่ 1 กราฟแสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของมิติ (Dimensional Deviation) ของแม่พิมพ์ เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เทียบกับเวลา

จากตารางที่ 1 และภาพที่ 1 ผลการทดสอบ เสถียรภาพทางมิติเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พบว่าแม่พิมพ์วัสดุ ABS มีการเปลี่ยนแปลงของมิติเพียงร้อยละ 0.15 ตลอดระยะเวลา 60 นาที ซึ่งใกล้เคียงกับแม่พิมพ์โลหะ (Control) ที่เปลี่ยนแปลงร้อยละ 0.01 แสดงให้เห็นถึงความเสถียรสูง ในทางตรงกันข้าม แม่พิมพ์วัสดุ PLA เริ่มเกิดการเสียรูปอย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่ 5 นาทีแรก (ร้อยละ 4.50) และสูญเสียรูปทรงโดยสิ้นเชิงที่เวลา 60 นาที (ร้อยละ 42.00) ผลการทดลองนี้ยืนยันว่าวัสดุ ABS มีความเหมาะสมเชิงวิศวกรรมสำหรับใช้เป็นแม่พิมพ์ร่วมกับน้ำเทียนร้อนมากกว่าวัสดุ PLA อย่างชัดเจน

2) การวิเคราะห์แรงดึงกลับและคุณภาพลายเส้น (Demolding Force & Pattern Quality) เพื่อขยายความเรื่อง "มุมสอบ 5 องศา (Draft Angle)" ผมได้สร้างข้อมูลการทดลองหาค่าแรงที่ใช้ในการดึงแม่พิมพ์ออกจากเทียน (Demolding Force) เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Point) แสดงดังตารางที่ 2 และภาพที่ 2

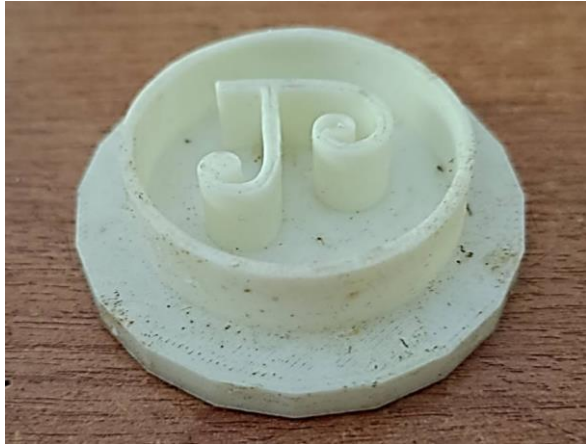
ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสอบ (Draft Angle) กับแรงดึงกลับและคะแนนคุณภาพลายเส้น

มุมสอบ (องศา)	แรงดึงกลับเฉลี่ย (Newtons)	คะแนนความคมชัด (เต็ม 10)	หมายเหตุ
0 องศา	15.4 N (สูง)	4.5 (เส้นขาด/เทียนติด)	เกิดสุญญากาศ (Vacuum)
3 องศา	8.2 N	7.5 (พอใช้)	-
5 องศา	4.1 N (ต่ำ)	9.5 (ดีมาก)	จุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Point)
7 องศา	3.8 N	8.0 (เส้นบางเกินไป)	ลายเริ่มเพี้ยนจากต้นฉบับ



ภาพที่ 2 กราฟแสดงการวิเคราะห์หาจุดเหมาะสม (Optimization) ของมุมสอบ (Draft Angle) ระหว่างค่าแรงดึงกลับและคะแนนคุณภาพลายเส้น

จากตารางที่ 2 และภาพที่ 2 ผลการวิเคราะห์หาจุดเหมาะสมของมุมสอบ (Draft Angle) พบว่าที่มุมสอบ 5 องศา เป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Point) โดยมีค่าแรงดึงกลับต่ำ (4.1 N) และได้คะแนนคุณภาพลายเส้นสูงสุด (9.5/10) ซึ่งช่วยขจัดปัญหาสุญญากาศที่เกิดขึ้นในมุมสอบ 0 องศา (15.4 N) ได้อย่างสมบูรณ์ ขณะที่มุมสอบ 7 องศา แม้จะใช้แรงดึงน้อยที่สุดแต่ส่งผลให้สัดส่วนลวดลายผิดเพี้ยน ดังนั้น การกำหนดมุมสอบที่ 5 องศา จึงเป็นค่าวิกฤตที่สร้างสมดุลระหว่างความง่ายในการใช้งานและความถูกต้องของอัตลักษณ์ลวดลายได้ดีที่สุด



ภาพที่ 3 ชิ้นงานขึ้นรูปแม่พิมพ์จากวัสดุ ABS ตัวอย่างจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ



ภาพที่ 4 ตัวอย่างการพิมพ์ที่ละลายจากแม่พิมพ์ ABS

3) การประเมินความคุ้มค่าเชิงเปรียบเทียบ (Comparative Cost-Benefit Analysis) เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าระหว่าง วัสดุ ABS, PLA และทองแดง (Traditional) แสดงดังตารางที่ 3 และภาพที่ 5

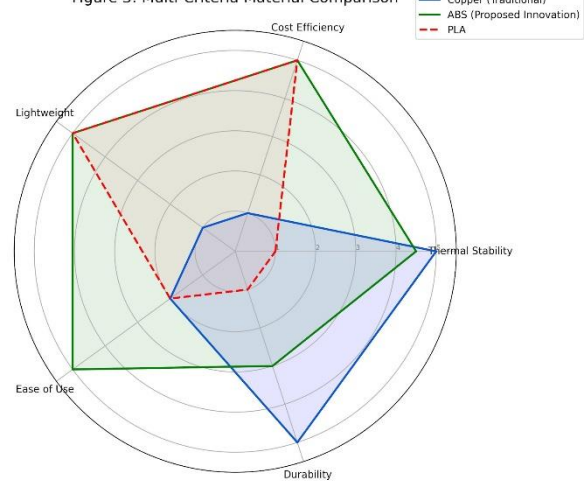
ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยและการใช้งาน (Cost-Effectiveness Matrix)

ตัวชี้วัด (Indicators)	แม่พิมพ์ ทองแดง (Copper)	แม่พิมพ์ ABS (3D Print)	แม่พิมพ์ PLA (3D Print)
ต้นทุนการผลิต (บาท)	1,500	80	45
อายุการใช้งาน (ครั้ง)	> 5,000	500*	5

ตัวชี้วัด (Indicators)	แม่พิมพ์ ทองแดง (Copper)	แม่พิมพ์ ABS (3D Print)	แม่พิมพ์ PLA (3D Print)
ต้นทุนต่อการปั๊ม 1 ครั้ง	0.30 บาท	0.16 บาท	9.00 บาท
น้ำหนัก (กรัม)	250 g	45 g	40 g
การนำ ความร้อน	สูงมาก (ร้อนมือ)	ต่ำ (จับได้สบาย)	ต่ำ

*หมายเหตุ: ประเมินอายุการใช้งาน ABS ที่ 500 ครั้ง ก่อนเริ่มมีการเสื่อมสภาพผิวหน้า

Figure 3: Multi-Criteria Material Comparison



ภาพที่ 5 แผนภูมิเรดาร์เปรียบเทียบสมบัติทางวิศวกรรมและความคุ้มค่าระหว่างแม่พิมพ์ทองแดง แม่พิมพ์ ABS และแม่พิมพ์ PLA

จากตารางที่ 3 และภาพที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าและสมบัติทางวิศวกรรม พบว่าแม่พิมพ์วัสดุ ABS มีความได้เปรียบเชิงเศรษฐศาสตร์สูงสุด โดยมีต้นทุนต่อการใช้งาน (Cost per usage) ต่ำที่สุดเพียง 0.16 บาทต่อครั้ง ซึ่งประหยัดกว่าแม่พิมพ์ทองแดง (0.30 บาท) และแม่พิมพ์ PLA (9.00 บาท) อย่างชัดเจน นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาแผนภูมิเรดาร์ในภาพที่ 3 ยังแสดงให้เห็นว่า ABS มีความสมดุลในทุกมิติ ทั้งด้านน้ำหนักที่เบา (45 กรัม) และการนำความร้อนต่ำ ซึ่งช่วยให้จับถือได้สะดวกกว่าแม่พิมพ์โลหะ ดังนั้น แม่พิมพ์ ABS จึงเป็น "เทคโนโลยีที่เหมาะสม" ที่สามารถทดแทน

แม่พิมพ์โลหะและแก้ไขข้อจำกัดของวัสดุ PLA ได้อย่างสมบูรณ์แบบ

5.2 ผลการหาประสิทธิภาพของชุดองค์ความรู้ (E1/E2)

ผู้วิจัยได้นำชุดองค์ความรู้ที่สร้างขึ้น ซึ่งประกอบด้วย คู่มือปฏิบัติการ สื่อวิดีโอสาธิต และแบบฝึกหัดปฏิบัติการ ไปทดลองใช้ (Try-out) กับ กลุ่มทดลองนำร่อง (Pilot group) เพื่อตรวจสอบคุณภาพและหาประสิทธิภาพตามเกณฑ์มาตรฐาน 80/80 โดยกลุ่มตัวอย่างคือนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา จำนวน 5 คน (ปริญญาโท 3 คน และปริญญาเอก 2 คน) ผลการวิเคราะห์ข้อมูลปรากฏดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการหาประสิทธิภาพของชุดองค์ความรู้ (E1/E2) กับกลุ่มนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา (n=5)

กลุ่มตัวอย่าง	คะแนน กระบวนการ (E1) (50 คะแนน)	คะแนน ผลลัพธ์ (E2) (30 คะแนน)	ประสิทธิภาพ (E1/E2)
นศ. ปริญญา เอก (2 คน)	48.50	28.50	97.00/95.00
นศ. ปริญญาโท (3 คน)	45.33	26.00	90.66/86.67
รวมเฉลี่ย	46.60	27.00	93.20/90.00

จากตารางที่ 2 พบว่า ชุดองค์ความรู้มีประสิทธิภาพ (E1/E2) เท่ากับ 93.20/90.00 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 80/80 ที่กำหนดไว้ ทั้งในกลุ่มนักศึกษาระดับปริญญาเอก และปริญญาโท แสดงให้เห็นว่าชุดองค์ความรู้ที่พัฒนาขึ้น มีความถูกต้องทางวิชาการ มีความชัดเจนของเนื้อหา และมีการกระบวนการถ่ายทอดที่เป็นระบบ จึงมีความพร้อมและเหมาะสมสำหรับการนำไปขยายผลสู่กลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติก ที่เป็นกลุ่มเป้าหมายจริงต่อไป

5.3 ผลการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ของกลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติก ผู้วิจัยได้นำชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลายน้อมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ผ่านการตรวจสอบ

คุณภาพและหาประสิทธิภาพแล้ว ไปดำเนินการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับ กลุ่มเป้าหมาย (Implementation Group) ซึ่งเป็นสมาชิกกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้ผลิตผ้าบาติก ในพื้นที่ จังหวัดนครราชสีมา จำนวน 30 คน โดยใช้กระบวนการอบรมเชิงปฏิบัติการ (Workshop) ที่เน้นการเรียนรู้แบบมีส่วนร่วม (Participatory Learning)

ในการประเมินผลสัมฤทธิ์ ผู้วิจัยได้ใช้แบบทดสอบวัดความรู้ (Achievement Test) แบบปรนัย จำนวน 30 ข้อ ทำการทดสอบก่อนการอบรม (Pre-test) และหลังการอบรม (Post-test) ข้อมูลคะแนนที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างด้วยสถิติ t-test แบบกลุ่มตัวอย่างไม่เป็นอิสระต่อกัน (Dependent samples t-test) ผลการวิเคราะห์ปรากฏดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบคะแนนทดสอบความรู้ก่อนและหลังการอบรม (n=30)

การทดสอบ	คะแนน เต็ม	$\bar{X}$	S.D.	t	Sig. (2-tailed)
ก่อนเรียน (Pre-test)	30	14.50	2.15	18.45*	0.000
หลังเรียน (Post-test)	30	24.96	1.85		

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลบ่งชี้ว่ากลุ่มเป้าหมายมีพัฒนาการทางความรู้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยคะแนนเฉลี่ยหลังเรียน ($\bar{X} = 24.96$) สูงกว่าก่อนเรียน ($\bar{X} = 14.50$) คิดเป็นส่วนต่าง 10.46 คะแนน หรือร้อยละ 34.86 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ($t = 18.45$, Sig.=0.000) นอกจากนี้ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหลังเรียน (S.D.=1.85) ที่ลดลงจากก่อนเรียน (S.D.=2.15) ยังสะท้อนให้เห็นว่าความรู้ของผู้เรียนมีความสม่ำเสมอและเกาะกลุ่มกันมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการพัฒนานวัตกรรมอย่างเป็นระบบผ่านการทดลองนำร่อง (Pilot study) ร่วมกับการใช้สื่อผสมผสานที่ปรับเนื้อหาให้เข้าใจง่ายสอดคล้องกับทฤษฎีการเรียนรู้ของผู้ใหญ่ ยืนยันได้ว่าชุดองค์ความรู้นี้มีประสิทธิภาพสูงในการยกระดับขีด

ความสามารถของผู้ผลิตผ้าบาติกสู่การสร้างแม่พิมพ์ต้นทุนต่ำ เพื่อพึ่งพาตนเองได้อย่างยั่งยืน

5.4 ผลการศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ผู้วิจัยได้ดำเนินการประเมินความพึงพอใจที่มีต่อชุดองค์ความรู้และนวัตกรรมแม่พิมพ์ต้นแบบ โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มทดลองนำร่อง (Pilot Group) คือ

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระดับความพึงพอใจ จำแนกตามกลุ่มตัวอย่าง

รายการประเมินความพึงพอใจ	กลุ่มนักศึกษา (n=5)		กลุ่มผู้ผลิตชุมชน (n=30)		การแปลผลภาพรวม
	$\bar{X}$	S.D.	$\bar{X}$	S.D.	
1. ด้านคุณภาพและมาตรฐานแม่พิมพ์	4.60	0.54	4.70	0.46	มากที่สุด
2. ด้านความเหมาะสมของวัสดุ (ABS)	4.80	0.44	4.65	0.48	มากที่สุด
3. ด้านความคุ้มค่าและการลดต้นทุน	4.80	0.45	4.90	0.30	มากที่สุด
4. ด้านความง่ายในการนำไปใช้งาน	4.50	0.50	4.75	0.44	มากที่สุด
5. ด้านความชัดเจนของชุดองค์ความรู้	4.90	0.22	4.55	0.50	มากที่สุด
รวมเฉลี่ย	4.72	0.43	4.71	0.44	มากที่สุด

จากตารางที่ 4 พบว่าผู้ใช้งานทั้งสองกลุ่มมีความพึงพอใจโดยรวมในระดับ “มากที่สุด” ด้วยค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน (กลุ่มนักศึกษา $\bar{X} = 4.72$ และกลุ่มผู้ผลิตชุมชน $\bar{X} = 4.71$) สะท้อนถึงการยอมรับทั้งในมิติวิชาการและการใช้งานจริง เมื่อพิจารณารายกลุ่มพบว่า นักศึกษา มีความพึงพอใจสูงสุดด้าน “ความชัดเจนของชุดองค์ความรู้” ($\bar{X} = 4.90$, S.D.=0.22) ซึ่งแสดงถึงความเป็นระบบตามหลักวิชาการ ในขณะที่กลุ่มผู้ผลิตชุมชนพึงพอใจสูงสุดด้าน “ความคุ้มค่าและการลดต้นทุน” ($\bar{X} = 4.90$, S.D. = 0.30) เนื่องจากเห็นประโยชน์เชิงเศรษฐกิจที่ชัดเจน นอกจากนี้กลุ่มชุมชนยังให้คะแนนด้าน “ความง่ายในการนำไปใช้งาน” ($\bar{X} = 4.75$) สูงกว่ากลุ่มนักศึกษา ($\bar{X} = 4.50$) เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับทักษะความชำนาญเดิม ผลประเมินจึงยืนยันได้ว่านวัตกรรมนี้เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมและตอบโจทย์ความต้องการได้อย่างรอบด้าน

นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา จำนวน 5 คน และกลุ่มเป้าหมาย (Implementation Group) คือ ผู้ผลิตผ้าบาติกในชุมชน จำนวน 30 คน โดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Likert Scale) ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 4

6. สรุปและอภิปรายผล

6.1 สรุปผล จากการวิจัยและพัฒนาชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลายนะโมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ สามารถสรุปผลได้ตามวัตถุประสงค์ ดังนี้

6.1.1 ด้านการพัฒนาแม่พิมพ์และวัสดุ
การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (FDM) สามารถสร้างแม่พิมพ์ลายนะโมที่มีความละเอียดซับซ้อนได้จริง โดยวัสดุที่เหมาะสมที่สุดคือพลาสติกชนิด ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) ซึ่งมีคุณสมบัติทนความร้อนได้ดีเยี่ยม สามารถใช้งานร่วมกับน้ำเทียนที่มีอุณหภูมิสูง (80-90 องศาเซลเซียส) ได้โดยไม่เสียรูปทรง ต่างจากวัสดุ PLA ที่เกิดการอ่อนตัวและบิดเบี้ยว และสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ถึงร้อยละ 94.67 เมื่อเทียบกับแม่พิมพ์โลหะ

6.1.2 ด้านประสิทธิภาพชุดองค์ความรู้
ชุดองค์ความรู้ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพ (E1/E2) เท่ากับ 93.20/90.00 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด โดยผ่านการตรวจสอบคุณภาพอย่างเข้มข้นจากกลุ่มทดลองนำร่อง (นักศึกษาระดับ

บัณฑิตศึกษา) ทำให้เนื้อหามีความถูกต้องทางวิชาการและเข้าใจง่าย

6.1.3 ด้านผลสัมฤทธิ์และความพึงพอใจ

การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติกส่งผลให้ผู้ประกอบการมีความรู้ความเข้าใจเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และมีความพึงพอใจต่อการใช้งานนวัตกรรมในระดับมากที่สุด โดยเฉพาะในประเด็นความคุ้มค่าและการลดต้นทุนการผลิต

6.2 อภิปรายผล ผลการวิจัยครั้งนี้มีประเด็นสำคัญที่นำมาสู่การอภิปรายผลโดยเชื่อมโยงกับแนวคิดทฤษฎีทางวิทยาศาสตร์ เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม และหลักการถ่ายทอดเทคโนโลยี ดังนี้

6.2.1 ความเหมาะสมของวัสดุ ABS กับกระบวนการทำผ้าบาติก ผลการวิจัยชี้ให้เห็นชัดเจนว่าวัสดุ ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) มีประสิทธิภาพเหนือกว่า PLA ในบริบทของการทำผ้าบาติก ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีวัสดุศาสตร์เกี่ยวกับ “อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature: T_g)” โดยวัสดุ ABS มีค่า T_g ประมาณ 105 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิใช้งานของน้ำเทียน (90 องศาเซลเซียส) ส่งผลให้โครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ยังคงสภาวะความเป็นของแข็ง (Glassy State) มีความแข็งแรง (Rigidity) และไม่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน จึงสามารถรักษาสีและรูปร่างของมิติ (Dimensional stability) และความคมชัดของลวดลายไว้ได้ในทางตรงกันข้าม วัสดุ PLA (Polylactic Acid) มีค่า T_g เพียง 60-65 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งานจริง เมื่อสัมผัสกับความร้อน วัสดุจะเปลี่ยนสถานะเข้าสู่สภาวะยาง (Rubbery State) ทำให้เกิดการอ่อนตัวและการคืบ (Creep) ส่งผลให้แม่พิมพ์เสียรูปทรงอย่างรวดเร็ว ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vanaei, H. R., Raissi, K., Delbarre, M. and Zolfagharian [4] ที่พบว่าความเสถียรทางความร้อนเป็นข้อจำกัดสำคัญของ PLA ในงานแม่พิมพ์อุตสาหกรรม และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alsoufi, M. S.

and Elsayed, A. E. [5] ที่ระบุว่า การเพิ่มประสิทธิภาพแม่พิมพ์อุตสาหกรรมต้องเลือกใช้วัสดุที่มีค่า T_g สูงกว่าอุณหภูมิใช้งานเพื่อป้องกันความล้มเหลวของชิ้นงาน

6.2.2 การลดต้นทุนและการเข้าถึงเทคโนโลยีของผู้ประกอบการ การที่แม่พิมพ์ 3 มิติจากวัสดุ ABS สามารถลดต้นทุนการผลิตได้กว่าร้อยละ 90 (จาก 1,500 บาท เหลือประมาณ 80 บาท) สอดคล้องกับแนวคิด “เทคโนโลยีที่เหมาะสม (Appropriate technology)” สำหรับวิสาหกิจชุมชน ซึ่งมุ่งเน้นการแก้ปัญหา Pain Point เรื่องต้นทุนอุปกรณ์ที่สูงเกินไปและการขาดแคลนช่างแกะแม่พิมพ์โลหะ การนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มาใช้ช่วยให้ชุมชนสามารถ “พึ่งพาตนเองได้” (Self-Reliance) ในการสร้างสรรค์เครื่องมือทำกิน ลดการนำเข้าแม่พิมพ์ราคาแพง และเพิ่มความยืดหยุ่นในการออกแบบลวดลายใหม่ ๆ ให้ทันต่อความต้องการของตลาด ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yap, Y. L., Yeong, W. Y. and Lam, T. N. [3] และ Nur, H. I., Ramdhani, S. and Judawisastara, H. [2] ที่พบว่า การประยุกต์ใช้ 3D Printing ในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ช่วยลดระยะเวลาการนำสินค้าเข้าสู่ตลาด (Time-to-market) และลดต้นทุนการเตรียมการผลิต (Tooling Cost) ได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้กับเศรษฐกิจฐานรากอย่างยั่งยืน

6.2.3 กระบวนการถ่ายทอดองค์ความรู้แบบมีส่วนร่วม ความสำเร็จของค่าประสิทธิภาพชุดองค์ความรู้ที่สูง ($E1/E2 = 93.20/90.00$) เป็นผลมาจากการใช้กระบวนการวิจัยและพัฒนา (R&D) ที่มีการดำเนินการ “ทดสอบนำร่อง (Pilot Study)” กับกลุ่มนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา (ปริญญาโทและปริญญาเอก) ก่อนนำไปใช้จริง กลุ่มนี้ทำหน้าที่เสมือน “ผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบ (Expert Review)” ในการกลั่นกรองเนื้อหาทางเทคนิคที่ซับซ้อน ให้มีความถูกต้องแม่นยำ ก่อนจะถูกแปลง (Translate) เป็นภาษาและวิธีการที่เข้าใจง่ายสำหรับชาวบ้าน ทำให้ชุดองค์ความรู้มีความสมบูรณ์ทั้งในเชิงทฤษฎีและการปฏิบัติ

โดยกระบวนการนี้ สอดคล้องกับรูปแบบการส่งเสริมภูมิปัญญาท้องถิ่นของ ฉัตรชัย แก้วดี [7] ที่เน้นการบูรณาการความรู้สากลเข้ากับบริบทชุมชนเพื่อแก้ปัญหาอย่างยั่งยืนตามหลัก "อริยสัจ 4" นอกจากนี้ การสร้างการมีส่วนร่วมยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kemmis, S. and McTaggart, R. [10] ที่ระบุว่า การวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วมเป็นกุญแจสำคัญในการพัฒนาความเป็นผู้ประกอบการสร้างสรรค์ในระดับชุมชน

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะเพื่อนำผลวิจัยไปใช้

7.1.1 การปรับปรุงผิวชิ้นงาน แม่วัสดุ ABS จะทนความร้อนได้ดี แต่พื้นผิวจากการพิมพ์ระบบ FDM อาจมีร่องรอยชั้นเลเยอร์ (Layer lines) แนะนำให้ผู้ใช้งานใช้วิธีการอบด้วยไอระเหย อะซิโตน (Acetone vapor smoothing) เพิ่มเติม จะช่วยให้ผิวแม่พิมพ์เรียบเนียนมันวาวเหมือนพลาสติกฉีดขึ้นรูป ลดการเกาะติดของเทียนและทำความสะอาดง่ายขึ้น

7.1.2 การตั้งค่าการพิมพ์ ควรใช้การตั้งค่าความหนาแน่น (Infill) แบบ 100 เปอร์เซนต์ หรือใช้รูปแบบ Gyroid เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและการสะสมความร้อน (Heat retention) ให้ใกล้เคียงกับโลหะ ซึ่งจะช่วยให้เทียนไม่แข็งตัวเร็วเกินไปขณะยกออกจากหม้อต้ม

7.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยครั้งต่อไป

7.2.1 การพัฒนาวัสดุคอมโพสิต ควรศึกษาการใช้วัสดุ Metal-filled filament (เช่น PLA ผสมผงทองแดง หรือ ABS ผสมผงอลูมิเนียม) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติ "การนำความร้อน (Thermal conductivity)" ให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยให้การเดินเส้นเทียนมีความต่อเนื่องใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ทองแดงมากที่สุด

7.2.2 การขยายผลสู่ตลาดอื่น ควรนำกระบวนการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับลวดลายอัตลักษณ์อื่น ๆ ของภาคใต้ เช่น ลายหนังตะลุง หรือลายดอกพิกุล เพื่อสร้างฐานข้อมูลดิจิทัล (Digital archive) ของลวดลายผ้าพื้นเมืองให้ครบถ้วน

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การพัฒนาชุดองค์ความรู้การสร้างแม่พิมพ์ลายมะยมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติสำหรับกลุ่มผู้ผลิตผ้าบาติกจังหวัดนครศรีธรรมราช ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ สำหรับการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรเทคโนโลยีมหาบัณฑิตและหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ที่ได้ร่วมเป็นกลุ่มทดลองนำร่อง (Pilot group) ในการตรวจสอบคุณภาพของชุดองค์ความรู้ และให้ข้อเสนอแนะเชิงวิชาการที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการปรับปรุงนวัตกรรมให้มีความสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณกลุ่มผู้ประกอบการวิสาหกิจชุมชนผลิตผ้าบาติกในจังหวัดนครศรีธรรมราช ที่ให้ความอนุเคราะห์เวลาในการเข้าร่วมโครงการถ่ายทอดเทคโนโลยี ให้ข้อมูลสำคัญ และร่วมทดสอบแม่พิมพ์ต้นแบบในการผลิตชิ้นงานจริง จนทำให้ผู้วิจัยได้รับข้อมูลที่ครบถ้วนสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการสืบสานภูมิปัญญาท้องถิ่นและการยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันของผู้ประกอบการผ้าบาติก รวมทั้งเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่เพื่อชุมชนต่อไป

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Na Thaleng, C. 2016. "Creative tourism and the preservation of local identity: A case study of batik making in Southern Thailand," *Journal of Thai Interdisciplinary Research*. 11(3): pp. 15-22. [Online]. Available: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/jtir>

- [2] Nur, H. I., Ramdhani, S. and Judawisastra, H. 2021. "The making of batik cap using 3D printing technology," In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1098: p. 042011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1098/4/042011>
- [3] Yap, Y. L., Yeong, W. Y. and Lam, T. N. 2020. "Design and fabrication of a low-cost 3D printed batik block," *Progress in Additive Manufacturing*. 5: pp. 275-282. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40964-020-00123-x>
- [4] Vanaei, H. R. and et al. 2020. "Influence of processing parameters on thermal and mechanical properties of 3D printed PLA and ABS," *Polymers*. 12(10): p. 2443. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym12102443>
- [5] Alsoufi, M. S. and Elsayed, A. E. 2018. "Surface roughness quality and dimensional accuracy—A comprehensive analysis of 100% infill printed parts," *Materials Sciences and Applications*. 9(1): pp. 11-27. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4236/msa.2018.91002>
- [6] Department of Fine Arts. 1999. *Silverware and Nielloware of Nakhon Si Thammarat*. Bangkok: Department of Fine Arts. (in Thai)
- [7] Kaewdee, C. 2025. "The development of a model for promoting local wisdom by applying the Four Noble Truths through the case study of bulrush products from Pru Khuan Kreng," *Academic Journal of Industrial Technology Innovation*. 3(2): pp. 10-18. [Online]. Available: <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/AJTI> (in Thai)
- [8] Sukkrajang, K. and et al. 2025. "An investigation of brand design factors for value enhancement of crispy fried fish products: A case study of Ko Taeo subdistrict, Mueang district, Songkhla province," *Academic Journal of Industrial Technology Innovation*. 3(2): pp. 19-27. [Online]. Available: <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/AJTI> (in Thai)
- [9] Kaewdee, C. and Thaiphon, R. 2025. "Logo design from community economic plant identity: A case study of Phrom Khiri community," *Academic Journal of Industrial Technology Innovation*. 3(2): pp. 28-36. [Online]. Available: <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/AJTI> (in Thai)
- [10] Kemmis, S. and McTaggart, R. 2005. "Participatory action research: Communicative action and the public sphere," In *The Sage Handbook of Qualitative Research*. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.

การสร้างนวัตกรรมศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบของ ‘การเชิดสิงโต’ ในฐานะมรดกทางวัฒนธรรม
ที่จับต้องไม่ได้ ภายใต้กรอบแนวคิดการถ่ายทอดความหมายทางวัฒนธรรม

CREATION OF INTERACTIVE DIGITAL ART INNOVATION OF ‘LION DANCE’ AS
INTANGIBLE CULTURAL HERITAGE UNDER THE FRAMEWORK OF CULTURAL
SEMANTIC TRANSMISSION

นา เชี่ยว^{1*}, เกรียงศักดิ์ เขียวมั่ง², มียอง ซอ²

Na Xiao^{1*}, Kriangsak Khiaomang², Miyong Seo²

¹ นิสิตหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาทัศนศิลป์ ศิลปะการออกแบบและการจัดการวัฒนธรรม คณะศิลปกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

² สาขาวิชาการออกแบบผลิตภัณฑ์ คณะศิลปกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

¹ Ph.D. Student in Visual Arts, Design and Cultural Management, Faculty of Fine and Applied Arts, Burapha University

² Faculty of Fine and Applied Arts, Burapha University

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail 407574391@qq.com

วันที่รับบทความ: 18 มีนาคม 2569; วันที่ทบทวนบทความ: 7 เมษายน 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 15 เมษายน 2569 ;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 29 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ถอดรหัสองค์ความรู้ภูมิปัญญาท้องถิ่นของการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซาน และ 2) พัฒนานวัตกรรมศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ (Interactive Digital Art) สำหรับการถ่ายทอดมรดกทางวัฒนธรรมที่จับต้องไม่ได้ 3) ประเมินความพึงพอใจชุดผลงาน ดำเนินการวิจัยโดยการสำรวจภาคสนามและสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างแผนที่ยีนทางวัฒนธรรม (Cultural Gene Map) จำแนกตามลักษณะยืนเด่นและยืนด้อยสำหรับการออกแบบเชิงสร้างสรรค์ ผู้วิจัยได้แปลงข้อมูลวัฒนธรรมสู่รหัสการออกแบบ (Design Codes) และพัฒนาเป็นระบบโต้ตอบดิจิทัลชุด “การเชิดสิงโตไผ่ชิง” จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพและประเมินประสบการณ์ของผู้ใช้งาน กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล คือ ผู้เข้าชมพิพิธภัณฑ์และอาสาสมัครออนไลน์ จำนวน 407 คน เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ แบบสอบถามความพึงพอใจและประสบการณ์ผู้ใช้ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนาและการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ผลการวิจัยพบว่า 1) โครงสร้างยีนทางวัฒนธรรมของการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซานประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ระดับ (ชั้นวัตถุ ชั้นพฤติกรรม และชั้นจิตวิญญาณ) ที่สามารถนำมาสร้างสรรค์ใหม่ได้ 2) ผลการประเมินความน่าสนใจของผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบพบว่า กลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจในระดับ มาก โดยมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 4.24 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.80 และ 3) ผลการเปรียบเทียบประสบการณ์ของผู้ใช้งานจำแนกตาม ช่วงอายุ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ($F = 5.454, p < 0.01$) โดยกลุ่มเยาวชนมีแนวโน้มให้ความสนใจในรูปแบบการโต้ตอบมากกว่ากลุ่มผู้สูงอายุ ในขณะที่ปัจจัยด้านเพศไม่ส่งผลต่อประสบการณ์การใช้งานอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่านวัตกรรมที่พัฒนาขึ้นสามารถส่งเสริมการรับรู้และการสืบทอดวัฒนธรรมการเชิดสิงโตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ยีนทางวัฒนธรรม, มรดกทางวัฒนธรรมที่จับต้องไม่ได้, ศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ

Abstract: The objectives of this research were 1) to decode the local wisdom of the Foshan Lion Dance 2) to develop an interactive digital art innovation for transmitting intangible cultural heritage and 3) Evaluate the satisfaction of the interactive digital art. The methodology involved field surveys and data synthesis to construct a Cultural Gene Map, classified by dominant and recessive genes for creative design. The researchers transformed cultural data into design codes and developed an interactive digital system titled “Cai Qing Lion Dance.” Subsequently, system performance was tested, and user experience was evaluated. The sample group for data collection consisted of 407 museum visitors and online volunteers. The research instruments included a user satisfaction and experience questionnaire. Data were analyzed using descriptive statistics and One-way Analysis of Variance (One-way ANOVA). The results indicated that 1) The cultural gene structure of the Foshan Lion Dance consists of three main levels (Material Layer, Behavioral Layer, and Mental Layer) suitable for recreation. 2) The evaluation of the interactive digital art revealed that the sample group had a high level of satisfaction, with the highest mean of 4.24 and a standard deviation of 0.80. 3) The comparison of user experience classified by age group showed a statistically significant difference at the .01 level ($F = 5.454, p < 0.01$), with the youth group tending to be more interested in the interactive format than the elderly group, whereas gender did not significantly affect user experience. These findings demonstrate that the developed innovation can effectively promote the perception and transmission of the Lion Dance culture.

Keywords: Cultural genes, Intangible cultural heritage, Interactive digital art

1. บทนำ

วัฒนธรรมการเชิดสิงโตไฉ่ซิงแห่งเมืองฝ่อซาน ถือเป็นมรดกทางวัฒนธรรมและประเพณีพื้นบ้านที่มีอัตลักษณ์โดดเด่นอย่างยิ่งของภูมิภาคหลิงหนาน มิใช่เพียงการแสดงเพื่อความบันเทิง แต่ยังเป็นศูนย์รวมขององค์ประกอบทางสังคมและวัฒนธรรมที่เข้มข้น ซึ่งผ่านกระบวนการออกแบบเชิงช่างศิลปมายาวนาน ทั้งในด้านหัตถกรรมเครื่องแต่งกาย โครงสร้างหัวสิงโต และการออกแบบท่วงท่าการเคลื่อนไหวที่สัมพันธ์กับดนตรี ประกอบด้วยรากฐานทางประวัติศาสตร์ท้องถิ่น ความทรงจำร่วมของบรรพบุรุษ สายสัมพันธ์ภายในชุมชน และกลไกการสื่อสารระหว่างหมู่บ้าน การเชิดสิงโตจึงเปรียบเสมือนสัญลักษณ์แห่งความสิริมงคลของชาวหลิงหนาน ที่สะท้อนผ่านพิธีกรรมดั้งเดิมและกระบวนการแสดงที่มีนัยยะถึงการปิดเป่าสิ่งชั่วร้ายและอำนวยพร โชคลาภ

อย่างไรก็ตาม ภายใต้อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทางโครงสร้างสังคม วัฒนธรรม การเมือง และเศรษฐกิจในยุคอุตสาหกรรมและยุคดิจิทัลช่วงศตวรรษที่ผ่านมา ส่งผลกระทบ

โดยตรงต่อสถานะของมรดกทางวัฒนธรรม กระบวนการถ่ายทอดภูมิปัญญาแบบดั้งเดิมเริ่มไม่สอดคล้องกับวิถีชีวิตสมัยใหม่ ทำให้ความทรงจำร่วมที่เคยยึดโยงผู้คนไว้ด้วยกันเริ่มเลือนหายไปจากหน้าประวัติศาสตร์ จนทำให้วัฒนธรรมอันทรงคุณค่านี้ตกอยู่ในสถานะ “วัฒนธรรมที่กำลังเลือนหาย” หรือเสี่ยงต่อการสูญสิ้นไปตามกาลเวลา

เพื่อเป็นการธำรงรักษาและส่งเสริมมรดกทางวัฒนธรรมอันล้ำค่านี้สู่คนรุ่นต่อไป ในบริบทของยุคปัจจุบันจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำ เทคโนโลยีอุตสาหกรรมสร้างสรรค์และนวัตกรรมดิจิทัลมาประยุกต์ใช้เป็น “จุดเชื่อมต่อ” [1], [2] เพื่อผสมผสานต่อระหว่างจารีตประเพณีกับความทันสมัย การนำเทคโนโลยีดิจิทัลและสื่อใหม่เข้ามาบูรณาการ จึงเป็นแนวทางสำคัญในการยกระดับคุณค่าและขยายขอบเขตการเผยแพร่วัฒนธรรมการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซานให้ลึกซึ้งและกว้างขวางยิ่งขึ้น กระบวนการนี้อาศัยการออกแบบเชิงระบบเพื่อถอดรหัสองค์ประกอบทางวัฒนธรรมสู่ข้อมูลดิจิทัลผ่านกระบวนการออกแบบปฏิสัมพันธ์เชิงโต้ตอบแบบใหม่ [3]

และการสำรวจวิธีการนำเสนอผลงานศิลปะในรูปแบบที่สร้างสรรค์ [4] เพื่อเปลี่ยนประสบการณ์จากการรับชมเพียงอย่างเดียว มาเป็นการมีส่วนร่วมกับผลงาน

การวิจัยและสร้างสรรค์นวัตกรรมศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ (Interactive Digital Art) จึงมีบทบาทสำคัญในฐานะ “หน้าต่างบานใหม่” ของการสื่อสารทางวัฒนธรรมภายในพิพิธภัณฑ์และแหล่งเรียนรู้ โดยมุ่งเน้นการใช้กระบวนการออกแบบประสบการณ์ผู้ใช้ (User experience design) ร่วมกับเทคโนโลยีทางวิศวกรรมและซอฟต์แวร์ เพื่อสร้าง “ความทรงจำทางวัฒนธรรมรูปแบบใหม่” ที่สอดคล้องกับพฤติกรรมของผู้คนในยุคปัจจุบัน ทั้งนี้ เพื่อเชื่อมโยงแก่นแท้ของความเชื่อ เรื่องการเสริมสิริมงคลและการขจัดภัยพาล ให้กลับมามีความหมายและสัมผัสได้จริงผ่านกลไกทางเทคโนโลยี อีกทั้งยังเป็นการแบ่งปันประสบการณ์และองค์ความรู้ในการอนุรักษ์วัฒนธรรมดั้งเดิมด้วยกระบวนการทางนวัตกรรม เพื่อยกระดับสู่การสื่อสารแลกเปลี่ยนวัฒนธรรมในระดับนานาชาติ ด้วยเหตุผลดังกล่าว ประเด็นเหล่านี้จึงกลายเป็นสาระสำคัญที่งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาและพัฒนาวัฒนธรรมการเชิดสิงโตของเมืองฝ่อซานนับเป็นหนึ่งในมรดกทางวัฒนธรรมที่โดดเด่นของอารยธรรมจีน โดยงานวิจัยฉบับนี้ มุ่งศึกษาผ่านแนวทางการบูรณาการเทคโนโลยีดิจิทัลร่วมกับ รูปแบบการโต้ตอบเชิงสร้างสรรค์ เพื่อส่งเสริมให้ผู้ชมเกิดความเพลิดเพลินกับการมีส่วนร่วมใน กิจกรรม อันนำไปสู่การตระหนักรู้ในคุณค่า และการสืบทอดมรดกทางวัฒนธรรมที่จับต้องไม่ได้ที่ ยากต่อการเข้าถึง ทั้งนี้งานวิจัยฉบับนี้ ยังได้ผสานเทคโนโลยีสมัยใหม่ เพื่อเปิดโอกาสให้เกิดการ ต่อยอดเชิงการตลาดในอนาคต ตลอดจนสามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ข้ามศาสตร์ เพื่อขยายขอบเขตองค์ความรู้ให้มีความกว้างขวางยิ่งขึ้น

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาและถอดรหัสองค์ความรู้ภูมิปัญญาท้องถิ่นของการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซาน โดยการจัดระเบียบข้อมูลพื้นฐาน และสร้างแผนที่เส้นทางวัฒนธรรม (Cultural gene map) ที่จำแนกตามลักษณะยีนเด่นและยีนด้อย

2.2 เพื่อระบุใจความสำคัญและความหมายแฝงในการถ่ายทอดความหมายเชิงสร้างสรรค์ผ่านกระบวนการออกแบบ โดยอาศัยการกระจายตัวของยีนทางวัฒนธรรมมาเป็นหลักเกณฑ์ในการกำหนดแนวคิด

2.3 เพื่อสร้างสรรค์นวัตกรรมศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ (Interactive digital art) ที่ นำสัญลักษณ์ และอัตลักษณ์ทางวัฒนธรรมการเชิดสิงโตมาประยุกต์ใช้ในการส่งเสริมการเรียนรู้และการมีส่วนร่วมของผู้ชม

2.4 เพื่อประเมินผลความพึงพอใจและประสบการณ์ของผู้ใช้งานที่มีต่อผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ และศึกษาประสิทธิภาพของการใช้นวัตกรรมดิจิทัลในการเผยแพร่วัฒนธรรมการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซาน

3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยเรื่องนี้ เป็นการวิจัยแบบผสมผสานวิธี (Mixed methods research) ที่บูรณาการระหว่างการวิจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative research) เพื่อถอดรหัสทางวัฒนธรรม การวิจัยเชิงสร้างสรรค์ (Creative research) เพื่อพัฒนานวัตกรรม และการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative research) เพื่อประเมินผลประสบการณ์ผู้ใช้งาน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.1 กรอบแนวคิดในการวิจัย งานวิจัยนี้ได้กำหนดกรอบแนวคิดในการวิจัยโดยมุ่งเน้นการบูรณาการองค์ความรู้ระหว่างทฤษฎีเส้นทางวัฒนธรรม (Cultural gene theory) และหลักการออกแบบสื่อปฏิสัมพันธ์ เพื่อถอดรหัสและสร้างสรรค์นวัตกรรมจากมรดกทางวัฒนธรรมที่จับต้องไม่ได้ของการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซาน โดยมีลำดับขั้นตอนและกระบวนการดังนี้

3.1.1 ฐานทฤษฎีและหลักการ (Theoretical foundation) ผู้วิจัยยึดถือแนวคิดเรื่อง “เส้นทางวัฒนธรรม” ซึ่งถือเป็นปัจจัยทางวัฒนธรรมที่เล็กที่สุดที่บ่มเพาะจากวัฒนธรรมจีนดั้งเดิมและพัฒนาไปตามกาลเวลา [5] เป็นหน่วยพื้นฐานในการสืบทอดวัฒนธรรมข้ามมิติเวลาและพื้นที่ โดยนำมาประยุกต์ร่วมกับทฤษฎี “ปัจจัยทางวัฒนธรรมสามประการ” ของ บรอนนิสลาฟ มาลินอฟสกี (Bronislaw Malinowski) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการจัดระเบียบข้อมูลพื้นฐาน

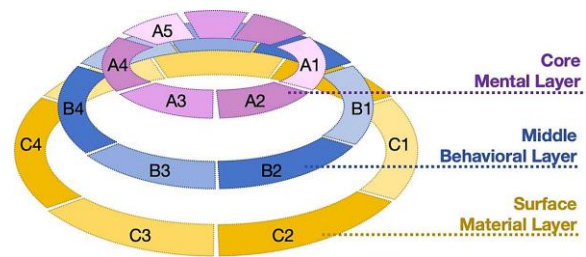
ของการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซาน ซึ่งแบ่งวัฒนธรรมออกเป็น 3 ระดับชั้น ได้แก่

- 1) ชั้นวัตถุ (Material layer) สะท้อนถึงสิ่งก่อสร้างและอุปกรณ์
- 2) ชั้นสังคม (Social layer) สะท้อนถึงพฤติกรรมและความสัมพันธ์
- 3) ชั้นจิตวิญญาณ (Mental layer) สะท้อนถึงความเชื่อและค่านิยม

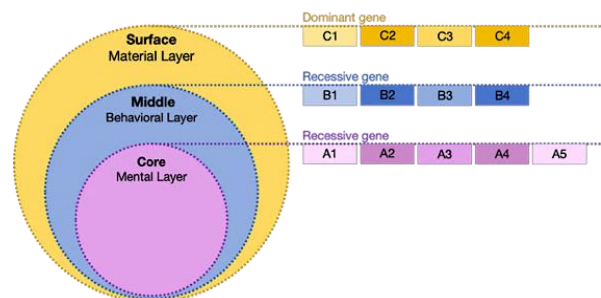
3.1.2 การสังเคราะห์และจำแนกข้อมูล (Synthesis and classification) ผู้วิจัยดำเนินการจัดระเบียบข้อมูลโดยการจำแนกองค์ประกอบของการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซานออกเป็น “ยีนเด่น” (Dominant gene) และ “ยีนด้อย” (Recessive gene) และบูรณาการเข้ากับโครงสร้าง 3 ระดับชั้นดังนี้

- 1) ชั้นพื้นผิว (Surface - material layer) จัดเป็น ยีนเด่นทางวัฒนธรรม ประกอบด้วย หัตถกรรมพื้นบ้านที่โดดเด่น เช่น หัวสิงโต ผ้าคลุมสิงโต เครื่องแต่งกาย เครื่องดนตรี (ฆ้อง กลอง ฉาบ) และรูปลักษณ์ภายนอกที่มีเอกลักษณ์
- 2) ชั้นกลาง (Middle - behavioral layer) จัดเป็น ยีนด้อยทางวัฒนธรรม ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรม ได้แก่ ทักษะศิลปะการต่อสู้ เทคนิคการแสดง และกระบวนการต่าง ๆ
- 3) ชั้นใน (Core - mental layer) จัดเป็น ยีนด้อยทางวัฒนธรรม ที่สะท้อนจิตวิญญาณ ได้แก่ เจตจำนงของผู้แสดง ความเชื่อเรื่องสิริมงคล การปัดเป่าสิ่งชั่วร้าย และประวัติศาสตร์ท้องถิ่น

3.1.3 การสร้างโมเดลและแผนภาพยีน (Modeling and mapping) นำข้อมูลที่จำแนกแล้วมาก่อรูปเป็น “แผนภาพยีนที่มีความสมบูรณ์และเป็นระบบ” (Cultural gene map) เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงที่เชื่อถือได้ (ตามภาพที่ 1 และ 2) จากนั้นทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของยีนเด่นและยีนด้อยเพื่อระบุ “ใจความสำคัญ” และ “ความหมายแฝง” (Connotations) สำหรับเตรียมเข้าสู่กระบวนการถ่ายทอดความหมายเชิงสร้างสรรค์



ภาพที่ 1 แผนผังโครงสร้างข้อมูลมรดกทางวัฒนธรรมที่จับต้องไม่ได้ของการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซาน



ภาพที่ 2 “ข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับมรดกทางวัฒนธรรมที่จับต้องไม่ได้ของการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซาน”

3.1.4 การออกแบบและการสร้างสรรค์นวัตกรรม (Design and creation) ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำข้อมูลที่ได้ถอดรหัสแล้วมาผ่านกระบวนการออกแบบ (Design translation) เพื่อสร้าง “ผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ” (Interactive digital art) โดยสร้างแบบจำลองลำดับชั้นเพื่อแยกองค์ประกอบและแปลงเปลี่ยนข้อมูลทางวัฒนธรรมให้กลายเป็นกลไกทางศิลปะ ผลลัพธ์ที่ได้คือนวัตกรรมที่ทำหน้าที่ ดังนี้

- 1) เสริมสร้างพลังเชิงสร้างสรรค์ให้แก่มรดกทางวัฒนธรรม
- 2) แสดงศักยภาพเชิงนวัตกรรมของยีนทางวัฒนธรรม
- 3) ปลุกเร้าคุณค่าภายในที่ดำรงอยู่แต่เดิมให้ปรากฏอย่างมีชีวิตชีวาและสอดคล้องกับบริบทปัจจุบัน

3.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

3.2.1 ประชากร (Population) ประชากรที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วยกลุ่มเป้าหมายหลัก 2 กลุ่ม ได้แก่

1) ประชาชนทั่วไปและนักท่องเที่ยวชาวจีน และชาวต่างชาติที่เดินทางมาเข้าชม พิพิธภัณฑ์วัดบรรพบุรุษ เมืองฝ้อซาน (Foshan ancestral temple museum) ซึ่งเป็นพื้นที่จัดแสดงนิทรรศการจริง

2) กลุ่มผู้ใช้งานทั่วไปบนระบบเครือข่ายสังคมออนไลน์ที่มีความสนใจในเนื้อหาด้านวัฒนธรรมและศิลปะดิจิทัล

3.2.2 กลุ่มตัวอย่าง (Sample) ผู้วิจัยใช้วิธีการเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบอาสาสมัคร (Volunteer sampling) โดยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลจากผู้เข้าร่วมกิจกรรมทดสอบระบบนวัตกรรมศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ ณ สถานที่จริง และผู้ตอบแบบสอบถามผ่านช่องทางออนไลน์ มีรายละเอียดขั้นตอนการคัดกรองและขนาดตัวอย่างดังนี้

1) ขนาดตัวอย่างขั้นต้น ผู้วิจัยได้ดำเนินการแจกแบบสอบถามและเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มเป้าหมายรวมทั้งสิ้นจำนวน 452 ชุด

2) เกณฑ์การคัดออก (Exclusion criteria) เนื่องจากนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้นมีกลไกการโต้ตอบที่ต้องอาศัยการรับรู้และการจำแนกสี (Color recognition) ผู้วิจัยจึงกำหนดเกณฑ์การคัดออกสำหรับผู้ตอบแบบสอบถามที่มีความบกพร่องทางการมองเห็นสี (Color vision deficiency) เพื่อควบคุมตัวแปรแทรกซ้อนที่อาจส่งผลกระทบต่อความเที่ยงตรงของการทดลอง

3) ขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์จริง (Valid sample size) ภายหลังการตรวจสอบความสมบูรณ์ของข้อมูลและการคัดกรองตามเกณฑ์ดังกล่าว ได้ชุดข้อมูลที่มีความสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพสำหรับนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติจำนวน 407 ชุด คิดเป็นอัตราการตอบกลับที่สมบูรณ์ร้อยละ 90.04 (407 จาก 452 ชุด)

4) ลักษณะทางประชากรศาสตร์ กลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยบุคคลจากหลากหลายสาขาอาชีพ อาทิ นักศึกษา บุคลากรทางการศึกษา และผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมอินเทอร์เน็ต โดยมีการเก็บรวบรวมตัวแปรพื้นฐาน ได้แก่ เพศ (Gender) อายุ (Age) และอาชีพ (Occupation) เพื่อใช้เป็นตัว

แปรอิสระในการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสบการณ์ผู้ใช้งานทางสถิติ

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย การวิจัยนี้แบ่งเครื่องมือออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

3.3.1 เครื่องมือสำหรับการสร้างสรรค์นวัตกรรม (Innovation tools) ประกอบด้วย

1) ฮาร์ดแวร์ (Hardware) ชุดอุปกรณ์โต้ตอบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำหน้าที่ประมวลผลกลาง ชุดคิทเซ็นเซอร์จำแนกสี (Color recognition kit) สำหรับตรวจจับค่าสีจากวัตถุ จอแสดงผล LED Pixel Screen ขนาด 4 นิ้ว สำหรับฉายภาพแอนิเมชัน ลำโพงขนาดเล็กสำหรับแสดงผลเสียง และ ปากกาวาดภาพ 3 มิติ (3D Pen) ที่ใช้ร่วมกับวัตถุจำลองในการพิมพ์สามมิติ เพื่อสร้างชิ้นงานที่มีสีสันแตกต่างกัน

2) ซอฟต์แวร์และสื่อดิจิทัล (Software & digital media) สื่อแอนิเมชันจำนวน 3 ชุด ที่ได้รับการออกแบบตามอัตลักษณ์ “สัตว์ร้ายที่ขวางทาง” ซึ่งทำงานสัมพันธ์กับค่าสี RGB ที่เซ็นเซอร์ตรวจจับได้ ดังนี้ (1) สีฟ้า (Blue: R0, G191, B255) เชื่อมโยงกับแอนิเมชันชุด “ปุมรกต” และภูมิทัศน์ “ไต้ฝุ่น” (2) สีเขียว (Green: R124, G252, B0) เชื่อมโยงกับแอนิเมชันชุด “งูมรกต” และภูมิทัศน์ “พงหญ้า” และ (3) สีเหลือง (Yellow: R255, G215, B0) เชื่อมโยงกับแอนิเมชันชุด “ตะขาบมรกต” และภูมิทัศน์ “ทะเลทราย”

3.3.2 เครื่องมือสำหรับการเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection Instrument) เครื่องมือที่ใช้ คือ แบบสอบถาม (Questionnaire) ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยอ้างอิงแนวคิดการวัดความพึงพอใจของผู้ใช้ของ Ullah AMMS. และ Tamaki J. (2011) เพื่อประเมินผลการออกแบบ แบ่งโครงสร้างออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1) ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป สอบถามข้อมูลพื้นฐานของผู้ตอบแบบสอบถาม ได้แก่ เพศ, อายุ และอาชีพ

2) ส่วนที่ 2 การประเมินความพึงพอใจและประสบการณ์ผู้ใช้งาน โดยมุ่งเน้นการวัดผลใน 3 ด้านหลัก ได้แก่ (1) ด้านระดับความน่าสนใจของผลงาน (2) ด้านระดับ

ความน่าสนใจของเทคโนโลยีดิจิทัล และ (3) ด้านระดับความน่าสนใจของรูปแบบการโต้ตอบ รวมจำนวน 8 ประเด็นคำถาม เครื่องมือนี้ใช้มาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Likert Scale) โดยกำหนดเกณฑ์การให้คะแนนและการแปลความหมาย ทั้งนี้ เครื่องมือได้ผ่านการตรวจสอบคุณภาพความเที่ยงตรง (Reliability) โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha) เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือทางสถิติและมีความเป็นวิทยาศาสตร์

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลตามขั้นตอนดังนี้

3.4.1 การวิจัยภาคสนามและเอกสาร (Fieldwork and Documentary Research) ผู้วิจัยได้ลงพื้นที่สำรวจ ณ เมืองฝอซาน ควบคู่กับการสังเคราะห์ข้อมูลจากเอกสารวิชาการที่เกี่ยวข้อง เพื่อจัดระเบียบองค์ความรู้ของมรดกทางวัฒนธรรมการเชิดสิงโตเมืองฝอซาน นำไปสู่การสร้าง “แผนที่ยีนทางวัฒนธรรม” (Cultural gene map) ที่มีความสมบูรณ์ โดยจำแนกองค์ประกอบออกเป็น 3 ระดับชั้น ได้แก่ ชั้นวัตถุชั้นพฤติกรรม และชั้นจิตวิญญาณ พร้อมทั้งระบุ “ยีนเด่น” และ “ยีนด้อย” เพื่อนำมากำหนดเป็น “รหัสการออกแบบ” (Design codes) สำหรับใช้เป็นแกนหลักในการพัฒนาผลงานศิลปะดิจิทัล

3.4.2 การพัฒนาและติดตั้งผลงาน (Development and installation) ดำเนินการสร้างสรรค์ผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบชุด “การเชิดสิงโตไฉชิง” และติดตั้ง ณ พื้นที่จัดแสดง พิพิธภัณฑ์วัดบรรพบุรุษเมืองฝอซาน (Foshan ancestral temple museum) โดยเปิดโอกาสให้กลุ่มตัวอย่างได้ทดลองใช้งานจริงผ่านกระบวนการโต้ตอบ

3.4.3 การประเมินผล (Evaluation) ดำเนินการแจกแบบสอบถามแก่กลุ่มตัวอย่างทันทีหลังจากการใช้งานผลงานเสร็จสิ้น ทั้งในรูปแบบออฟไลน์ (ณ สถานที่จัดแสดง) และรูปแบบออนไลน์ โดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบอาสาสมัคร (Volunteer sampling) ผู้วิจัยสามารถเก็บรวบรวมแบบสอบถามได้จำนวนทั้งสิ้น 452 ชุด หลังจากนั้นได้ทำการตรวจสอบความสมบูรณ์ของข้อมูลและคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง โดยตัดชุดข้อมูลของผู้ที่มีความบกพร่องด้านการ

จำแนกสีออก (เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการโต้ตอบกับผลงาน) ทำให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์และมีประสิทธิภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติจำนวน 407 ชุด

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) เพื่อประมวลผลข้อมูลจากแบบสอบถามที่ผ่านการตรวจสอบความเชื่อมั่น (Reliability) ด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's alpha) เรียบร้อยแล้ว โดยเลือกใช้สถิติในการวิเคราะห์ข้อมูลตามวัตถุประสงค์การวิจัย ดังนี้

3.4.1 สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ได้แก่

1) ค่าร้อยละ (Percentage) ใช้สำหรับการวิเคราะห์และนำเสนอข้อมูลพื้นฐานทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถามในส่วนที่ 1 ได้แก่ เพศ อายุ และอาชีพ

2) ค่าเฉลี่ย (Mean: $\bar{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: S.D.) ใช้สำหรับการวิเคราะห์ระดับความคิดเห็น ความพึงพอใจ และประสบการณ์ของผู้ใช้งานในส่วนที่ 2

โดยการแปลผลข้อมูลจะอ้างอิงเกณฑ์จากมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Likert Scale) โดยกำหนดน้ำหนักคะแนนดังนี้

5 คะแนน (เห็นด้วยอย่างยิ่ง/มากที่สุด)

4 คะแนน (เห็นด้วย/มาก)

3 คะแนน (ไม่แน่ใจ/ปานกลาง)

2 คะแนน (ไม่เห็นด้วย/น้อย)

1 คะแนน (ไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง/น้อยที่สุด)

3.4.2 สถิติเชิงอนุมาน (Inferential statistics) ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ใช้เพื่อทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยประสบการณ์ผู้ใช้งาน จำแนกตามตัวแปรอิสระ (Independent variables) ได้แก่ เพศ และ อายุ โดยใช้ค่าสถิติ F-test ในการทดสอบและคำนวณค่าความน่าจะเป็น (P-value) ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์การแปลผลระดับนัยสำคัญทางสถิติไว้ดังนี้

1) P-value > 0.05 หมายถึง ยอมรับสมมติฐานว่าง (ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ)

2) $0.01 < P\text{-value} < 0.05$ หมายถึง ปฏิเสธสมมติฐานว่าง (มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05)

3) P-value < 0.01 หมายถึง ปฏิเสธสมมติฐานว่าง (มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระดับสูง หรือที่ระดับ .01)

4. ผลการศึกษาวิจัย

จากการดำเนินการวิจัยเรื่อง “การสร้างนวัตกรรมศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบของ ‘การเชิดสิงโต’ ในฐานะมรดกทางวัฒนธรรมที่จับต้องไม่ได้” ผู้วิจัยขอเสนอผลการศึกษาลำดับวัตถุประสงค์ ดังนี้

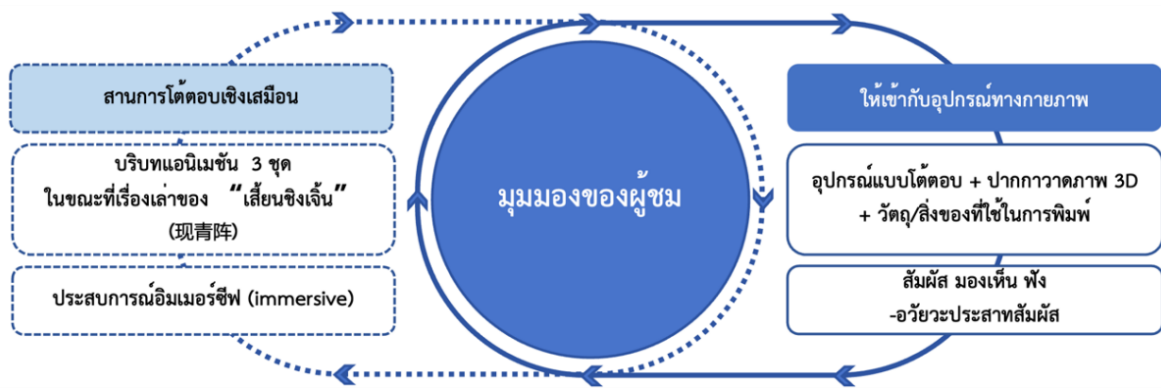
4.1 ผลการถอดรหัสและสังเคราะห์รหัสการออกแบบ
(Results of decoding and synthesizing design codes) ในการสร้างสรรค์ ผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบชุด ‘การเชิดสิงโตไผ่ชิง’ ในกระบวนการออกแบบต้นแบบ ผู้วิจัยยึดถือหลักเกณฑ์ของ “ใจความสำคัญและความหมายแฝงในการถ่ายทอดความหมายเชิงสร้างสรรค์ผ่านกระบวนการออกแบบ” เป็นสำคัญ ยกตัวอย่างเช่น ท่วงท่าการแสดง “เผยให้เห็นซิงเจิ้น” ซึ่งถือเป็นผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบชุดหนึ่ง อันประกอบด้วย อุปกรณ์เชิงโต้ตอบ 1 ชุด และสื่อแอนิเมชัน 3 ชิ้น ผ่านรูปแบบของการเล่าเรื่องที่ผสานโลกเสมือนและโลกจริง [6] โดยหลอมรวมความเชื่อพื้นบ้านสุนทรียศาสตร์ของศิลปะการต่อสู้ และความตึงเครียดของบทละครเข้าด้วยกัน [7] พร้อมกับการสร้างระบบสัญลักษณ์ทางวัฒนธรรมที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว เพื่อสานการโต้ตอบเชิงเสมือนให้เข้ากับอุปกรณ์ทางกายภาพ (ดังภาพที่ 3) เนื่องด้วยการแสดงเชิดสิงโตแบบดั้งเดิมของเมืองฝ่อซานมีลีลาการเชิดที่หลากหลาย ซึ่งดำเนินการเชิดไปตามหลักของกฎเกณฑ์ เหตุผล และขั้นตอน โดยในกระบวนการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับธีมของ “เผยให้เห็นซิงเจิ้น” นั้น ได้ให้ความสำคัญกับการตระหนักถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางวัฒนธรรมอันแน่นแฟ้น โดยได้ใช้การคัดเลือกแบบออร์แก

นิกในการเลือกปัจจัยทางวัฒนธรรมที่มีความเชื่อมโยงอย่างแนบชิดทั้งแบบที่ปรากฏเด่นชัดและแบบแฝง มาสร้างเป็นแบบจำลองเชิงลำดับชั้นที่ถอดปัจจัยด้านมรดกทางวัฒนธรรมที่จับต้องไม่ได้ของการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซาน ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงและการส่งต่อซึ่งกันและกันระหว่างยีนทางวัฒนธรรมแบบที่ปรากฏเด่นชัดและแบบแฝง

จากการวิเคราะห์และคัดเลือกยีนทางวัฒนธรรมตามตารางที่ 2 พบว่า ในมิติของ ชั้นวัตถุ (Material layer) ได้เลือก “C3 ฉากหลังและอุปกรณ์ประกอบฉาก” ซึ่งถือเป็นสิ่งที่คุณสมบัติสามารถจดจำและจำแนกได้อย่างง่ายดายในการแสดงเชิดสิงโตแบบดั้งเดิม จัดเป็นยีนเด่นที่พบเจอได้ทั่วไป ในมิติชั้นพฤติกรรม (Behavioral layer) ได้เลือก “B1 ท่วงท่าการแสดง” ซึ่งการตีความจำเป็นต้องใช้มุมมองเชิงวิชาชีพ จึงจัดอยู่ในกลุ่มของยีนด้อย ส่วนในมิติ ชั้นจิตวิญญาณ (Core - mental layer) ได้เลือก “A5 นัยยะของท่าทาง” [8] ซึ่งถือเป็นแก่นสารของการเชิดสิงโต หากผู้ชมไม่มีความเข้าใจในวัฒนธรรมการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซานเท่าที่ควร ก็ยากที่จะตระหนักถึงความหมายที่แท้จริง จึงถือเป็นยีนด้อยที่พบเจอได้ทั่วไป

ตารางที่ 1 กระบวนการถ่ายทอดความหมายเชิงสร้างสรรค์ยีนทางวัฒนธรรมผ่านการออกแบบ

ยีนสามระดับชั้น	รหัสยีน	แยกองค์ประกอบยีน	รายละเอียดยีน
ชั้นจิตวิญญาณ	A5 นัยยะของท่าทาง	a5-1 แสงหาความ	ความมั่งคั่งไหลมา
		เป็นมงคลและปัดเป่าสิ่งชั่วร้าย	ความเจริญรุ่งเรืองจากทุกทิศทาง
ชั้นพฤติกรรม การแสดง	B1 ท่วงท่า	b1-1 ธีมไผ่ชิง	การเชิดสิงโตไผ่ชิง
		b1-2 ขั้นตอนการไผ่ชิง	การเชิดสิงโต 11 ท่วงท่า
ชั้นวัตถุ	C3 ฉากหลังและอุปกรณ์ประกอบฉาก	c3-1 ซิงเปาซิงเจิ้น	ซิงเปา มีแก่นแท้เป็น
			ผักกาดหอม ในขณะที่ซิงเจิ้น ใช้แทนอุปกรณ์ทั่วไป



ภาพที่ 3 สถานการณ์โต้ตอบเชิงเสมือนให้เข้ากับอุปกรณ์ทางกายภาพ

4.2 ผลการพัฒนานวัตกรรมศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ (Results of interactive digital art development)

4.2.1 การออกแบบสัญลักษณ์ทางภาพลักษณ์ (Visual symbol design)

ผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบสัญลักษณ์ทางทัศนศิลป์โดยอาศัยกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลรูปทรงเรขาคณิตจากสัตว์ในจินตภาพ เพื่อสร้างระบบสัญลักษณ์ที่ใช้ในผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ ดังนี้

1) อัตลักษณ์ด้านเรขาคณิต (Geometric identity) สำหรับภาพลักษณ์การเชิดสิงโตที่ปรากฏในสื่อแอนิเมชัน ผู้วิจัยเลือกใช้ “สิงโตกวนอู” ซึ่งมีคุณลักษณะเก๋ไก๋ทั้งด้านศิลปะและการต่อสู้ โดยในขณะที่สิงโตร่ายรำจะแสดงให้เห็นถึงความองอาจและทรงพลังอย่างชัดเจน ส่วนตัวละครหลักที่เป็นอุปสรรคในสื่อแอนิเมชันนั้น ได้หยิบยกเหล่าสัตว์ร้ายในจินตภาพมาสร้างเป็นด้านภารกิจ [9] อาทิ มังกรฟ้า, ปูยักษ์, งูพิษ, แมงมุม, แมงป่อง และกิ้งกือ (ดังภาพที่ 4) โดยผู้วิจัยได้ลดทอนความน่ากลัวของสัตว์ร้ายเหล่านี้นลง และนำเสนอใหม่ในรูปแบบของความน่ารักและตลกขบขัน (Cute and Humorous Style) เพื่อสร้างสุนทรียภาพที่เข้าถึงผู้ชมได้หลากหลายทุกเพศทุกวัย



ภาพที่ 4 การแสดงเชิดสิงโตไฟซิงแบบดั้งเดิม

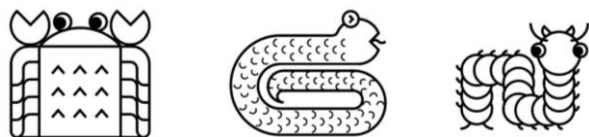
จากข้อมูลรูปทรงเรขาคณิตของสัตว์เหล่านั้น ผู้วิจัยได้ถอดออกมาเป็นอัตลักษณ์ที่เปี่ยมด้วยความหมายเพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้และแยกแยะสรรพสิ่งในจินตภาพ ซึ่งอัตลักษณ์เหล่านี้มีบทบาทสำคัญในกระบวนการประมวลผลภาพและการจำแนกรูปแบบให้กับผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบในขั้นตอนต่อไป

2) การถอดอัตลักษณ์ (Identity extraction) กระบวนการหลักของการประมวลผลอัตลักษณ์เชิงเรขาคณิตที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการ “การบูรณาการร่วมระหว่างจุด – เส้น – ระนาบ” ในการถอดอัตลักษณ์รูปทรงของสัญลักษณ์ที่มักใช้ในด้านการกิจ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์การกระจายตัวและความหนาแน่นของจุดในพื้นที่สามมิติ (เช่น จุดสูงสุด-ต่ำสุด จุดเปลี่ยนผืน) จากนั้นจึงระบุโครงสร้างเชิงเส้น (เส้นตรง เส้นโค้ง เส้นขอบ) และถอดโครงสร้างเชิงระนาบ (พื้นผิวขนาน, พื้นผิวโค้ง) ตามลำดับ

3) การวิเคราะห์อัตลักษณ์ (Identity Analysis) หลังการถอดอัตลักษณ์เชิงเรขาคณิต ดำเนินการวิเคราะห์ใน 3 ประเด็นหลัก เพื่อระบุข้อมูลที่มีคุณค่าสำหรับการออกแบบ ประกอบด้วย (1) การวิเคราะห์ความคล้ายคลึงเปรียบเทียบรูปร่างและพื้นผิวของรูปทรงเรขาคณิต (2) การวิเคราะห์ระยะห่าง คำนวณระยะห่างของจุดที่ใกล้ที่สุดและไกลที่สุด และ (3) การวิเคราะห์โครงสร้าง วิเคราะห์ความสัมพันธ์และการเชื่อมต่อของเส้นขอบ

ในลำดับสุดท้าย หลังจากการจัดปัจจัยรบกวนต่าง ๆ แล้ว ผู้วิจัยได้กำหนดสัญลักษณ์ทางภาพลักษณ์ของ

ตัวละครหลักโดยอ้างอิงจากผลการวิเคราะห์อัตลักษณ์ (ดังภาพที่ 5) โดยกำหนดให้ “ปู” แทนรูปทรงสมมาตรตามแกน “งู” แทนรูปทรงลักษณะกันหอย และ “กิ้งกือ” แทนรูปทรงแบบคดเคี้ยว เพื่อนำไปดำเนินการสร้างสรรค์ผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบต่อไป



ภาพที่ 5 ผลงานการออกแบบตัวละครหลักฉบับสมบูรณ์

4.2.2 ผลการพัฒนานวัตกรรมศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ (Results of interactive digital art development) ผลการพัฒนานวัตกรรมชุด “การขีดสิ่งใดไฉน” เป็นระบบศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ (Interactive digital art system) ที่ได้รับการออกแบบภายใต้แนวคิด “การผสานโลกจริงสู่โลกเสมือน” (Physical-to-virtual integration) โดยระบบทำหน้าที่เป็นสื่อกลางในการแปลงวัตถุทางกายภาพที่ผู้ชมสร้างสรรค์ขึ้น ให้กลายเป็นข้อมูลดิจิทัล เพื่อควบคุมการแสดงผลของสื่อแอนิเมชัน มีรายละเอียดองค์ประกอบและการทำงานดังนี้

1) สถาปัตยกรรมระบบฮาร์ดแวร์ (Hardware system architecture) โครงสร้างทางกายภาพของนวัตกรรมประกอบด้วย 3 ส่วนหลักที่ทำงานประสานกันผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ดังนี้ (1) ส่วนอินพุต (Input Unit) ประกอบด้วยปากกาวาดภาพ 3 มิติ (3D Pen) สำหรับให้ผู้ใช้งานขึ้นรูปวัตถุจำลองด้วยเส้นพลาสติกที่มีสีแตกต่างกัน และเซ็นเซอร์จำแนกสี (Color recognition sensor) ที่ติดตั้งอยู่ภายในแท่นวางทำหน้าที่ตรวจจับค่าแสงสะท้อนจากวัตถุและแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล (2) ส่วนประมวลผล (Processing unit) ใช้ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เป็นสมองกลฝังตัว ทำหน้าที่รับค่าจากเซ็นเซอร์และประมวลผลตรรกะ (Logic processing) เพื่อตรวจสอบว่าค่าสีที่ได้รับตรงกับเงื่อนไขใด จากนั้นจึงส่งคำสั่งไปยังส่วนแสดงผล และ (3) ส่วนแสดงผล (Output unit) ประกอบด้วย จอแสดงผล LED pixel screen ขนาด 4 นิ้ว สำหรับฉายภาพแอนิเมชัน

ความละเอียดสูง และ ลำโพงขนาดเล็ก สำหรับเล่นเสียงประกอบ (Sound effect) เพื่อสร้างบรรยากาศที่สมจริง

2) ตรรกะการทำงานของซอฟต์แวร์และการรหัสสี (Software logic & RGB coding) ระบบซอฟต์แวร์ถูกโปรแกรมให้ทำงานแบบ “เงื่อนไขตอบสนอง” (Condition-response) โดยใช้ ค่าสี RGB (Red, Green, Blue) เป็นรหัสควบคุม (Control codes) ในการเปลี่ยนฉากและตัวละคร ดังรายละเอียดในตารางข้อมูลจำเพาะต่อไปนี้

รหัสสีชุดที่ 1 (สีฟ้า) ค่า RGB (R:0, G:191, B:255) เงื่อนไข คือ เมื่อเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุสีฟ้า และการตอบสนอง คือ ระบบจะเรียกข้อมูลชุด “ภูมิทัศน์ใต้น้ำ” และแสดงแอนิเมชันการต่อสู้กับ “ปูมรกต”

รหัสสีชุดที่ 2 (สีเขียว) ค่า RGB (R:124, G:252, B:0) เงื่อนไข คือ เมื่อเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุสีเขียว และการตอบสนอง คือ ระบบจะเรียกข้อมูลชุด “ภูมิทัศน์พงหญ้า” และแสดงแอนิเมชันการต่อสู้กับ “งูมรกต”

รหัสสีชุดที่ 3 (สีเหลือง) ค่า RGB (R:255, G:215, B:0) เงื่อนไข คือ เมื่อเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุสีเหลือง และการตอบสนอง คือ ระบบจะเรียกข้อมูลชุด “ภูมิทัศน์ทะเลทราย” และแสดงแอนิเมชันการต่อสู้กับ “ตะขาบมรกต”

3) กระบวนการสร้างประสบการณ์ผู้ใช้ (User experience flow) นวัตกรรมนี้เปลี่ยนบทบาทของผู้ชมจาก “ผู้สังเกตการณ์” (Observer) เป็น “ผู้ร่วมสร้างสรรค์” (Co-creator) ผ่านกระบวนการ 3 ขั้นตอน คือ (1) การสร้างสรรค์ (Creation) ผู้ชมใช้ปากกา 3 มิติ สร้างวัตถุจำลอง (เปรียบเสมือนอาวุธหรือเครื่องมือไฉน) ตามจินตนาการ (2) การยืนยันตัวตน (Identification) นำวัตถุไปวางบนแท่นสแกนเพื่อให้เซ็นเซอร์อ่านค่ารหัสสี และ (3) การโต้ตอบ (Interaction) ระบบตอบสนองด้วยภาพและเสียง ทำให้ผู้ชมรู้สึกเสมือนว่าตนเองได้เข้าไปอยู่ในโลกของการขีดสิ่งใดและกำลังเผชิญหน้ากับด้านทดสอบต่าง ๆ ด้วยตนเอง

4.2.3 แนวคิดหัวข้อแอนิเมชัน ‘แต้มนัยน์ตา’ (Animation concept: dotting the eyes) ในส่วนของตัวละครอุปสรรค ได้แก่ ปูจิ้งจัน งูพิษ แมงมุม แมงป่อง และ กิ้งกือ ผู้วิจัยพบว่าลักษณะอักษรจีนของชื่อสัตว์เหล่านี้ทั้งหมด

มีรากศัพท์เป็นหมวด 'แมลง' ในกระบวนการคิดหัวข้อแอนิเมชันและการออกแบบตัวละคร ผู้วิจัยจึงได้พิจารณาอย่างรอบคอบเกี่ยวกับลักษณะทางชีววิทยาของ “สัตว์ร้ายที่ขวางทาง” แต่ละตัว โดยทำการปรับโครงสร้างอักษรและลบบางความน่ากลัวของเหล่าสัตว์ร้ายออก เพื่อนำเสนอให้อยู่ในรูปแบบของความน่ารักและตลกขบขัน ซึ่งสอดคล้องกับสุนทรียภาพที่เข้าถึงง่ายสำหรับผู้ชมทุกกลุ่ม

4.3 การออกแบบโครงเรื่องและภูมิทัศน์แอนิเมชัน (Narrative and landscape animation design) ผู้วิจัยได้กำหนดโครงสร้างการเล่าเรื่องและบริบทของแอนิเมชันเพื่อให้สอดคล้องกับแนวคิดการเชิดสิงโตผ้าด้านค่ายกล โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 มุมมองของผู้ชม (Spectator perspective)

ในขณะที่ฉายภาพแอนิเมชัน ตัวละครหลักในเชิงเงินอย่าง “ปุมรกด ฆุมรกด และกิ้งกือมรกด” ถือเป็นองค์ประกอบหลักของภาพ (ตามภาพที่ 8) ส่วนภาพลักษณ์ของ “สิงโต” ที่ต้องการเชิดนั้น ได้ปรากฏบริเวณมุมล่างซ้ายของจอภาพ ซึ่งเมื่อสลับแอนิเมชันเริ่มฉาย จากสิงโตที่อยู่ในลักษณะจ้องมองจะกลายเป็นท่าทางเตรียมเตะครูปเหยื่อพร้อมเข้าจู่โจม โดยที่ผู้ชมถูกกำหนดให้รับชมผ่าน มุมมองของบุคคลที่สาม (Third-person perspective) เสมือน “ตึกแต่นดำข้าวจับจิ้งจกจัน โดยไม่รู้ว่ามีนกสีเหลืองอยู่ข้างหลังและกำลังจะกินมัน” เพื่อให้ผู้ชมได้สัมผัสกับประสบการณ์อิมเมอร์ซีฟ (Immersive) ในขณะที่เรื่องเล่าของ “เสี้ยนชิงเงิน” กำลังดำเนินไป [10] พร้อมกับกระตุ้นความสงสัยใคร่รู้และสร้างความคาดหวังกับฉากการต่อสู้ที่กำลังจะเกิดขึ้น

4.3.2 บริบทของแอนิเมชัน (Animation Context)

การกำหนดการเคลื่อนไหวของตัวละครหลัก (รายละเอียดตามตารางที่ 3) มีบริบทประกอบด้วย 3 หน้าที่หลัก ได้แก่

1) หน้าที่เชิงรูปแบบ ใช้เป็นกรอบในการกำหนดเวลา พื้นที่ และตัวละครหลักของเรื่องเล่าในขณะที่ฉายภาพแอนิเมชัน

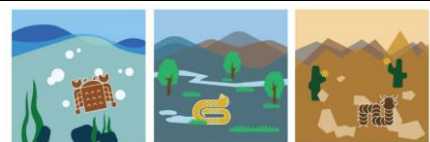
2) หน้าที่เชิงการเลียนแบบ ใช้เพื่อบรรยายเรื่องราวและฉากต่าง ๆ โดยอ้างอิงมาจากความเป็นจริงและสามารถขยายออกไปจนเกินความเป็นจริง

3) หน้าที่ในการกำหนดธีม ใช้เพื่ออธิบายความหมายของฉากต่าง ๆ ในเรื่องเล่า ซึ่งมีนัยยะเชิงสัญลักษณ์ที่ชัดเจนที่สุดในบริบทของเรื่องเล่า

4.3.3 การจัดวางภูมิทัศน์เชิงการเล่าเรื่อง (Narrative landscape arrangement) ผู้วิจัยใช้ลายเส้นซ้อนทับที่มีลักษณะตรงและโค้ง รวมถึงบล็อกรูปทรงเรขาคณิตเชิงนามธรรม เพื่อสร้างภูมิทัศน์ 3 รูปแบบ คือ ใต้น้ำ พงหญ้า และทะเลทราย โดยใช้โทนสีที่เรียบง่าย สดใส และสบายตา ทำให้เกิดบรรยากาศผ่อนคลาย เพื่อขับเน้นสภาพแวดล้อมของตัวละครหลักอย่าง “สัตว์ร้ายที่กีดขวางทาง” ดังรายละเอียดในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ภูมิทัศน์การเล่าเรื่องที่สอดคล้องกับตัวละครหลัก

บริบทแอนิเมชัน	ปุมรกด	ฆุมรกด	ตะขาบมรกด
ภูมิทัศน์	Blue – ใต้น้ำ	Green – พงหญ้า	Yellow - ทะเลทราย
จุดเด่นของภูมิทัศน์	กระแสน้ำทะเลกำลังเคลื่อนไหวพลุ่งพล่าน	สายน้ำในลำธารระลอกคลื่นไหลพรั่งพรู	ลมแรงพัดผ่านจากภูเขาไกล
	ท่าทาง	เป็นระลอก	ท่มเบิลวูด
	ฟล่าน	คลิ่น ผีเสื้อโอบ	(Tumbleweed)
	ฟองอากาศ	บินอย่างพลั่ว	กลิ้งไปมาบน
	ค่อย ๆ ลอยขึ้น	ไหวท่ามกลาง	ทะเลทรายตาม
	สูดพริ้วและจางหายไป	พองพอง	แรงลม



4.4 ผลการพัฒนานวัตกรรมศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ (Results of interactive digital art development) จากการออกแบบโครงสร้างเนื้อหา ผู้วิจัยได้พัฒนาสู่ระบบปฏิบัติการจริง โดยมีกลไกทางเทคโนโลยีและการทำงานดังนี้

4.4.1 ประสบการณ์อุปกรณ์แบบโต้ตอบชุด “เผยให้เห็นชิงเจิ้น” (Interactive device experience)
 นวัตกรรมนี้มีพื้นฐานมาจากเทคโนโลยีแบบโต้ตอบที่บูรณาการ 3 ส่วนหลัก ได้แก่ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) การจำแนกสี สัน (Color recognition) และแอนิเมชัน (Animation) ภายใต้แนวคิดการแสดง “เผยให้เห็นชิงเจิ้น” (Revealing Qing Zhen) โดยมีกระบวนการสร้างประสบการณ์ผู้ใช้งานดังนี้

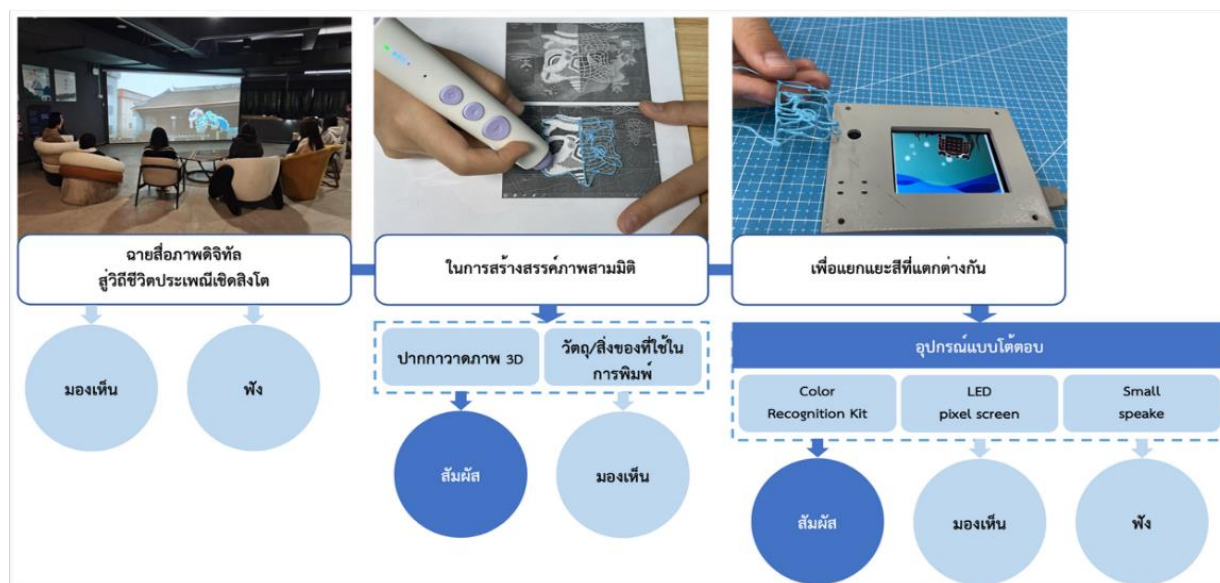
1) กระบวนการสร้างสรรค์ (Creation process)
 ผู้ใช้งานใช้อุปกรณ์แบบโต้ตอบร่วมกับปากกาวาดภาพ 3 มิติ (3D Pen) และวัสดุสำหรับการพิมพ์ เพื่อแปลงลวดลายสองมิติให้กลายเป็นวัตถุจริงหรือภาพสามมิติได้อย่างรวดเร็วตามจินตนาการ

2) กระบวนการจำแนกผล (Recognition process) นำวัตถุที่สร้างเสร็จแล้วเข้าสู่กระบวนการตรวจสอบ

ด้วยเซนเซอร์เพื่อจดจำและจำแนกสีสันที่แตกต่างกัน

3) กระบวนการแสดงผล (Display process)
 จอแสดงผล LED จะประมวลผลและแสดงภาพแอนิเมชันที่สอดคล้องกับค่าสีที่ตรวจจับได้ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้ (1) สีฟ้า (Blue) เชื่อมโยงกับสภาพแวดล้อม ใต้ น้ำ (สอดคล้องกับตัวละคร ปูมรกต) (2) สีเขียว (Green) เชื่อมโยงกับบริเวณพงพญา (สอดคล้องกับตัวละคร งูมรกต) และ (3) สีเหลือง (Yellow) เชื่อมโยงกับสภาพแวดล้อมแบบ ทะเลทราย (สอดคล้องกับตัวละคร ตะขาบมรกต)

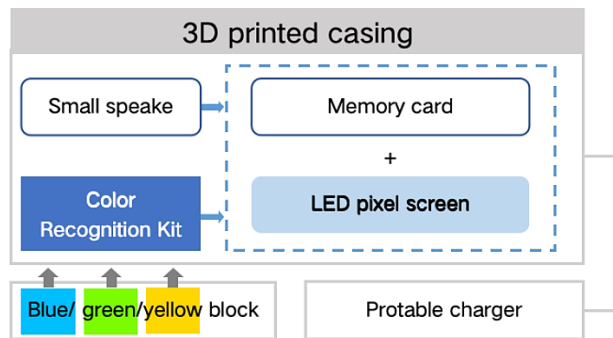
รูปแบบการนำเสนอ “ชิงเจิ้น” ที่มีความหลากหลายผ่านนวัตกรรมนี้ มีส่วนสำคัญในการดึงดูดความสนใจและกระตุ้นความอยากรู้อยากเห็นของผู้ชมให้มีส่วนร่วมกับมรดกทางวัฒนธรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ [11], [12]



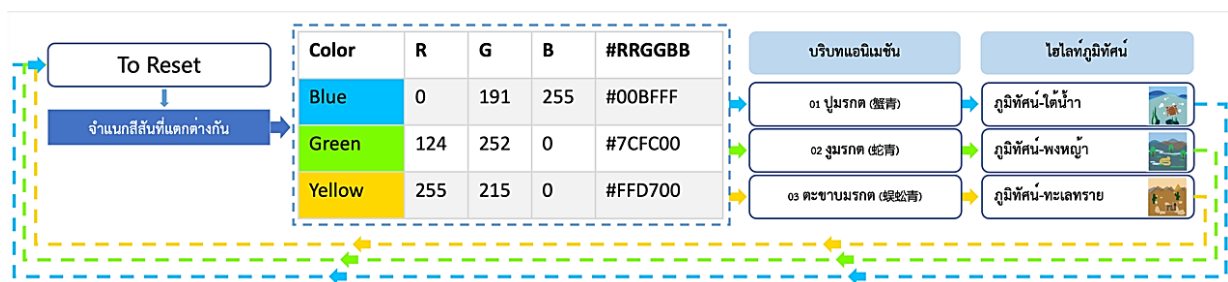
ภาพที่ 6 ประสบการณ์อุปกรณ์แบบโต้ตอบ

4.4.2 กลไกการกระตุ้นให้เกิดภาพเคลื่อนไหว (Animation trigger mechanism) วัสดุหลักที่ใช้ในอุปกรณ์แบบโต้ตอบ (ดังภาพที่ 7) ใช้ เซ็นเซอร์ในการจำแนกสี (ดังภาพที่ 8) เพื่อจำแนกสีสันที่แตกต่างกันจากวัตถุจำลองที่ผู้ชมสร้างขึ้น โดยเมื่อเซนเซอร์ตรวจจับค่าสีได้ จอ LED

จะทำการฉายสื่อแอนิเมชันที่กำหนดไว้โดยอัตโนมัติ ซึ่งสีแต่ละสีจะสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมที่ตัวละครหลักในแอนิเมชันอาศัยอยู่ (ฟ้า-น้ำ เขียว-หญ้า เหลือง-ทราย) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างการกระทำทางกายภาพของผู้ใช้กับการตอบสนองในโลกเสมือนจริง



ภาพที่ 7 วัสดุตั้งเดิมของอุปกรณ์แบบโต้ตอบ



ภาพที่ 8 ทดสอบกระบวนการจำแนกสี

4.5 ผลการประเมินประสบการณ์ผู้ใช้งาน (Results of user experience evaluation)

4.5.1 ระเบียบวิธีและการเก็บรวบรวมข้อมูล สำหรับการประเมินผล (Methodology and data collection) ในการวิเคราะห์ประสบการณ์งานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามระเบียบวิธีดังนี้

1) เครื่องมือที่ใช้ในการประเมิน ผลการออกแบบได้รับการประเมินโดยใช้แบบสอบถามที่มีโครงสร้างตามมาตราส่วนของ Likert scale ซึ่งอ้างอิงแนวคิดความพึงพอใจของผู้ใช้จาก Ullah AMMS. และ Tamaki J. (2011) มาประยุกต์ใช้ในการประเมินผลการออกแบบ งานวิจัยนี้ได้จัดทำแบบสอบถามแบ่งออกเป็น 2 ส่วน รวมทั้งสิ้น 8 ประเด็นคำถาม ได้แก่ (1) ส่วนที่ 1 คำถามเกี่ยวกับข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลด้านเพศ อายุ อาชีพ และอื่น ๆ และ (2) ส่วนที่ 2 คำถามเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับความรู้สึกและการมีส่วนร่วมด้านประสบการณ์แบบโต้ตอบของผู้ชม เพื่อศึกษาผลลัพธ์ด้านการประชาสัมพันธ์วัฒนธรรมเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าเขาอ่างฤๅไนผ่านการแสดงผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบชุด “การเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าเขาอ่างฤๅไน” จากการ

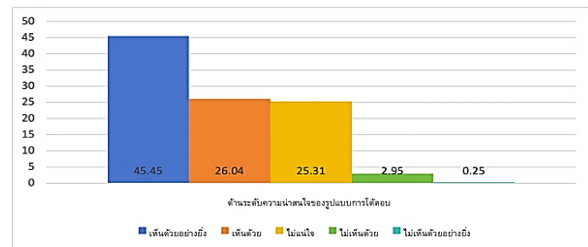
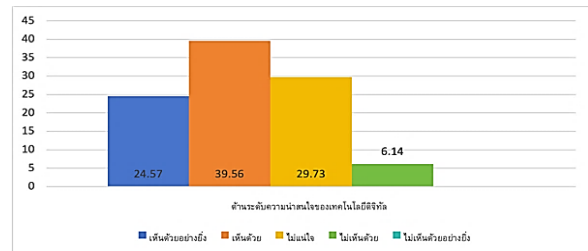
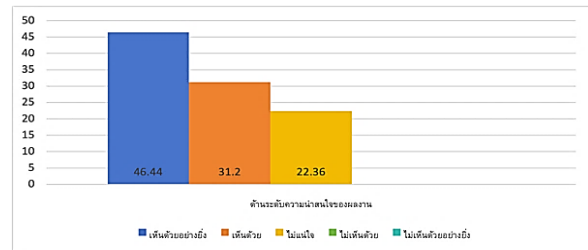
วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's alpha) สรุประดับความเชื่อถือและความเที่ยงของแบบสอบถามครั้งนี้ได้เท่ากับ 8.21 พบว่าแบบสอบถามมีความน่าเชื่อถือและความเที่ยงตรงสูง ซึ่งแสดงถึงความเป็นวิทยาศาสตร์ของเครื่องมือวิจัย

2) ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง กลุ่มเป้าหมายในครั้งนี้คือผู้เข้าชม พิพิธภัณฑ์วัดบรรพบุรุษ (Ancestral temple museum) โดยผู้วิจัยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบอาสาสมัคร (Volunteer sampling) สำหรับผู้ชมศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบชุด “การเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าเขาอ่างฤๅไน” ผ่านรูปแบบประสบการณ์การเข้าร่วม ณ สถานที่จริง และการแจกแบบสอบถามผ่านช่องทางออนไลน์ กลุ่มตัวอย่างประกอบด้วย นักศึกษา เจ้าหน้าที่ด้านการศึกษา และผู้ประกอบการในวงการอินเทอร์เน็ต ฯลฯ ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้ตัดกลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามที่มีความบกพร่องด้านการจำแนกสีออก ทำให้จากจำนวนเก็บรวบรวมทั้งหมด 452 ชุด ได้กลุ่มตัวอย่างที่มีประสิทธิภาพและนำมาวิเคราะห์จริงจำนวน 407 ชุด

3) การวิเคราะห์ข้อมูลและเกณฑ์การประเมินการประเมินผลการออกแบบวิเคราะห์และประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (SPSS) โดยใช้วิธีการทางสถิติดังนี้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ได้แก่ การคำนวณค่าร้อยละ (Percentage) ค่าเฉลี่ย (Mean: $\bar{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: S.D.) โดยกำหนดเกณฑ์ความพึงพอใจออกเป็น 5 ระดับ คือ มากที่สุด (5 คะแนน) มาก (4 คะแนน) ปานกลาง (3 คะแนน) น้อย (2 คะแนน) และน้อยที่สุด (1 คะแนน) สถิติเชิงอนุมาน (Inferential statistics) ใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่ออนุมานประสิทธิภาพและเปรียบเทียบความแตกต่างที่ผู้ชมได้รับจากผลงานศิลปะแบบโต้ตอบ

4.5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนา (Descriptive data analysis) ผู้วิจัยได้เรียบเรียงและสรุปข้อมูลที่ได้จากการสำรวจเพื่อรับข้อมูลโดยใช้กฎเกณฑ์ภายใน ด้วยการนำมาตราส่วนลิเคิร์ท (Likert scale) ซึ่งถือเป็นหนึ่งในมาตราส่วนที่ใช้บ่อยที่สุดในการวัดมาตราส่วนรวมคะแนน ประกอบด้วยชุดข้อความ ที่ชี้ให้ผู้ตอบแบบสอบถาม ให้เลือกตอบตามความพึงพอใจจำนวน 5 ระดับ ได้แก่ เห็นด้วยอย่างยิ่ง (5 คะแนน) เห็นด้วย (4 คะแนน) ไม่แน่ใจ (3 คะแนน) ไม่เห็นด้วย (2 คะแนน) และไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง (1 คะแนน) ตามลำดับ ซึ่งจากคะแนนที่ผู้ตอบแบบสอบถามตอบ จะทำให้สามารถระบุระดับความเข้มข้นของทัศนคติของพวกเขาต่อประเด็นใดประเด็นหนึ่งได้ ยกตัวอย่างเช่น คำถาม “ท่านคิดว่าผลงานชิ้นนี้มีความน่าสนใจหรือไม่” ซึ่งคะแนนของผู้ตอบแบบสอบถามแต่ละท่าน สามารถบ่งบอกถึงความพึงพอใจของผู้ชม ที่มีต่อประสิทธิภาพการมีส่วนร่วมในผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบได้ โดยประเด็นคำถามนี้มีคำตอบที่มีประสิทธิภาพจำนวน n ชุด โดยมีผู้เข้ารับการทดสอบจำนวน 46.44% ท่าน ที่เลือกคำตอบ เห็นด้วยอย่างยิ่ง (5 คะแนน) มีผู้เข้ารับการทดสอบจำนวน 31.22% ท่าน เลือกคำตอบ เห็นด้วย (4 คะแนน) มีผู้เข้ารับการทดสอบจำนวน 22.36% ท่าน เลือกคำตอบ ไม่แน่ใจ (3 คะแนน) มีผู้เข้ารับการทดสอบจำนวน 0% ท่าน เลือกคำตอบ ไม่เห็นด้วย (2 คะแนน) และมี

ผู้เข้ารับการทดสอบจำนวน 0% ท่าน เลือกคำตอบ ไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง (1 คะแนน) ตามภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS แสดงในรูปแบบแผนภูมิแท่งแบบจัดกลุ่ม

ในการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยใช้สูตรในการคำนวณค่าเฉลี่ยรวม (Mean) ดังสมการที่ (1)

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \dots\dots\dots(1)$$

โดยที่ μ คือ ค่าเฉลี่ย
 $\sum_{i=1}^N X_i$ คือ ผลรวมของคะแนนทั้งหมด
 N คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่าง

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนาด้วย SPSS

ประเด็นการประเมิน	N	MIN	MAX	AVE	SD
				(Average)	
ด้านระดับความ					
น่าสนใจของผลงาน	407	1	5	4.241	0.795

ประเด็นการประเมิน	N	MIN	MAX	AVE (Average)	SD
ด้านระดับความ น่าสนใจของเทคโนโลยี					
ดิจิทัล	407	1	5	3.826	0.872
ด้านระดับความ น่าสนใจของรูปแบบ					
การโต้ตอบ	407	1	5	4.135	0.912
กรณีศึกษาที่มี ประสิทธิภาพ	407				

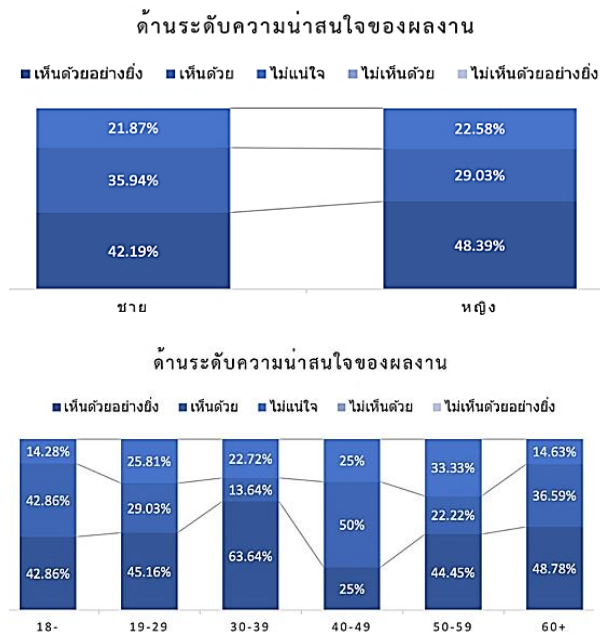
จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยด้านระดับความน่าสนใจของผลงานมีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 4.241 แสดงให้เห็นว่าผู้ชมส่วนใหญ่เห็นว่าผลงานชิ้นนี้มีความน่าสนใจในระดับที่ค่อนข้างสูง ขณะที่ค่าเฉลี่ยด้านการดึงดูดความสนใจของรูปแบบโต้ตอบมีค่าสูงเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ 4.135 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า ผู้ชมส่วนใหญ่สามารถถูกดึงดูดด้วยรูปแบบการโต้ตอบของผลงานนี้ได้ ส่วนค่าเฉลี่ยด้านการดึงดูดด้วยเทคโนโลยีดิจิทัลมีค่าต่ำที่สุด อยู่ที่ 3.826 แสดงให้เห็นว่าผู้ชมจำนวนไม่น้อยไม่ได้ให้ความสำคัญกับเทคโนโลยีดิจิทัลที่นำมาใช้ในผลงาน ทั้งนี้ จากการศึกษาและติดตามความคิดเห็นของผู้ชมที่กลับมาสำรวจและเยี่ยมเยียนอีกครั้งพบว่า กลุ่มผู้ชมวัยรุ่นและเยาวชนมีแนวโน้มชื่นชอบการทดลองซ้ำ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของผลงานที่ออกแบบในลักษณะของเกมที่มีการผสมผสานกิจกรรมที่หลากหลาย ทั้งนี้ สามารถสรุปได้ว่า ผู้ชมค่อนข้างมีความพึงพอใจต่อประสบการณ์การมีส่วนร่วมในผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบชุด “การขีดสิ่งโตड़ेขิง”

4.5.3 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงอนุมาน (Inferential data analysis) ในการวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรอิสระ (Independent variable) ต่อตัวแปรตาม (Dependent variable) ผู้วิจัยเลือกใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งใช้ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลขของตัวแปรตาม ในการทดสอบว่าผลลัพธ์ของตัวแปรอิสระนี้มีความสำคัญหรือไม่ สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ผู้วิจัยใช้การ

วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบตัวแปรเดียว (One-Way ANOVA) เพื่อศึกษาว่า ความแตกต่างทาง เพศ อายุ หรืออาชีพ ในฐานะที่เป็นตัวแปรอิสระมีผลต่อประสบการณ์การมีส่วนร่วมในผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบหรือไม่ โดยมีขั้นตอนดำเนินการดังนี้ (1) สร้างสถิติการทดสอบ (2) คำนวณค่าที่สังเกตได้ของสถิติการทดสอบและค่าความน่าจะเป็น (P -value) แล้ววิเคราะห์ผล และ (3) กำหนดระดับนัยสำคัญ α และสรุปข้อสรุปที่เกี่ยวข้อง

โดยใช้โปรแกรม SPSS นำข้อมูลที่เกี่ยวข้องเข้าสู่ค่าสถิติ F เพื่อคำนวณค่าที่สังเกตได้ของสถิติการทดสอบและค่าความน่าจะเป็นที่สอดคล้องกัน โดยมีเกณฑ์การแปลผลดังนี้ (1) หากค่าความน่าจะเป็น > 0.05 บ่งบอกถึงนัยสำคัญไม่ชัดเจน (ไม่มีความแตกต่าง) (2) หากค่าความน่าจะเป็น > 0.01 แต่ < 0.05 บ่งบอกถึงผลลัพธ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติ และ (3) หากค่าความน่าจะเป็น < 0.01 บ่งบอกถึงนัยสำคัญสูง

1) ผลการวิเคราะห์ด้านระดับความน่าสนใจของผลงาน ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยส่วนบุคคลกับประสบการณ์ของผู้ใช้งานในมิติของ “ระดับความน่าสนใจของผลงาน” ผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อทดสอบสมมติฐานว่าผู้ใช้งานที่มี เพศ และช่วงอายุ แตกต่างกัน จะมีระดับความสนใจต่อผลงานศิลปะดิจิทัลแตกต่างกันหรือไม่ โดยมีรายละเอียดผลการวิเคราะห์ทางสถิติและการทดสอบค่าความแปรปรวน ดังปรากฏในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้านระดับความน่าสนใจของผลงาน

สำหรับการวิเคราะห์เชิงลึกถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อระดับความน่าสนใจของผลงาน (Interest in the work) ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความคิดเห็นระหว่างกลุ่มจำแนกตามตัวแปรอิสระหลัก 2 ประการ คือ เพศ และ อายุ โดยใช้สถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อหาข้อสรุปทางสถิติ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 5

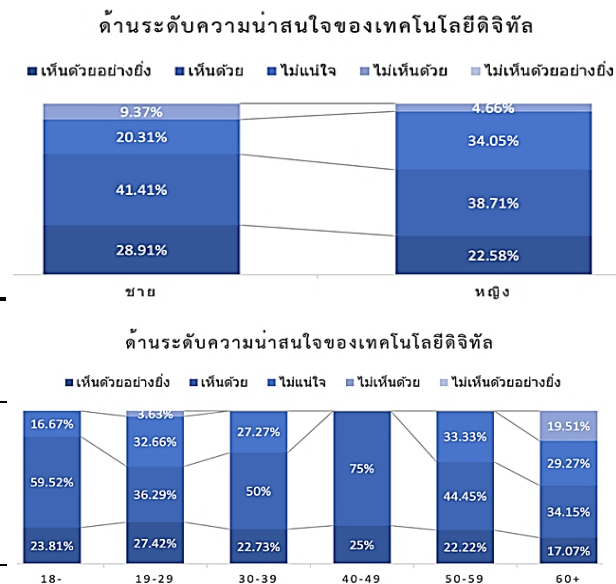
ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้านระดับความน่าสนใจของผลงาน

ตัวแปรอิสระ	แหล่งความแปรปรวน	SS	DF	MS	F	P-value
เพศ	ระหว่างกลุ่ม	0.265	1	0.265	0.419	0.518
	ภายในกลุ่ม	256.138	405	0.632		
	รวมทั้งสิ้น	256.403	406			
อายุ	ระหว่างกลุ่ม	2.476	5	0.495	0.782	0.563
	ภายในกลุ่ม	253.927	401	0.633		
	รวมทั้งสิ้น	256.403	406			

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ระดับความน่าสนใจของผลงานเป็นปัจจัยเดียวในการวิเคราะห์ความ

แปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) พบว่า ค่าระดับนัยสำคัญ (P -value) ของตัวแปร เพศ มีค่าเท่ากับ 0.518 และค่าระดับนัยสำคัญของตัวแปร อายุ มีค่าเท่ากับ 0.563 ซึ่งค่าความน่าจะเป็นทั้งสองมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่า ความแตกต่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจากการสำรวจและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่า ผู้ชมโดยทั่วไปมีความรู้สึกอยากรู้ อยากเห็นต่อการจัดนิทรรศการแบบโต้ตอบในรูปแบบใหม่ และมีความตั้งใจเข้าร่วมกิจกรรมดังกล่าวในระดับสูง โดยไม่ขึ้นอยู่กับเพศหรือวัย

2) ผลการวิเคราะห์ด้านระดับความน่าสนใจของเทคโนโลยีดิจิทัล ในลำดับถัดมา เป็นการศึกษาผลกระทบของตัวแปรอิสระที่มีต่อ “ระดับความน่าสนใจของเทคโนโลยีดิจิทัล (Interest in digital technology)” ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของนวัตกรรมชุดนี้ โดยผู้วิจัยได้ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มเพศและช่วงอายุ ว่ามีผลกระทบต่อความสนใจในกลไกทางเทคโนโลยีที่นำมาใช้หรือไม่ แสดงผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้านระดับความน่าสนใจของเทคโนโลยีดิจิทัล

ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกทางสถิติเพื่อทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับระดับความน่าสนใจของเทคโนโลยีดิจิทัล โดยเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มตัวแปรอิสระ ได้แก่ เพศ และ อายุ ผลการคำนวณค่าความแปรปรวนและระดับนัยสำคัญทางสถิติ ปรากฏดังรายละเอียดในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้านระดับความน่าสนใจของเทคโนโลยีดิจิทัล

ตัวแปรอิสระ	แหล่งความแปรปรวน	SS	DF	MS	F	P-value
เพศ	ระหว่างกลุ่ม	0.992	1	0.992	1.306	0.254
	ภายในกลุ่ม	307.622	405	0.76		
	รวมทั้งสิ้น	308.614	406			
อายุ	ระหว่างกลุ่ม	13.622	5	2.724	3.704	0.0027*
	ภายในกลุ่ม	294.992	401	0.736		
	รวมทั้งสิ้น	308.614	406			

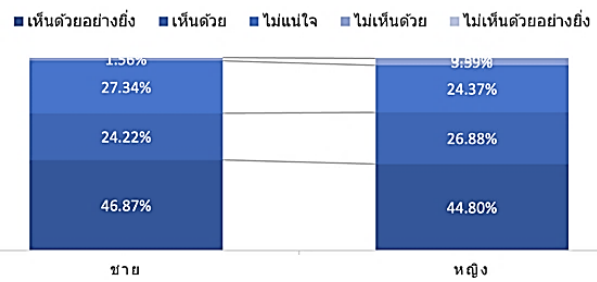
*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

จากตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้แรงดึงดูดที่ได้จากเทคโนโลยีดิจิทัล ซึ่งถือเป็นปัจจัยเดียวในการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว พบว่า ตัวแปรเพศ มีค่าระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.254 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตัวแปรอายุ มีค่าระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.0027 ซึ่งน้อยกว่า 0.01 แสดงว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระดับที่สูง จากการสำรวจและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าประเด็นที่ผู้ชมให้ความสนใจไม่ได้ขึ้นอยู่กับการนำเทคโนโลยีดิจิทัลที่ล้ำสมัยมาประยุกต์ใช้ในผลงานเพียงอย่างเดียว หากแต่ขึ้นอยู่กับ การออกแบบรูปแบบเกมที่หลากหลายภายในผลงาน ซึ่งสามารถกระตุ้นความอยากรู้อยากเห็นและความคิดสร้างสรรค์ของผู้ชมได้ โดยกลุ่มช่วงอายุที่ต่างกันมีการตอบสนองต่อเทคโนโลยีในระดับที่แตกต่างกัน

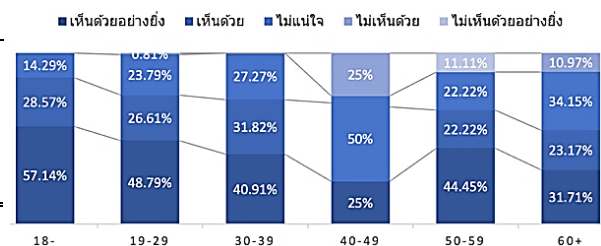
3) ผลการวิเคราะห์ด้านระดับความน่าสนใจของรูปแบบการโต้ตอบ สุดท้ายเป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อ

ระดับความน่าสนใจของรูปแบบการโต้ตอบ (Interest in interaction forms) ซึ่งเป็นหัวใจหลักของงานศิลปะเชิงปฏิสัมพันธ์ชุดนี้ โดยผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มเพศและช่วงอายุ ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 12

ด้านระดับความน่าสนใจของรูปแบบการโต้ตอบ



ด้านระดับความน่าสนใจของรูปแบบการโต้ตอบ



ภาพที่ 12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้านระดับความน่าสนใจของรูปแบบการโต้ตอบ

สุดท้ายเป็นการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อระดับความน่าสนใจของรูปแบบการโต้ตอบ (Interest in interaction forms) ซึ่งถือเป็นกลไกสำคัญในการสร้างประสบการณ์ร่วมของผู้ใช้งาน ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบความแตกต่างทางสถิติระหว่างกลุ่มตัวอย่างที่จำแนกตาม เพศ และ อายุ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวปรากฏดังรายละเอียดในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้านระดับความน่าสนใจของรูปแบบการโต้ตอบ

ตัวแปรอิสระ	แหล่งความแปรปรวน	SS	DF	MS	F	P-value
เพศ	ระหว่างกลุ่ม	0.156	1	0.156	0.188	0.665
	ภายในกลุ่ม	337.411	405	0.833		
	รวมทั้งสิ้น	337.568	406			
อายุ	ระหว่างกลุ่ม	21.495	5	4.299	5.454	0.00007*
	ภายในกลุ่ม	316.073	401	0.788		
	รวมทั้งสิ้น	337.568	406			

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

จากตารางที่ 7 เมื่อใช้แรงดึงดูดจากรูปแบบโต้ตอบที่เป็นปัจจัยเดียวในการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว จะพบว่า ตัวแปรเพศ ค่าระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.665 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่า ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตัวแปรอายุ ค่าระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.00007 ซึ่ง น้อยกว่า 0.01 แสดงว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระดับที่สูง จากการสำรวจและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่า ในช่วงกระบวนการโต้ตอบได้มีการหลอมรวมรูปแบบบางส่วนอย่าง “การสร้างสรรคร่วมกันระหว่างผู้ชม” (Co-creation) ทำให้พบว่า กลุ่มผู้ชมวัยรุ่นและเยาวชนมีความเพลิดเพลินและให้คุณค่ากับกระบวนการสร้างสรรค์ร่วมกันมากกว่ากลุ่มผู้ชมสูงอายุ

เมื่อพิจารณาร่วมกับลักษณะการกระจายของแผนภูมิแท่งแบบจัดกลุ่ม (ตามภาพที่ 10, 11 และ 12) จะเห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มผู้สูงอายุแล้ว กลุ่มผู้ชมวัยรุ่นมีประสบการณ์การมีส่วนร่วมต่อผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบในระดับที่เข้มข้นยิ่งกว่า ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมการเรียนรู้และการตอบสนองต่อสื่อใหม่ที่แตกต่างกันตามช่วงวัย

5. สรุปผล

จากการดำเนินการวิจัยเรื่อง “การสร้างนวัตกรรมศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบของ ‘การเชิดสิงโต’ ในฐานะมรดกทางวัฒนธรรมที่จับต้องไม่ได้” สามารถสรุปผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

5.1 ผลการศึกษาและถอดรหัสองค์ความรู้ภูมิปัญญาท้องถิ่นของการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซาน ผู้วิจัยสามารถถอดรหัสโครงสร้างทางวัฒนธรรมของการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซานและสร้าง “แผนที่ยีนทางวัฒนธรรม” (Cultural gene map) ที่มีความสมบูรณ์เป็นระบบ โดยจำแนกองค์ประกอบออกเป็น 3 ระดับชั้น ได้แก่ 1) ชั้นวัตถุ (Material layer) ซึ่งเป็นยีนเด่นที่ปรากฏชัดเจน เช่น อุปกรณ์ประกอบฉาก 2) ชั้นพฤติกรรม (Behavioral layer) และ 3) ชั้นจิตวิญญาณ (Mental layer) ซึ่งเป็นยีนด้อยที่แฝงอยู่ภายใน เช่น ท่วงท่าการแสดงและความเชื่อเรื่องสิริมงคล ผลการศึกษาพบว่า โครงสร้างยีนเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันอย่างเป็นระบบและเหมาะสมต่อการนำมาสืบทอดผ่านกระบวนการสร้างสรรค์ใหม่

5.2 ผลการระบุใจความสำคัญและความหมายแฝงในการถ่ายทอดความหมายเชิงสร้างสรรค์ การใช้เกณฑ์การกระจายตัวของยีนทางวัฒนธรรม ทำให้สามารถระบุ “รหัสการออกแบบ” (Design codes) ที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายทอดความหมายเชิงสร้างสรรค์ โดยผู้วิจัยได้คัดเลือกยีนที่มีความสำคัญและสื่อความหมายได้ดีที่สุดมาประยุกต์ใช้ ได้แก่ ยีนเด่นในชั้นวัตถุ (C3: ฉากหลังและอุปกรณ์) ซึ่งง่ายต่อการจดจำ ผสานกับยีนด้อยในชั้นพฤติกรรม (B1: ท่วงท่าการแสดง) และ ยีนด้อยในชั้นจิตวิญญาณ (A5: นัยยะแห่งสิริมงคล) มากำหนดเป็นแนวคิดหลักในการออกแบบชุด “เผยให้เห็นชิงเจิน” (Revealing Qing Zhen) ซึ่งเป็นการนำแก่นแท้ของพิธีกรรม “ไฉชิง” มาตีความใหม่ในรูปแบบดิจิทัล เพื่อให้ผู้ชมสามารถเข้าถึงความหมายแฝงทางวัฒนธรรมได้ง่ายขึ้น

5.3 ผลการสร้างสรรคนวัตกรรมศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ (Interactive digital art) งานวิจัยประสบความสำเร็จในการพัฒนานวัตกรรมชุด “การเชิดสิงโตไฉชิง” ซึ่งเป็นระบบศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบที่นำสัญลักษณ์และ

อัตลักษณ์ทางวัฒนธรรมมาประยุกต์ใช้ผ่านแนวคิด “การผสานโลกจริงสู่โลกเสมือน” (Physical-to-virtual integration) นวัตกรรมนี้ประกอบด้วยการทำงานร่วมกันของปากกาวาดภาพ 3 มิติ (3D Pen) เซ็นเซอร์จำแนกสี และจอแสดงผลแอนิเมชัน โดยมีการออกแบบตัวละครอุปสรรค (ปู งู และตะขาบ) ให้มีรูปลักษณ์ที่น่ารักและตลกขบขัน (Cute and humorous) เพื่อลดทอนความน่ากลัวและดึงดูดความสนใจ ระบบช่วยส่งเสริมการเรียนรู้และการมีส่วนร่วมโดยเปลี่ยนผู้ชมให้เป็น “ผู้ร่วมสร้างสรรค์” (Co-creator) ที่สามารถกำหนดผลลัพธ์ของแอนิเมชันผ่านการสร้างวัตถุจำลองและการจำแนกสี

5.4 ผลการประเมินความพึงพอใจและประสบการณ์ของผู้ใช้งาน ผลการประเมินจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 407 คน พบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบในระดับ “มาก” ($\mu = 4.24$, S.D. = 0.80) โดยเฉพาะในด้านความน่าสนใจของผลงานและรูปแบบการโต้ตอบ ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบปัจจัยส่วนบุคคลพบว่า ช่วงอายุ มีผลต่อประสบการณ์การใช้งานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 โดยกลุ่มเยาวชนมีแนวโน้มให้ความสนใจและมีส่วนร่วมกับรูปแบบการโต้ตอบมากกว่ากลุ่มผู้สูงอายุ ในขณะที่ปัจจัยด้านเพศไม่ส่งผลกระทบต่อความแตกต่างนี้ ผลการศึกษายืนยันว่านวัตกรรมดิจิทัลที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูงในการเป็นสื่อกลางเพื่อเผยแพร่วัฒนธรรม การเชิดสิงโตเมืองฝ่อซานให้เป็นที่รู้จักและสืบทอดต่อไปในบริบทร่วมสมัย

6. อภิปรายผล

จากการศึกษาวิจัยเรื่อง “การสร้างนวัตกรรมศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบของ ‘การเชิดสิงโต’ ในฐานะมรดกทางวัฒนธรรมที่จับต้องไม่ได้” ผู้วิจัยขออภิปรายผลการศึกษาดำเนินวัตถุประสงค์การวิจัย โดยเชื่อมโยงกับแนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

6.1 การถอดรหัสและถ่ายทอดความหมายเชิงสร้างสรรค์ของมรดกทางวัฒนธรรม ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการนำ “ทฤษฎีปัจจัยทางวัฒนธรรมสามประการ” มา

บูรณาการร่วมกับทฤษฎีอื่นทางวัฒนธรรม [5] ช่วยให้สามารถถอดรหัสองค์ความรู้ภูมิปัญญาท้องถิ่นของการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซานได้อย่างเป็นระบบ โดยการสังเคราะห์ข้อมูลออกเป็น 3 ระดับชั้น (ชั้นวัตถุ ชั้นพฤติกรรม และชั้นจิตวิญญาณ) ทำให้สามารถระบุ “ใจความสำคัญ” และ “ความหมายแฝง” ที่ซ่อนอยู่ในการแสดงเชิดสิงโตได้ กระบวนการนี้สอดคล้องกับแนวคิดการสืบทอดวัฒนธรรมที่ต้องอาศัยการทำความเข้าใจบริบทดั้งเดิมอย่างลึกซึ้งก่อนที่จะทำการสร้างสรรค์ใหม่ ส่งผลให้ผลงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบที่พัฒนาขึ้น ไม่ได้เป็นเพียงการคัดลอกรูปแบบภายนอก แต่เป็นการแปลงข้อมูลทางวัฒนธรรมในความหมายวงกว้างให้กลายเป็น “สัญลักษณ์ทางการออกแบบ” ที่เปี่ยมไปด้วยอัตลักษณ์และสามารถระบุตัวตนได้อย่างชัดเจน ซึ่งถือเป็นกลไกสำคัญในการเชื่อมโยงมรดกทางวัฒนธรรมเข้ากับบริบทร่วมสมัย ตามแนวคิดของ Giannini T. และ Bowen J P. [4] ที่กล่าวถึงบทบาทของวัฒนธรรมดิจิทัลในการสร้างรูปแบบการสื่อสารใหม่เพื่อเชื่อมโยงอดีตกับปัจจุบัน

6.2 นวัตกรรมศิลปะดิจิทัลและการผสานประสบการณ์โลกจริงสู่โลกเสมือน การสร้างสรรค์นวัตกรรมชุด ‘การเชิดสิงโตไฉชิง’ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการออกแบบที่เน้น “การผสมผสานระหว่างวัสดุและดิจิทัล” (Integrating material and digital) ตามแนวคิดของ Petrelli และคณะ [3] โดยการให้ผู้ชมได้ลงมือสร้างสรรค์วัตถุด้วยปากกาวาดภาพ 3 มิติ (3D Pen) ก่อนที่จะนำไปสู่ผลลัพธ์ในโลกเสมือนจริง ช่วยสร้างประสบการณ์แบบอิมเมอร์ซีฟ (Immersive) ที่ทำให้ผู้ชมรู้สึกเป็นส่วนหนึ่งของเรื่องราว ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Cunha [10] นอกจากนี้ ในเชิงเทคนิคของการพัฒนาอุปกรณ์ ผู้วิจัยพบประเด็นสำคัญเรื่อง “ความเป็นมิตรของเทคโนโลยีและการบำรุงรักษา” โดยพบว่าการใช้เซ็นเซอร์จำแนกสีอาจถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อมได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Adamo M. และคณะ [11] ที่ระบุถึงปัจจัยความสนใจและการรับรู้สีที่ซับซ้อนในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงระบบ

โดยเปลี่ยนจากจอแสดงผลขนาดใหญ่เป็น จอ LED ขนาดเล็ก 4 นิ้ว และลดระยะเวลาการรันระบบเมื่อเกิดความขัดข้องให้เหลือเพียง 2 วินาที การปรับเปลี่ยนนี้ไม่เพียงช่วยลดภาระการใช้พลังงาน แต่ยังช่วยบรรเทาความรู้สึกเชิงลบของผู้ชม และทำให้ประสบการณ์การใช้งานมีความต่อเนื่องราบรื่น

6.3 การประเมินประสบการณ์และการมีส่วนร่วมของผู้ใช้งาน ผลการประเมินความพึงพอใจพบว่า ผู้ชมมีความพึงพอใจต่อผลงานในระดับสูง และมีความตั้งใจเข้าร่วมกิจกรรมเนื่องจากความอยากรู้อยากเห็นในรูปแบบการนำเสนอใหม่ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) พบประเด็นที่น่าสนใจ ดังนี้ (1) ปัจจัยด้านเพศ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสบการณ์ของผู้ใช้งาน แสดงให้เห็นว่านวัตกรรมนี้มีการออกแบบที่เป็นสากลและเข้าถึงได้ง่าย (2) ปัจจัยด้านอายุ ส่งผลต่อประสบการณ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่า “กลุ่มผู้ชมวัยรุ่นและเยาวชน” มีความเพลิดเพลินและให้คุณค่ากับกระบวนการ “การสร้างสรรคร่วมกัน” (Co-creation) มากกว่ากลุ่มผู้สูงอายุ ผลการวิจัยนี้สนับสนุนแนวความคิดการออกแบบเกม (Game design) ของ Winn B. M. [6] และ Fullerton T. [7] ที่ระบุว่าองค์ประกอบของการเล่นและการมีปฏิสัมพันธ์เชิงรุก (Active interaction) เป็นปัจจัยสำคัญในการกระตุ้นความสนใจของคนรุ่นใหม่ โดยไม่ได้ขึ้นอยู่กับความล้ำสมัยของเทคโนโลยีเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับ “รูปแบบเกมที่หลากหลาย” ที่เปิดโอกาสให้ผู้ชมได้ใช้ความคิดสร้างสรรค์ของตนเอง

โดยสรุป งานวิจัยนี้ยืนยันว่า ศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบที่ได้รับการออกแบบโดยคำนึงถึงรากฐานทางวัฒนธรรมและประสบการณ์ของผู้ใช้ เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการเผยแพร่วัฒนธรรมการเชิดสิงโตเมืองฝ่อซาน โดยสามารถเปลี่ยนผู้ชมจาก “ผู้รับสาร” ให้กลายเป็น “ผู้ร่วมสืบทอด” วัฒนธรรมได้อย่างเป็นรูปธรรม

7. ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

7.1 ออกแบบแนวทางและสร้างต้นแบบการโต้ตอบสำหรับศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ [14] เชิญผู้เชี่ยวชาญมาร่วมการ

ทดสอบต้นแบบ และเสนอข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะผ่านแบบสอบถามการประเมิน เพื่อศึกษาถึงผลลัพธ์ของผลงานศิลปะในด้านประสบการณ์แบบโต้ตอบ

7.2 ในการประเมินงานศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบของชุด ‘การเชิดสิงโตไฉ่ซิง’ ได้เสนอแนะให้ใช้มาตราส่วน Likert ซึ่งทำให้มั่นใจได้ถึงความเที่ยงธรรมและการเปรียบเทียบของผลการทดลอง

7.3 ควรเพิ่มในด้านการปรับจูนเซ็นเซอร์จำแนกสี (Color recognition sensor) ให้มีความเสถียรภายใต้สภาพแสงที่หลากหลายในพิพิธภัณฑ์ เพื่อลดความผิดพลาดในการแสดงผล

7.4 ควรเตรียม อุปกรณ์แบบโต้ตอบ ปากกาวาดภาพ 3D และวัตถุ สิ่งของที่ใช้ในการพิมพ์ สำรองหลายชุด ให้เหมาะสมกับจำนวนผู้เข้าชมนิทรรศการ

7.5 ความเป็นมิตรของเทคโนโลยีระหว่างการใช้ชมควรให้ความสำคัญกับความสนใจกับความสะดวกสบายในการใช้งานซอฟต์แวร์ และจำทำให้ทำให้สามารถเรียนรู้ได้ลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น

ในการศึกษานี้ ศิลปะดิจิทัลแบบโต้ตอบ ใช้การโต้ตอบระหว่างภาพเคลื่อนไหวแอนิเมชันในรูปแบบเสมือนและเป็นจริง เผยแพร่วัฒนธรรมการเชิดสิงโตและปรับปรุงความน่าสนใจทางศิลปะของกิจกรรมวัฒนธรรมพื้นบ้านของเมืองฝ่อซาน เพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ทางการมองเห็นและการได้ยินให้มากยิ่งขึ้น รวมทั้งเพิ่มเติมประสบการณ์ใหม่ที่เกิดจากการสัมผัสให้กับผู้ชม และการแบ่งปันประสบการณ์ที่เป็นประโยชน์ในการสืบทอดและพัฒนาวัฒนธรรมดั้งเดิมเพื่อการสื่อสารแลกเปลี่ยนวัฒนธรรมระหว่างประเทศ

8. เอกสารอ้างอิง

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Luo, S. J. and et al. 2023. "Research on the digital development and communication strategies of translating cultural genes through innovative design," *Journal of Zhejiang University (Humanities and Social Sciences)*, 53(1): pp. 5-18. [Online]. Available:

- https://doi.org/10.3785/j.issn_1008-942X.CN2022-0317
- [2] Tang, X. Y. and et al. 2023. "Research on the sustainable design and communication of Lion Dance culture IP from the perspective of digital twin," *Packaging Engineering*, 44(14): pp. 436-449. [Online]. Available: https://doi.org/10.19554/j.cnki_1001-3563.2023.14.050
- [3] Petrelli, D. and et al. 2013. "Integrating material and digital," *Interactions*, 20(4): pp. 58-63. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2482841.2482855>
- [4] Giannini, T. and Bowen, J. P. 2022. "Museums and digital culture: From reality to digitality in the age of COVID-19," *Heritage*, 5(1): pp. 192-214. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/_heritage5010010
- [5] Lumsden, C. J. and Wilson, E. O. 1981. *Genes, Mind, and Culture: The Coevolutionary Process*. Cambridge, MA: Harvard University Press. [Online]. Available: https://doi.org/10.1142/_9789812563384
- [6] Winn, B. M. 2009. "The design, play, and experience framework," in *Handbook of Research on Effective Electronic Gaming in Education*. Hershey, PA: IGI Global, pp. 1010-1024. [Online]. Available: https://doi.org/10.4018/_978-1-59904-808-6.ch058
- [7] Fullerton, T. 2014. *Game Design Workshop: A Playcentric Approach to Creating Innovative Games*, 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 55-125. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/b16723>
- [8] Jiang, M. Z. 2011. "The origin and cultural connotation of 'Awakening the Lion' in Foshan," *Cultural Heritage*, (4): pp. 152-156. (in Chinese). [Online]. Available: https://en.cnki.com.cn/_Article_en/CJFDTotal-WHYC201104018.htm
- [9] Xie, Z. Y. 2021. "From 'dance' to 'drama': The dramatic and innovative development of Lion Awakening," *Cultural Heritage*, (1): pp. 109-117. (in Chinese). [Online]. Available: https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-WHYC202101014.htm
- [10] Cunha, M. L. C. 2010. "Redes sociais dirigidas ao contexto das coisas," Ph.D. dissertation, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, Brazil. [Online]. Available: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/16781/16781.PDF>
- [11] Adamo, M. and et al. 2010. "Parallel, independent attentional control settings for colors and shapes," *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72(7): pp. 1730-1735. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3758/APP.72.7.1730>
- [12] Cardozo, T. and Papadopoulos, C. 2021. "Heritage artefacts in the COVID-19 era: The aura and authenticity of 3D models," *Open Archaeology*, 7(1): pp. 519-539. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1515/opar-2020-0145>

- [13] Ridderinkhof, K. R. 2014. "Neurocognitive mechanisms of perception-action coordination: A review and theoretical integration," *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 46(1): pp. 3-29. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.06.008>
- [14] Svensson, P. 2009. "Humanities computing as digital humanities," *Digital Humanities Quarterly*, 3(3). [Online]. Available: <http://www.digitalhumanities.org/dhq/vol/3/3/000065/000065.html>

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของคันทางเสริมแรงด้วยจีโอเทกซ์ไทล์บนชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนัง ที่ปรับปรุงโดยขานทางบนเสาเข็ม

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF GEOTEXTILE-REINFORCED EMBANKMENT ON PAK PANANG SOFT CLAY STABILIZED BY BERM ON PILES

วีระศักดิ์ ชำนิธุระการ^{1*}, ภาณุ พร้อมพุทธานุกร²

Weerasak Shamniturakan^{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: weerasak.sh@gmail.com

วันที่รับบทความ: 7 มีนาคม 2569; วันที่ทบทวนบทความ: 2 เมษายน 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 4 เมษายน 2569;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 29 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของคันทางเสริมแรงด้วยจีโอเทกซ์ไทล์บนชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนังที่ปรับปรุงโดยขานทางบนเสาเข็มนี้มีเป้าหมายเพื่อป้องกันและแก้ไขความเสียหายของถนนในอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางเสริมแรงด้วยจีโอเทกซ์ไทล์บนชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนังที่ปรับปรุงด้วยขานทางบนเสาเข็ม เพื่อป้องกันและแก้ไขความเสียหายของถนนในอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D ในการจำลองพฤติกรรมของคันทางที่มีความกว้าง 9 เมตร และระดับความสูง 1, 2 และ 3 เมตร บนชั้นดินที่ประกอบด้วยชั้นดินผิว ดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็ง การศึกษาได้เปรียบเทียบรูปแบบการเสริมแรง 5 กรณี ได้แก่ คันทางที่ไม่มีการเสริมแรง การเสริมแรงด้วยจีโอเทกซ์ไทล์ การเสริมแรงด้วยขานทาง การเสริมแรงด้วยเสาเข็ม และการเสริมแรงด้วยขานทางร่วมกับเสาเข็ม ผลการวิเคราะห์พบว่าความสูงของคันทางมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบ กล่าวคือเมื่อคันทางมีความสูงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าปัจจัยความปลอดภัยลดลง ในขณะที่การเคลื่อนตัวและค่าความคั่นในชั้นดินเหนียวอ่อนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น การเสริมแรงด้วยเสาเข็มมีประสิทธิภาพในการถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินแข็งด้านล่างซึ่งช่วยลดการทรุดตัวได้ดี ขณะที่การเสริมแรงด้วยขานทางช่วยเพิ่มแรงต้านทานด้านข้าง รูปแบบการเสริมแรงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนังคือการใช้ขานทางร่วมกับเสาเข็ม เนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัยและสามารถควบคุมการเคลื่อนตัวของคันทางได้ดีที่สุดในทุกระดับความสูง

คำสำคัญ: ดินเหนียวอ่อน, ไฟไนต์เอลิเมนต์, เสถียรภาพ, การเสริมแรงคันทาง

Abstract: This study investigates the stability of geotextile-reinforced embankments constructed on Pak Panang soft clay and improved with berms on piles, aiming to prevent and mitigate road damage in Pak Panang District, Nakhon Si Thammarat Province, Thailand. The analysis was conducted using the finite element method implemented in PLAXIS 2D to simulate the behavior of embankments with a width of 9 m and heights of 1, 2, and 3 m. The subsoil profile consisted of topsoil, soft clay, and stiff clay layers. Five reinforcement scenarios were examined, including unreinforced embankments, geotextile reinforcement, berm reinforcement, pile reinforcement, and a combination of berm and pile reinforcement. The results indicate that embankment height significantly influences system stability. As the embankment height increases, the factor of safety decreases, while displacement and stress within the soft clay layer tend to increase. Pile reinforcement effectively transfers loads to the underlying stiff clay layer, thereby reducing settlement, whereas berm reinforcement enhances lateral resistance. Among the considered alternatives, the combined berm and pile system provides the most effective improvement, yielding the highest factor of safety and the best control of embankment deformation across all height conditions.

Keywords: Soft clay, Finite element method, Stability, Embankment reinforcement

1. บทนำ

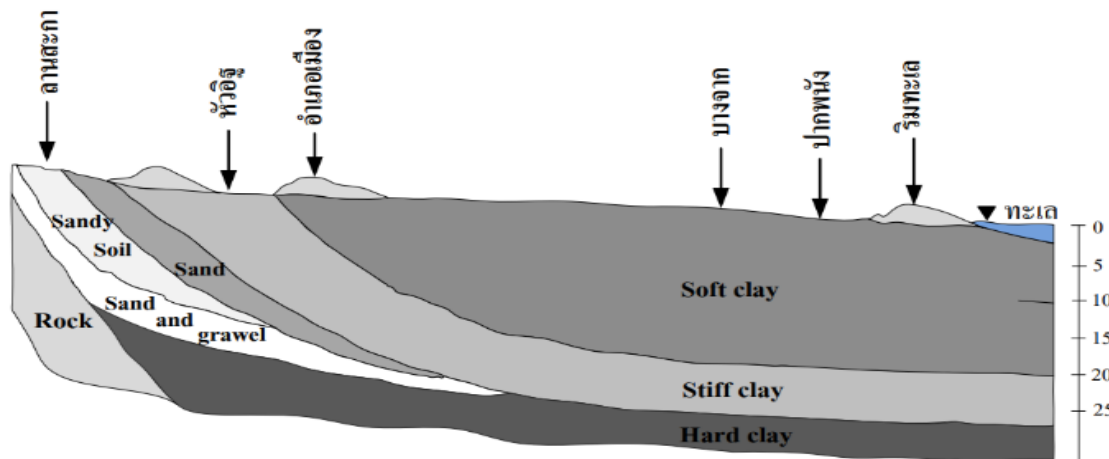
การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านระบบคมนาคม โดยเฉพาะ โครงสร้างถนนและคันทาง มีบทบาทสำคัญต่อการขับเคลื่อน เศรษฐกิจ การเชื่อมโยงพื้นที่ และการยกระดับคุณภาพชีวิต ของประชาชน อย่างไรก็ตาม การก่อสร้างคันทางในพื้นที่ที่มี ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ยังคงเป็นปัญหาสำคัญในการ ก่อสร้าง เนื่องจากดินเหนียวอ่อนมีค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำ ค่า การซึมผ่านต่ำ และมีแนวโน้มเกิดการทรุดตัวจากกระบวนการ อัดตัวคายน้ำในระยะยาว ซึ่งอาจนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพ การเคลื่อนตัวเกินเกณฑ์ และการวิบัติของโครงสร้างถนนได้ [1], [2], [3] จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าการก่อสร้างคันทาง บนชั้นดินเหนียวอ่อนมักประสบปัญหาการเคลื่อนตัวของลาดคัน ทาง (Slope failure) การทรุดตัว ไม่สม่ำเสมอ และการแตกร้าว ของ ผิวทาง โดยเฉพาะในกรณี ที่คันทางมีความสูงมากหรือ ก่อสร้างภายใต้ข้อจำกัดด้านเวลา ซึ่งไม่เอื้อต่อการรอให้ดินเกิด การอัดตัวอย่างสมบูรณ์ [4], [5], [6] ปัญหาดังกล่าวส่งผล โดยตรงต่อความปลอดภัยของผู้ใช้ทางและค่าใช้จ่ายในการ บำรุงรักษาในระยะยาว

พื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นตัวอย่าง พื้นที่ชายฝั่งที่มีสภาพธรณีวิทยาซับซ้อน เกิดจากการสะสมตัว ของตะกอนจากแม่น้ำและทะเล ส่งผลให้ชั้นดินประกอบด้วย ดินกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว โดยเฉพาะชั้นดิน

เหนียวอ่อนที่มีความหนาประมาณ 15 –20 เมตร ซึ่งจัดอยู่ใน กลุ่มดินเหนียวอ่อนที่มีพลาสติกสูง (High Plasticity clay: CH) ลักษณะดังกล่าวทำให้โครงสร้างถนนและคันทางในพื้นที่มี ความเสี่ยงต่อการทรุดตัวและการวิบัติด้านเสถียรภาพ ดังที่มี รายงานความเสียหายของโครงสร้างทางเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องใน อดีต [7], [8], [9] แนวทางการปรับปรุงเสถียรภาพของคันทาง บนชั้นดินเหนียวอ่อนมีการศึกษาและประยุกต์ใช้วิธี เช่น การ เสริมแรงด้วยวัสดุสังเคราะห์ (Geosynthetics) การก่อสร้างคัน ทาง (Berm) การใช้เสาเข็ม (Pile) รวมถึงการใช้วิธีการเสริมแรง แบบผสมผสาน เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน ลดการเคลื่อนตัว และควบคุมกลไกการวิบัติของคันทาง [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19] อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของ แต่ละวิธีขึ้นอยู่กับสภาพดิน ความสูงของคันทาง กลไกการถ่าย แรง และข้อจำกัดด้านการก่อสร้างในพื้นที่จริง ปัจจุบันการ วิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ในการศึกษา พฤติกรรมของดินและโครงสร้างร่วมกัน เนื่องจากสามารถ จำลองลำดับขั้นตอนการก่อสร้าง การกระจายความเค้น และ การเคลื่อนตัวได้อย่างใกล้เคียงสภาพจริง [20], [21], [22] โปรแกรม PLAXIS 2D เป็นหนึ่งในเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้ในการ ประเมินเสถียรภาพคันทางบนชั้นดินอ่อนอย่างแพร่หลาย

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์พฤติกรรมและเสถียรภาพของคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนในพื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปแบบการเสริมแรงที่แตกต่างกัน ได้แก่ คันทางที่ไม่มีการเสริมแรง การเสริมแรงด้วยจีโอเทกซ์ไทล์การเสริมช่องทาง การใช้เสาเข็ม

และการเสริมแรงด้วยช่องทางร่วมกับเสาเข็ม ผลการศึกษาที่ได้จะช่วยเติมเต็มองค์ความรู้ด้านการออกแบบคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน และสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกวิธีการเสริมเสถียรภาพที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่จริง ลดความเสี่ยงต่อการวิบัติของโครงสร้างถนน และสนับสนุนการออกแบบทางวิศวกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ และยั่งยืน



ภาพที่ 1 ชั้นดินบริเวณชายฝั่งตะวันออก จ.นครศรีธรรมราช
ที่มา: อภิชัย จุฑาศิริวงศ์ (2546)



ภาพที่ 2 ความเสียหายของโครงสร้างทางในพื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช

ที่มา: ถ่ายภาพโดยผู้วิจัย (2569)

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อป้องกันและแก้ไขความเสียหายเสียหายของถนน อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งมีวัตถุประสงค์ 4 ข้อ ประกอบด้วย

2.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

2.2 ศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนรูปแบบต่าง ๆ

2.3 ศึกษารูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนัง

2.4 วิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางโดยประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

3. ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ ได้กำหนด ขอบเขตงานวิจัย เป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย

3.1 รวบรวมข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring Log) ในพื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราชผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินในพื้นที่อำเภอ

ปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช จากสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครศรีธรรมราชและกรมทางหลวงชนบท เพื่อนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ทั้งในส่วนของดินฐานรากและวัสดุคันทาง ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้นำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการจำลองและวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางในรูปแบบต่าง ๆ ต่อไป

3.2 ออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของคันทางก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน
ปากพนัง ผู้วิจัยได้ออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมของคันทางก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม PLAXIS program ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางธรณีเทคนิคด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) และกำหนดให้มีการปรับปรุงเสถียรภาพของคันทาง โดยวิธีการคือ (1) เสริมแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) (2) เสริมแรงด้วยขานทาง (Berm) (3) เสริมแรงด้วยเสาเข็ม (Pile) และ (4) เสริมแรงด้วยขานทางร่วมกับเสาเข็ม (Berm + Pile)

3.3 เสนอรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนัง ในการศึกษา ผู้วิจัยได้วิเคราะห์พฤติกรรมและเสถียรภาพของคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนในพื้นที่อำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการเสริมกำลังหลายรูปแบบ เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเพิ่มเสถียรภาพของคันทางผลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่จริง ช่วยลดความเสี่ยงจากการพังทลาย และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

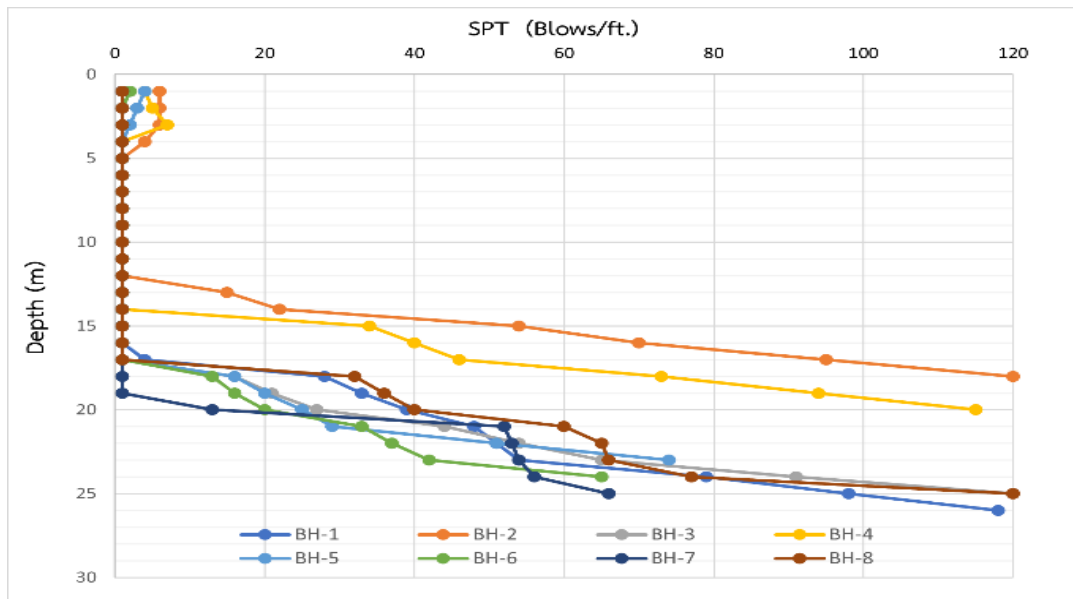
4. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้วิเคราะห์พฤติกรรมและเสถียรภาพของคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมของดินและโครงสร้างร่วมกันภายใต้สภาพภาระและขอบเขตที่ซับซ้อน

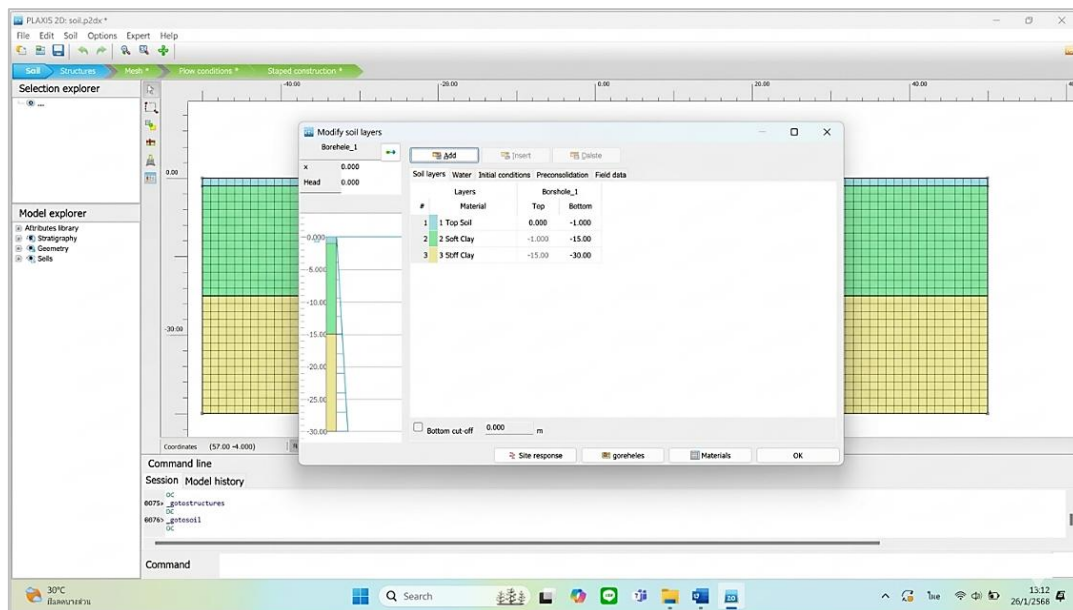
ได้อย่างมีประสิทธิภาพการจัดทำแบบจำลองอาศัยข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดิน จากการเจาะสำรวจดินในพื้นที่อำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อนำมากำหนดลักษณะชั้นดินและพารามิเตอร์ทางวิศวกรรมให้สอดคล้องกับสภาพพื้นที่จริง การวิเคราะห์ดำเนินการโดยกำหนดขั้นตอนการก่อสร้างตามลำดับจริง เพื่อประเมินการกระจายความเค้น การเปลี่ยนรูป และเสถียรภาพของคันทางภายใต้รูปแบบการเสริมแรงที่แตกต่างกัน

ทั้งนี้ ได้มีการกำหนดสมมติฐาน ขอบเขต และข้อจำกัดของแบบจำลองไว้อย่างชัดเจน เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแนวทางการเสริมแรงคันทางได้อย่างเหมาะสม รายละเอียดแสดงในหัวข้อย่อยต่อไปนี้

4.1 พื้นที่ศึกษาและลักษณะชั้นดิน ข้อมูลการเจาะสำรวจดินถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการกำหนดลักษณะชั้นดินและคุณสมบัติทางวิศวกรรมสำหรับการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางในพื้นที่ศึกษา ข้อมูลดังกล่าวได้จากสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครศรีธรรมราช [23] และข้อมูลการเจาะสำรวจในพื้นที่อำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช จากกรมทางหลวงชนบท ผลการเจาะสำรวจพบว่า ชั้นดินบริเวณผิวดินจนถึงระดับความลึกประมาณ 15.00 เมตร เป็นดินเหนียวอ่อน ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมไม่เหมาะสมต่อการรับน้ำหนัก และเป็นชั้นดินหลักที่ควบคุมพฤติกรรมการทรุดตัวและเสถียรภาพของคันทาง ถัดลงไปในช่วงความลึกประมาณ 15.00 – 25.00 เมตร เป็นชั้นดินเหนียวแข็ง ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นดินรองรับที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักสูงกว่าลักษณะชั้นดินดังกล่าวถูกนำไปใช้ในการกำหนดโครงสร้างชั้นดินต้นแบบ (Soil stratigraphy) สำหรับการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบ่งชั้นดินตามความลึกและคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่สอดคล้องกับข้อมูลภาคสนาม เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความใกล้เคียงกับสภาพจริงของพื้นที่ศึกษา



ภาพที่ 3 ผลการเจาะสำรวจดินจากสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครศรีธรรมราช
ที่มา: วิเคราะห์และสร้างโดยผู้วิจัย (2569)



ภาพที่ 4 การกำหนดลักษณะชั้นดินในการวิเคราะห์
ที่มา: วิเคราะห์และสร้างโดยผู้วิจัย (2569)

4.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญดังต่อไปนี้

4.2.1 การกำหนดรูปแบบเรขาคณิตของแบบจำลอง โดยกำหนดรูปแบบและขนาดของคันทาง รวมถึงพื้นที่ดิน

โดยรอบให้มีความเหมาะสมและเพียงพอ เพื่อจำกัดผลกระทบจากขอบเขตของแบบจำลองต่อผลการวิเคราะห์

4.2.2 การกำหนดชั้นดินและคุณสมบัติทางวิศวกรรม โดยกำหนดชั้นดินตามข้อมูลการเจาะสำรวจดินในพื้นที่อำเภอปากพนัง โดยระบุชนิดของดิน ความลึกของแต่ละชั้น และคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่สำคัญ เช่น หน่วยน้ำหนัก

ค่ากำลังรับแรงเฉือน มอดูลัสยืดหยุ่น และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ทั้งนี้แบบจำลองพฤติกรรมดินเลือกใช้แบบจำลอง Mohr–Coulomb

4.2.3 การกำหนดระดับน้ำใต้ดิน โดยกำหนดตำแหน่งระดับน้ำใต้ดินในแบบจำลองตามข้อมูลพื้นที่จริง เพื่อพิจารณาผลกระทบของแรงดันน้ำในรูพรุนต่อเสถียรภาพของคันทาง

4.2.4 การกำหนดองค์ประกอบโครงสร้างเสริมแรง โดยจำลององค์ประกอบโครงสร้างเสริมแรง ได้แก่ แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ขานทาง (Berm) และเสาเข็ม (Pile) โดยกำหนดคุณสมบัติของวัสดุและตำแหน่งติดตั้งให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของแต่ละกรณีศึกษา

4.2.5 การสร้างตาข่ายองค์ประกอบจำกัด (Mesh) ให้มีความละเอียดเหมาะสม โดยเพิ่มความละเอียดในบริเวณที่คาดว่าจะเกิดการเปลี่ยนรูปหรือความเค้นสูง เพื่อเพิ่มความแม่นยำของผลการวิเคราะห์

4.2.6 การวิเคราะห์และการประเมินผล โดยจำลองลำดับขั้นตอนการก่อสร้างของคันทางและทำการคำนวณเพื่อประเมินค่าการเปลี่ยนรูป การกระจายความเค้น และค่าปัจจัยความปลอดภัย โดยใช้วิธีลดค่ากำลังรับแรงเฉือน (ϕ -c reduction method)

4.3 ข้อสมมติฐานและข้อจำกัดของแบบจำลอง การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้อาศัยข้อสมมติฐานบางประการ ได้แก่ การสมมติให้คุณสมบัติของดินในแต่ละชั้นมีความสม่ำเสมอ และการใช้แบบจำลองพฤติกรรมดินแบบ Mohr–Coulomb ซึ่งอาจไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา เช่น การคืบตัวและการทรุดตัวในระยะยาวได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ การวิเคราะห์มุ่งเน้นเสถียรภาพในระยะสั้นภายใต้สภาพการก่อสร้าง โดยไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากการอัดตัวคายน้ำในระยะยาว

ตารางที่ 1 แสดงตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์

Parameter	Name	Topsoil	Soft Clay	Stiff Clay	Unit
Material Model	Model	M-C	M-C	M-C	-
Type of Behavior	Type	Undrained	Undrained	Undrained	-
Dry Soil Unit Weight	γ_{dry}	16	14	17	kN/m ³
Wet Soil Unit Weight	γ_{wet}	18	16	19	kN/m ³

อย่างไรก็ตาม วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ยังคงมีความเหมาะสมในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปแบบการเสริมแรงคันทางที่แตกต่างกัน และสามารถสะท้อนแนวโน้มพฤติกรรมเชิงกลของคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนได้อย่างชัดเจน

4.4 รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวัสดุให้สอดคล้องกับพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ งานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของดินจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม การทดสอบในห้องปฏิบัติการ และเอกสารอ้างอิง ที่เกี่ยวข้องกับดินในพื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช แบบจำลองดินประกอบด้วยดิน 3 ประเภท ได้แก่ ชั้นดินผิว (Topsoil) ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) และชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) โดยใช้แบบจำลองวัสดุ Mohr – coulomb และกำหนดพฤติกรรมดินภายใต้สภาวะไม่ระบายน้ำ (Undrained condition) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วยค่าหน่วยน้ำหนักดิน มอดูลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง ค่าความเหนียว มุมเสียดทานภายใน และค่าการซึมผ่านในแนวนอนและแนวตั้ง ซึ่งมีความแตกต่างกันตามลักษณะและความแข็งแรงของแต่ละชั้นดิน การเลือกใช้พฤติกรรมดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition) สอดคล้องกับสภาพการก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในระยะเวลาสั้นเมื่อเทียบกับอัตราการระบายน้ำของดิน ส่งผลให้แรงดันน้ำในดินส่วนเกินไม่สามารถระบายออกได้ทัน การกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจึงสามารถสะท้อนพฤติกรรมของดินในช่วงการก่อสร้างได้อย่างเหมาะสม และถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์เสถียรภาพและพฤติกรรมเคลื่อนตัวของคันทาง แสดงในตารางที่ 1

Parameter	Name	Topsoil	Soft Clay	Stiff Clay	Unit
Young's Modulus	E	7000	1800	27000	kN/m ²
Poisson's Ratio	ν	0.25	0.3	0.3	-
Cohesion	c	35	12	90	kN/m ²
Friction Angle	ϕ	0	0	0	°
Dilatancy Angle	ψ	0	0	0	°
Horizontal Permeability	Kx	0.0008	0.0008	0.0008	m/day
Vertical Permeability	Ky	0.0008	0.0008	0.0008	m/day

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งประกอบด้วยดิน 3 ประเภท ได้แก่ ชั้นดินผิว (Topsoil) ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) และชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) โดยแบบจำลองพฤติกรรมดินที่ใช้คือ Mohr – Coulomb ภายใต้สภาวะไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition) พารามิเตอร์ที่กำหนดประกอบด้วยค่าหน่วยน้ำหนักดินแห้งและดินเปียก มอดุลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง ค่าความเหนียวมุมเสียดทานภายใน และค่าการซึมผ่านในแนวนอนและแนวตั้ง ซึ่งมีความแตกต่างกันตามลักษณะและความแข็งแรงของแต่ละชั้นดิน พารามิเตอร์ดังกล่าวถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทาง

การเลือกใช้พฤติกรรมดินแบบไม่ระบายน้ำ เนื่องจากการก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นกระบวนการระยะสั้นเมื่อเทียบกับอัตราการระบายน้ำของดินที่มีค่าการซึมผ่านต่ำ ทำให้แรงดันน้ำในดินส่วนเกินไม่สามารถระบายออกได้อย่างสมบูรณ์ การวิเคราะห์ภายใต้สภาวะดังกล่าวจึงสามารถสะท้อนพฤติกรรมของดินและสภาพการทำงานของคันทางในช่วงการก่อสร้างได้อย่างเหมาะสม

5. ผลการวิจัย

ผลการเจาะสำรวจดินถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดลักษณะของชั้นดินต้นแบบสำหรับการจำลองและวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางในรูปแบบต่าง ๆ โดยกำหนดลักษณะชั้นดินดังนี้ คือ ชั้น Topsoil ที่ระดับความลึก 0.00 – 1.00 เมตร ชั้น Soft Clay ที่ระดับความลึก 1.00 – 15.00 เมตร

และชั้น Stiff Clay ที่ระดับความลึก 15.00 – 30.00 เมตร ซึ่งการจำลองแต่ละกรณีจะใช้พารามิเตอร์คุณสมบัติดินและสภาพโหลดที่เหมือนกันทุกประการ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัย (Factor of Safety: F.S.) ได้อย่างถูกต้อง ตามรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงการออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมของคันทางที่มีการปรับปรุงเสถียรภาพโดยวิธีการต่าง ๆ

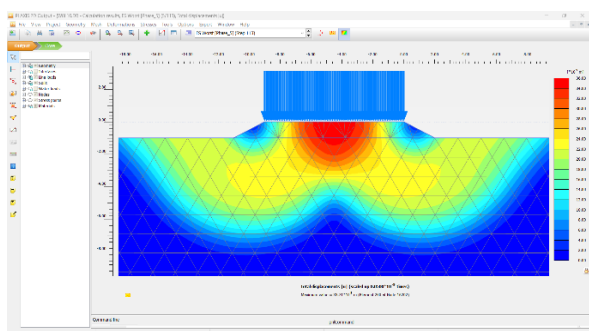
ชื่อการศึกษา / รหัส	การออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	กรณีศึกษาในแต่ละรูปแบบ
NR-9-1	การวิเคราะห์เสถียรภาพคันทาง โดยที่ไม่มีการเสริมแรง	คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 1 เมตร
NR-9-2	เสริมแรง	คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 2 เมตร
NR-9-3		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 3 เมตร
GT-9-1	การวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางด้วยวิธีการเสริมแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ Geotextile	คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 1 เมตร เสริมแรงด้วย Geotextile 150 kN/m
GT-9-2		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 2 เมตร เสริมแรงด้วย Geotextile

ชื่อ กรณีศึกษา / รหัส	การออกแบบและวิเคราะห์ พฤติกรรม โดยใช้วิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์	กรณีศึกษาในแต่ละ รูปแบบ
GT-9-3		150 kN/m คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 3 เมตร เสริมแรงด้วย Geotextile 150 kN/m
BM-9-1	การวิเคราะห์เสถียรภาพ คันทาง ด้วยวิธีการเสริมแรง ด้วยขานทาง Berm	คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 1 เมตร เสริมด้วยขานทาง กว้าง 4 เมตร สูง 0.5 เมตร
BM-9-2		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 2 เมตร เสริมด้วยขานทาง กว้าง 4 เมตร สูง 1.0 เมตร
BM-9-3		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 3 เมตร เสริมด้วยขานทาง กว้าง 4 เมตร สูง 1.5 เมตร
PL-9-1	การวิเคราะห์เสถียรภาพ คันทาง ด้วยวิธีการเสริมแรง ด้วยเสาเข็ม Pile	คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 1 เมตร เสริมด้วยเสาเข็ม ขนาด 0.22 x 0.22 x 16.0 เมตร
PL-9-2		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 2 เมตร เสริมด้วยเสาเข็ม ขนาด 0.22 x 0.22 x 16.0 เมตร
PL-9-3		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 3 เมตร เสริมด้วยเสาเข็ม ขนาด 0.22 x 0.22 x 16.0 เมตร

ชื่อ กรณีศึกษา / รหัส	การออกแบบและวิเคราะห์ พฤติกรรม โดยใช้วิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์	กรณีศึกษาในแต่ละ รูปแบบ
GPL-9-1	การวิเคราะห์เสถียรภาพ คันทาง ด้วยวิธีการเสริมแรง ด้วยขานทางและเสาเข็ม Berm + Pile	คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 1 เมตร เสริมด้วยขานทาง กว้าง 4 เมตร สูง 0.5 เมตร และเสาเข็ม ขนาด 0.22 x 0.22 x 16.0 เมตร
GPL-9-2		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 2 เมตร เสริมด้วยขานทาง กว้าง 4 เมตร สูง 1.0 เมตร และเสาเข็ม ขนาด 0.22 x 0.22 x 16.0 เมตร
GPL-9-3		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 3 เมตร เสริมด้วยขานทาง กว้าง 4 เมตร สูง 1.5 เมตร และเสาเข็ม ขนาด 0.22 x 0.22 x 16.0 เมตร

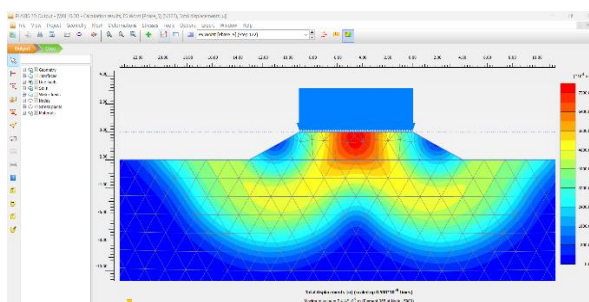
การวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางได้ดำเนินการภายใต้เงื่อนไขการศึกษาเชิงเปรียบเทียบ จำนวน 3 กรณี เพื่อประเมินผลกระทบของความสูงคันทางต่อเสถียรภาพโครงสร้าง โดยกำหนดให้ความกว้างคันทางคงที่ที่ 9.00 เมตร และปรับเปลี่ยนความสูงคันทางเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 1.00 เมตร, 2.00 เมตร และ 3.00 เมตร รายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่ไม่มีการเสริมแรง การดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางในกรณีที่ไม่มีเสริมกำลัง ได้ดำเนินการโดยการจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัยของคันทางภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ จำนวน 3 กรณี ดังแสดงในภาพที่ 5 ถึง ภาพที่ 7



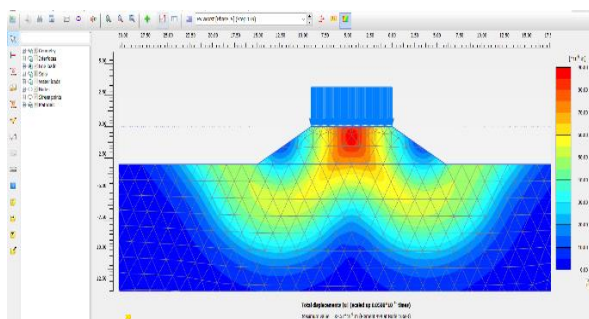
ภาพที่ 5 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี NR-9-1
ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากผลการวิเคราะห์กรณี NR-9-1 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 1.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 2.312



ภาพที่ 6 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี NR-9-2
ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

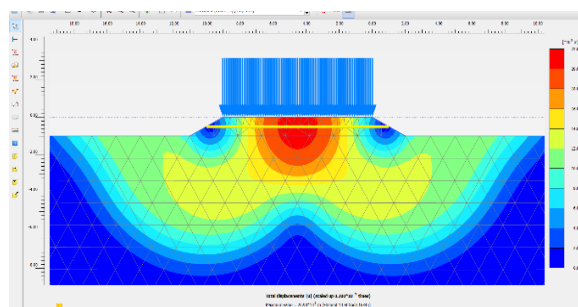
จากผลการวิเคราะห์กรณี NR-9-2 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 2.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.476



ภาพที่ 7 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี NR-9-3

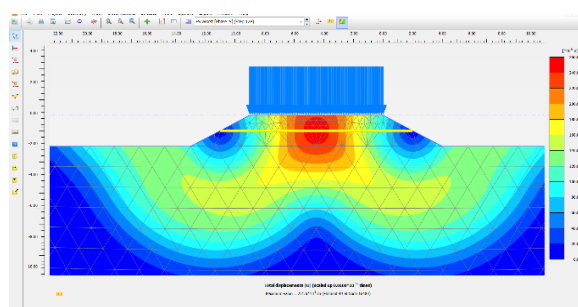
จากผลการวิเคราะห์กรณี NR-9-3 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 3.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.110

5.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่เสริมแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile 150 kN/m) การดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่เสริมแรงด้วย Geotextile 150 kN/m ได้ดำเนินการโดยการจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัยของคันทางภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ จำนวน 3 กรณี ดังแสดงในภาพที่ 8 ถึงภาพที่ 10



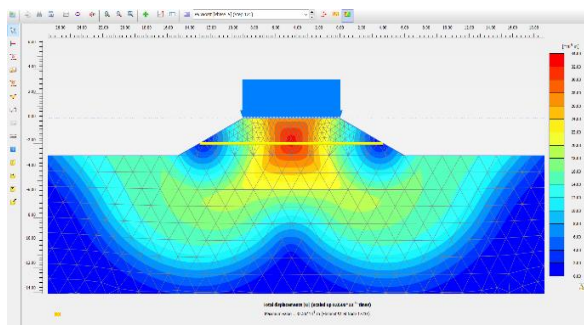
ภาพที่ 8 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี GT-9-1

จากผลการวิเคราะห์กรณี GT-9-1 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 1.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 2.345



ภาพที่ 9 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี GT-9-2

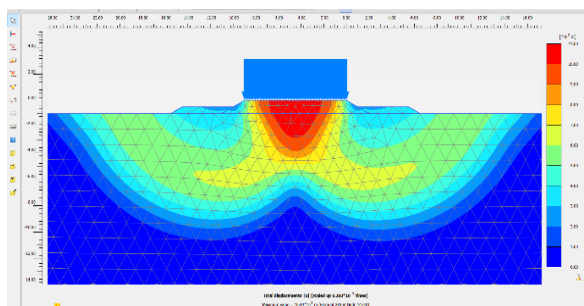
จากผลการวิเคราะห์กรณี GT-9-2 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 2.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.490



ภาพที่ 10 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี GT-9-3

จากผลการวิเคราะห์กรณี GT-9-3 ค้นทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 3.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.159

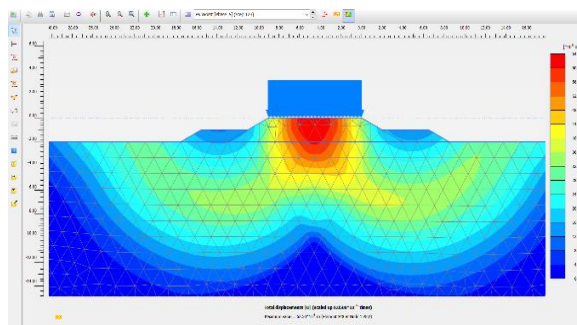
5.3 วิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่เสริมแรงด้วยขานทาง (Berm) การดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่เสริมแรงด้วยขานทาง ได้ดำเนินการโดยการจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัยของคันทางภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ จำนวน 3 กรณี ดังแสดงในภาพที่ 11 ถึงภาพที่ 13



ภาพที่ 11 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี BM-9-1

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

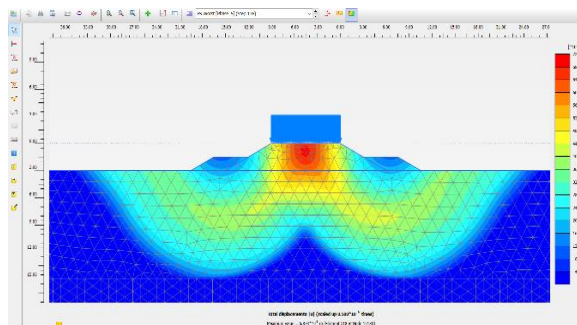
จากผลการวิเคราะห์กรณี BM-9-1 ค้นทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 1.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 2.582



ภาพที่ 12 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี BM-9-2

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากผลการวิเคราะห์กรณี BM-9-2 ค้นทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 2.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.637

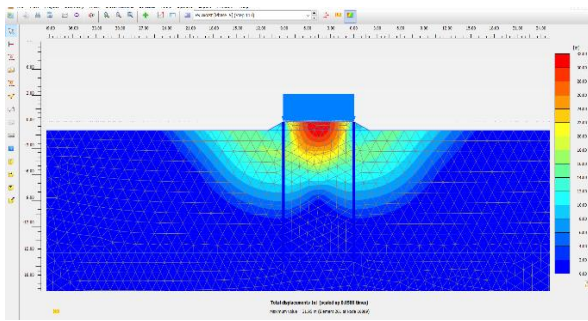


ภาพที่ 13 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี BM-9-3

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากผลการวิเคราะห์กรณี BM-9-3 ค้นทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 3.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.210

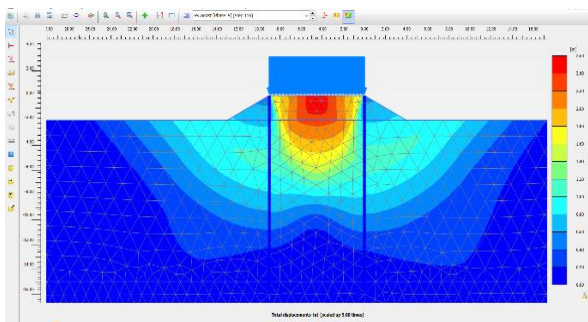
5.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่เสริมแรงด้วยเสาเข็ม (Pile) การดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่เสริมแรงด้วยเสาเข็ม ได้ดำเนินการโดยการจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัยของคันทางภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ จำนวน 3 กรณี ดังแสดงในภาพที่ 14 ถึงภาพที่ 16



ภาพที่ 14 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี PL-9-1

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

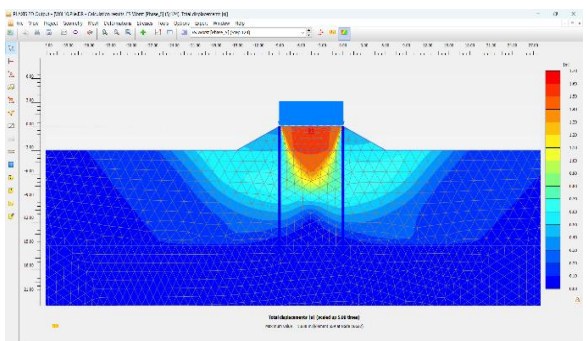
จากผลการวิเคราะห์กรณี PL-9-1 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 1.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 2.593



ภาพที่ 15 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี PL-9-2

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากผลการวิเคราะห์กรณี PL-9-2 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 2.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.720

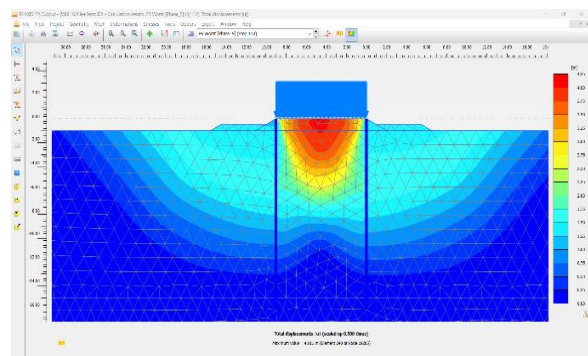


ภาพที่ 16 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี PL-9-3

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากผลการวิเคราะห์กรณี PL-9-3 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 3.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.374

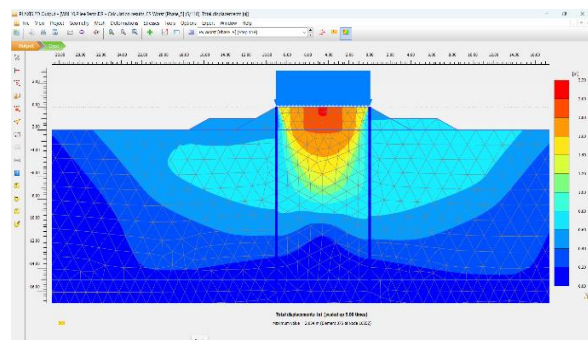
5.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่เสริมแรงด้วยขานทางและเสาเข็ม (Berm + Pile) การดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่เสริมแรงด้วยขานทางและเสาเข็ม ได้ดำเนินการโดยการจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัยของคันทางภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ จำนวน 3 กรณี ดังแสดงในภาพที่ 17 ถึงภาพที่ 19



ภาพที่ 17 วิเคราะห์เสถียรภาพ GPL-9-1

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

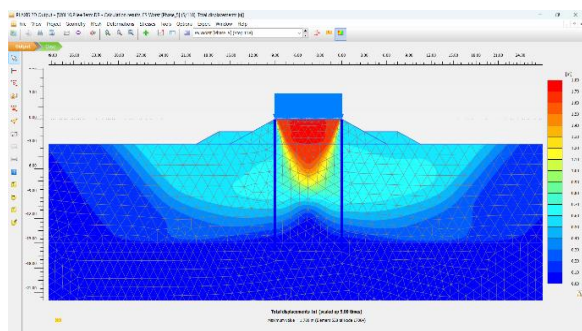
จากผลการวิเคราะห์กรณี GPL-9-1 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 1.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 2.787



ภาพที่ 18 วิเคราะห์เสถียรภาพ GPL-9-2

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากผลการวิเคราะห์กรณี GPL-9-2 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 2.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.863



ภาพที่ 19 วิเคราะห์เสถียรภาพ GPL-9-3

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากผลการวิเคราะห์กรณี GPL-9-3 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 3.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.473

6. สรุปผลและอภิปรายผล

ผลการศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพและพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของคันทางที่ก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนในพื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D การวิเคราะห์พิจารณาคันทางที่มีความสูง 3 ระดับ ได้แก่ 1.00 เมตร, 2.00 เมตร และ 3.00 เมตร ภายใต้รูปแบบการเสริมแรงที่แตกต่างกันจำนวน 5 กรณี เพื่อเปรียบเทียบผลด้านปัจจัยความปลอดภัย (Factor of Safety) การกระจายความเค้น (Stress Distribution) และพฤติกรรมการเคลื่อนตัว (Displacement)

6.1 กรณีคันทางที่ไม่มีการเสริมแรง ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า คันทางที่ไม่มีการเสริมแรงมีค่าปัจจัยความปลอดภัยต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกกรณีศึกษา โดยเมื่อความสูงของคันทางเพิ่มขึ้น ค่าปัจจัยความปลอดภัยมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนและเข้าใกล้ค่าขีดจำกัดด้านเสถียรภาพ การกระจายความเค้นในชั้นดินเหนียวอ่อน พบว่า

มีความเค้นในแนวตั้งสูงบริเวณใต้ฐานคันทางและบริเวณ Toe Slope ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวและการเสียรูปของคันทางในระดับสูง สะท้อนให้เห็นถึงความเสี่ยงต่อการวิบัติด้านเสถียรภาพของคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนเมื่อไม่มีมาตรการเสริมแรง

6.2 กรณีคันทางที่เสริมแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) การเสริมแรงด้วยจีโอเท็กซ์ไทล์ช่วยเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัยของคันทางในทุกระดับความสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการเสริมแรง โดยกรณีที่เสริมแรงด้วยจีโอเท็กซ์ไทล์ทำหน้าที่ช่วยกระจายแรงและเพิ่มกำลังรับแรงดึงบริเวณฐานคันทาง ส่งผลให้แนวโน้มการเคลื่อนตัวลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อความสูงของคันทางเพิ่มขึ้น ยังคงพบการลดลงของค่าปัจจัยความปลอดภัยและการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าการเสริมแรงด้วยจีโอเท็กซ์ไทล์เพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพจำกัดสำหรับคันทางที่มีความสูงมากบนชั้นดินเหนียวอ่อน

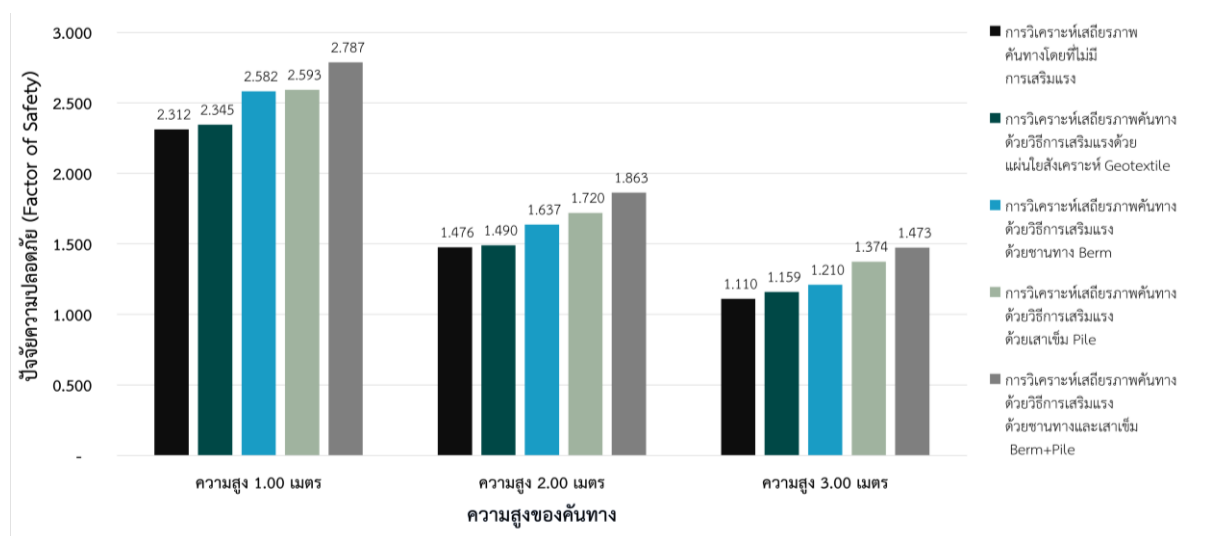
6.3 กรณีคันทางที่เสริมแรงด้วยขานทาง (Berm) ผลการวิเคราะห์พบว่า การเสริมแรงด้วยขานทางสามารถเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัยของคันทางได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการเสริมแรงและกรณีเสริมแรงด้วยจีโอเท็กซ์ไทล์ โดยเฉพาะในระดับความสูงของคันทางที่มากขึ้น ขานทางช่วยเพิ่มแรงต้านทานด้านข้างและลดความชันของแนววิบัติบริเวณ Toe Slope ส่งผลให้การกระจายความเค้นในชั้นดินเหนียวอ่อนมีความสม่ำเสมอมากขึ้น และการเคลื่อนตัวของคันทางลดลง อย่างไรก็ตาม การทรุดตัวในแนวตั้งยังคงเกิดขึ้นเนื่องจากการอัดตัวของดินเหนียวอ่อนภายใต้น้ำหนักคันทาง

6.4 กรณีคันทางที่เสริมแรงด้วยเสาเข็ม (Pile) การเสริมแรงด้วยเสาเข็มแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการเพิ่มเสถียรภาพของคันทางอย่างชัดเจน โดยค่าปัจจัยความปลอดภัยเพิ่มขึ้นในทุกระดับความสูงของคันทาง กลไกหลักเกิดจากการถ่ายน้ำหนักจากคันทางผ่านเสาเข็มลงสู่ชั้นดินแข็งด้านล่าง ส่งผลให้ค่าความเค้นและการเคลื่อนตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ การเคลื่อนตัวทั้งในแนวตั้งและแนวราบของคันทางลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับ

กับกรณีอื่น อย่างไรก็ตาม ยังพบการสะสมความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างเสาเข็มและดินโดยรอบ

6.5 กรณีคันทางที่เสริมแรงด้วยขานทางร่วมกับเสาเข็ม (Berm + Pile) ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า การเสริมแรงด้วยขานทางร่วมกับเสาเข็มให้ประสิทธิภาพสูงสุดในทุกกรณีศึกษา โดยมีค่าปัจจัยความปลอดภัยสูงที่สุดและมีการเคลื่อนตัวต่ำที่สุดในทุกระดับความสูงของคันทาง การผสมผสานดังกล่าวช่วยเสริมทั้งกลไกการถ่ายแรงในแนวตั้งผ่านเสาเข็มและแรงต้านทานด้านข้างจากขานทาง ส่งผลให้การกระจายความเค้นในชั้นดินมีความเหมาะสม ลดความเสี่ยงต่อการเกิดแนววิบัติ และควบคุมการเคลื่อนตัวของคันทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษานี้ยืนยันว่าการใช้ระบบเสริมแรงร่วมกันมีความเหมาะสมสำหรับการก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน โดยเฉพาะในกรณีคันทางที่มีความสูงมาก

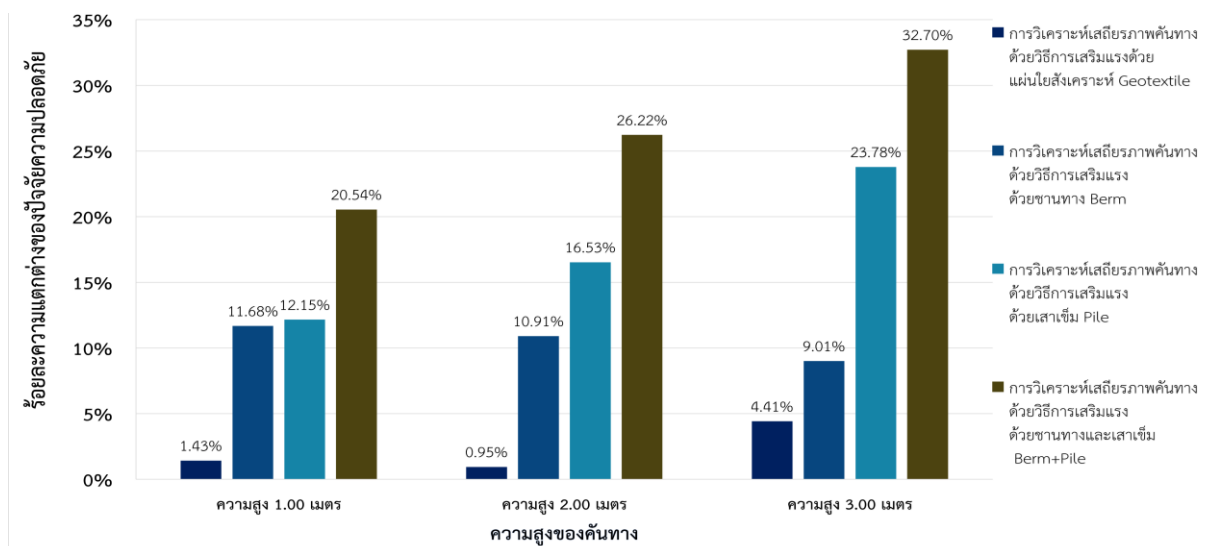
ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) ของคันทางภายใต้วิธีการเสริมแรงที่แตกต่างกัน พบว่ารูปแบบการเสริมแรงมีผลต่อเสถียรภาพของคันทางอย่างชัดเจน โดยกรณีคันทางที่ไม่มีการเสริมแรงให้ค่า F.S. ต่ำที่สุดในทุกระดับความสูงของคันทาง ขณะที่การเสริมแรงด้วยขานทางและเสาเข็มสามารถเพิ่มค่า F.S. ได้ในระดับที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ การเสริมแรงด้วยเสาเข็มให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการเสริมแรงด้วยขานทางเพียงอย่างเดียว เนื่องจากสามารถถ่ายน้ำหนักจากคันทางลงสู่ชั้นดินแข็งด้านล่างได้โดยตรง สำหรับกรณีการเสริมแรงแบบผสมผสานระหว่างขานทางและเสาเข็ม (Berm + Pile) พบว่าให้ค่า F.S. สูงที่สุดในทุกกรณีศึกษา และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า F.S. เมื่อเทียบกับกรณีไม่เสริมแรงมากที่สุด สะท้อนให้เห็นถึงความเหมาะสมของการใช้ระบบเสริมแรงร่วมกันในการเพิ่มเสถียรภาพของคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 การเปรียบเทียบปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) ของคันทางภายใต้วิธีการเสริมแรงที่แตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์ปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของการเสริมแรงแตกต่างกันตามระดับความสูงของคันทาง เพื่อให้การเปรียบเทียบชัดเจนยิ่งขึ้น ผู้วิจัย

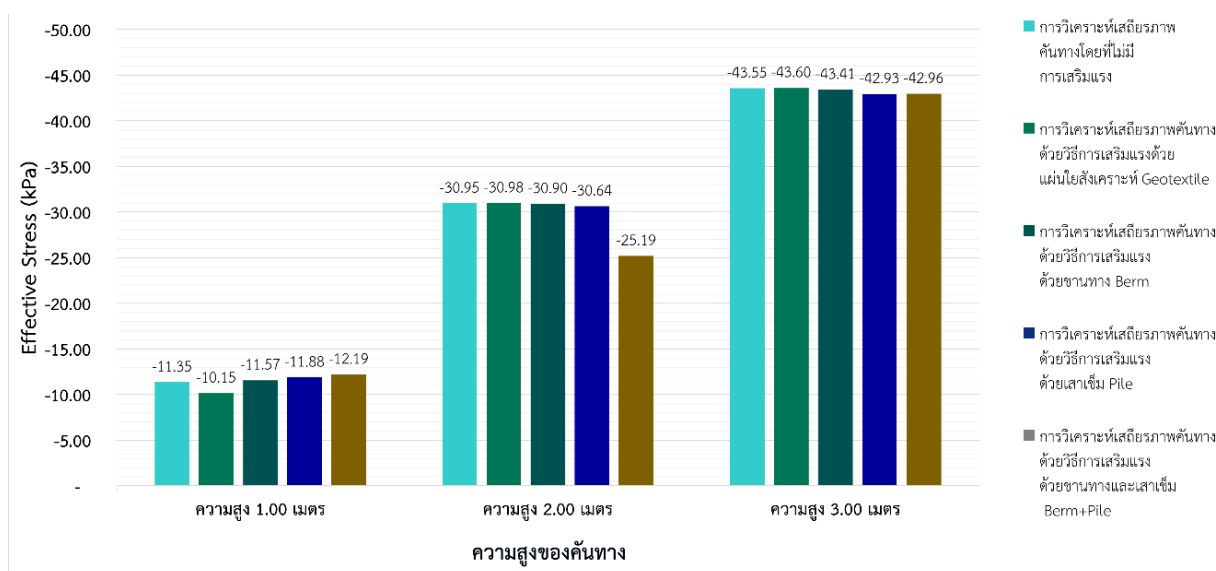
จึงนำเสนอร้อยละความแตกต่างของปัจจัยความปลอดภัย โดยอ้างอิงกรณีไม่เสริมแรงเป็นฐานดังแสดงภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบร้อยละความแตกต่างของปัจจัยความปลอดภัย เมื่อเทียบกับกรณีไม่เสริมแรง

ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าค่า Effective Vertical Stress มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความสูงของคันทางในทุกกรณีศึกษา เมื่อเปรียบเทียบวิธีการเสริมแรง พบว่าการเสริมแรงด้วยคันทางร่วมกับเสาเข็ม (Berm + Pile) ให้ค่าความเค้นต่ำกว่าวิธีอื่นอย่างชัดเจน สะท้อนถึงประสิทธิภาพ

ในการถ่ายและกระจายแรง รวมถึงการลดการสะสมความเค้นในบริเวณวิกฤตของคันทาง ในขณะที่กรณีไม่เสริมแรงและการเสริมแรงด้วยวิธีเดียวให้ค่าความเค้นสูงกว่า ซึ่งบ่งชี้ถึงความเสี่ยงต่อการเกิดการเคลื่อนตัวและการวิบัติที่มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 22



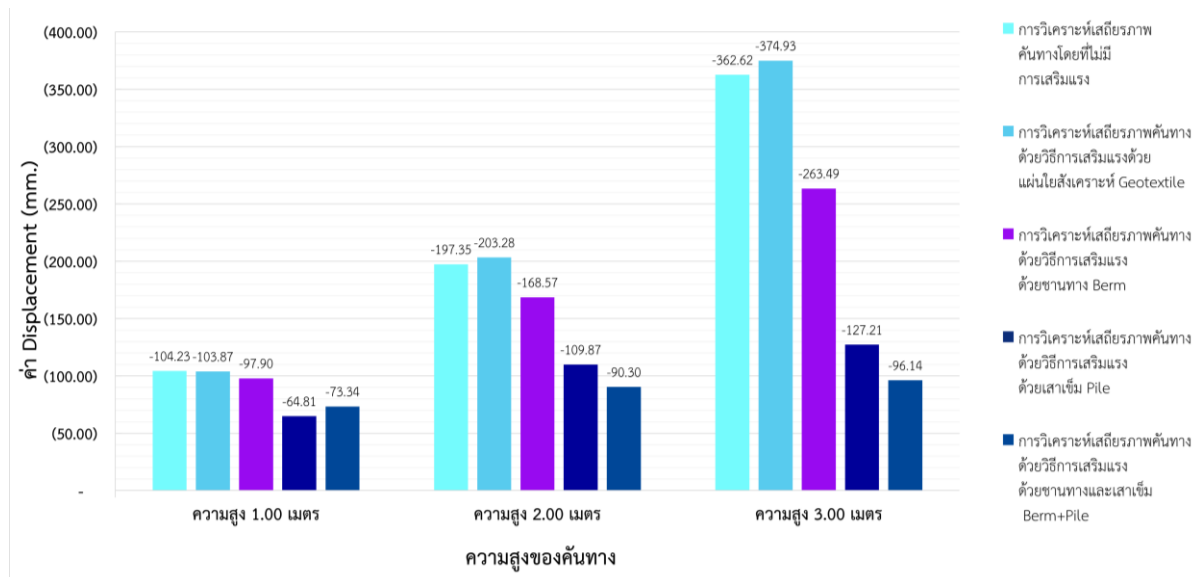
ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบค่าความเค้น (Effective Stress) ของคันทางภายใต้วิธีการเสริมแรงที่แตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวของคันทางแสดงให้เห็นว่า เมื่อความสูงของคันทางเพิ่มขึ้น ค่าการเคลื่อนตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกกรณีศึกษา สะท้อนถึงอิทธิพลของ

น้ำหนักบรรทุกต่อพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน โดยกรณีไม่เสริมแรงและการเสริมแรงด้วยจีโอเทกซ์ไทล์ให้ค่าการเคลื่อนตัวสูงที่สุด ขณะที่การ

เสริมแรงด้วยขานทางสามารถลดการเคลื่อนตัวได้บางส่วน สำหรับกรณีการเสริมแรงด้วยเสาเข็มและการเสริมแรงร่วมระหว่างขานทางและเสาเข็มให้ค่าการเคลื่อนตัวต่ำที่สุดใน

ทุกระดับความสูง โดยเฉพาะกรณี Berm + Pile ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพสูงสุดในการควบคุมการเคลื่อนตัวและเพิ่มเสถียรภาพของคันทาง ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัว Displacement (mm.) ของคันทางภายใต้วิธีการเสริมแรงที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าความเค้น (Stress) และการเคลื่อนตัว (Displacement) ของคันทางที่ตำแหน่งเดียวกัน ภายใต้วิธีการเสริมแรงที่แตกต่างกัน

กรณีวิเคราะห์		ค่า F.S. Displacement Stress		
			(mm.)	(kPa)
การวิเคราะห์	NR-9-1	2.312	-104.23	-11.35
เสถียรภาพ	NR-9-2	1.476	-197.35	-30.95
คันทางโดยที่ไม่มีการเสริมแรง	NR-9-3	1.110	-362.62	-43.55
การวิเคราะห์	GT-9-1	2.345	-103.87	-10.15
เสถียรภาพคัน	GT-9-2	1.490	-203.28	-30.98
ทางด้วยวิธีการ	GT-9-3	1.159	-374.93	-43.60
เสริมแรงด้วย	GPL-9-2	1.863	-90.30	-25.19
แผ่นใย	GPL-9-3	1.473	-96.14	-42.96
สังเคราะห์ Geotextile				

กรณีวิเคราะห์		ค่า F.S. Displacement Stress		
			(mm.)	(kPa)
การวิเคราะห์	BM-9-1	2.582	-97.90	-11.57
เสถียรภาพคัน	BM-9-2	1.637	-168.57	-30.90
ทางด้วยวิธีการ	BM-9-3	1.210	-263.49	-43.41
เสริมแรงด้วยขานทาง Berm				
การวิเคราะห์	PL-9-1	2.593	-64.81	-11.88
เสถียรภาพ	PL-9-2	1.720	-109.87	-30.64
คันทางด้วยวิธีการเสริมแรงด้วยเสาเข็ม Pile	PL-9-3	1.374	-127.21	-42.93
การวิเคราะห์	GPL-9-1	2.787	-73.34	-12.19
เสถียรภาพคันทางด้วยวิธีการเสริมแรงด้วยขานทางและเสาเข็ม Berm + Pile				

7. บทสรุป

การก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นปัญหาทางวิศวกรรมที่สำคัญ เนื่องจากดินมีค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำ มีการทรุดตัวสูง และมีความเสี่ยงต่อการวิบัติด้านเสถียรภาพ โดยเฉพาะในพื้นที่ราบลุ่มชายฝั่ง เช่น อำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมและเสถียรภาพของคันทางที่ก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน โดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D เพื่อประเมินอิทธิพลของความสูงคันทางและรูปแบบการเสริมกำลังที่แตกต่างกันต่อค่าปัจจัยความปลอดภัย การกระจายความเค้น และพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของคันทาง

จากการศึกษาพบว่าความสูงของคันทางมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบอย่างชัดเจน โดยเมื่อความสูงของคันทางเพิ่มขึ้น ค่าปัจจัยความปลอดภัยมีแนวโน้มลดลง ขณะที่ค่าความเค้นและการเคลื่อนตัวของคันทางในชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนให้เห็นถึงข้อจำกัดของการก่อสร้างคันทางบนดินอ่อนโดยไม่มีมาตรการเสริมกำลัง ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการวิบัติด้านเสถียรภาพสูง การใช้มาตรการเสริมกำลังสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพของคันทางได้ในระดับที่แตกต่างกัน โดยการเสริมกำลังด้วยเสาเข็มช่วยถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินแข็งด้านล่าง ส่งผลให้การทรุดตัวและความเค้นในชั้นดินอ่อนลดลงอย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่การเสริมกำลังด้วยขานทางมีบทบาทในการเพิ่มแรงต้านทานด้านข้างและลดแนวโน้มการวิบัติบริเวณเชิงลาดของคันทาง อย่างไรก็ตาม การเสริมกำลังแบบผสมผสานระหว่างขานทางและเสาเข็ม (Berm + Pile) ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัยและควบคุมการเคลื่อนตัวของคันทางในทุกระดับความสูง เนื่องจากสามารถผสานกลไกการถ่ายแรงในแนวตั้งและแรงต้านทานด้านข้างได้อย่างเหมาะสม

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเลือกใช้มาตรการเสริมกำลังสำหรับคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนควรพิจารณาร่วมกันทั้งลักษณะชั้นดิน ความสูงของคันทาง และเงื่อนไขด้านความปลอดภัยในระยะยาว ซึ่งผลการวิจัยสามารถ

นำไปใช้เป็นแนวทางประกอบการออกแบบและการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมสำหรับการก่อสร้างคันทางในพื้นที่ที่มีสภาพดินคล้ายคลึงกันได้อย่างเหมาะสม

7. ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนในพื้นที่อำเภopakพนัง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตและเชิงนโยบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.1 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

7.1.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ดินในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากข้อมูล SPT ซึ่งแสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึก แต่ในการจำลองได้กำหนดค่าเป็นค่าคงที่ในแต่ละชั้นดิน จึงอาจไม่สอดคล้องกับสภาพจริง ในการศึกษาครั้งต่อไปควรกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้แปรผันตามความลึกเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากขึ้น

7.1.2 ควรดำเนินการเก็บข้อมูลจากการทดสอบภาคสนาม (Field Test) และการติดตามพฤติกรรมคันทางจริง (Monitoring) ภายหลังการก่อสร้าง เช่น การวัดการทรุดตัว และการตรวจสอบค่าปัจจัยความปลอดภัยจากการทดสอบภาคสนาม เพื่อนำมาปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลอง

7.1.3 ควรขยายขอบเขตการศึกษาครอบคลุมปัจจัยแวดล้อมอื่น เช่น การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน ผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนของการจราจร การกัดเซาะจากน้ำฝน และภาวะจากน้ำท่วม ซึ่งอาจมีผลต่อเสถียรภาพคันทางในระยะยาว

7.1.4 ควรทำการวิเคราะห์อายุการใช้งาน (Service Life) ของมาตรการเสริมกำลัง เพื่อกำหนดแนวทางบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่เหมาะสม

7.1.5 ควรพิจารณาการใช้วิธีเสริมกำลังแบบผสมผสาน (Hybrid Reinforcement) ร่วมกับวัสดุหรือเทคโนโลยีใหม่ เช่น Geogrid หรือ Prefabricated Vertical Drain (PVD) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำและลดระยะเวลาการทรุดตัว

7.1.6 ในการวิเคราะห์ผลการทรุดตัวและการกระจายหน่วยแรง ควรมีการอธิบายพฤติกรรมของดินในเชิงกลศาสตร์ดินให้ชัดเจนมากขึ้น เช่น ผลของการใช้ Berm ที่ช่วยเพิ่มแรงต้านด้านข้าง (Passive resistance) และลดการเคลื่อนตัวของดินอ่อน รวมถึงผลของการใช้วัสดุเสริมแรงชนิดแผ่น เช่น Geotextile หรือ Geogrid ซึ่งช่วยกระจายหน่วยแรงให้กว้างขึ้น ส่งผลให้ค่าการทรุดตัวลดลง การอธิบายในเชิงกลศาสตร์จะช่วยให้ผลการวิเคราะห์มีความสมเหตุสมผลมากยิ่งขึ้น

7.1.7 การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองสองมิติ (2D Analysis) ซึ่งเหมาะสมกับโครงสร้างคันทางที่มีหน้าตัดคงที่ อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งต่อไปอาจพิจารณาการวิเคราะห์แบบสามมิติ (3D Analysis) ในกรณีที่มีสภาพพื้นที่ที่มีความไม่ต่อเนื่อง หรือมีโครงสร้างประกอบอื่น เพื่อให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับสภาพจริงมากยิ่งขึ้น

7.1.8 ในการศึกษาครั้งต่อไปควรมีการอ้างอิงข้อมูลจากกรณีศึกษาของงานก่อสร้างในพื้นที่ดินอ่อน เช่น พื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งมีการใช้ Berm เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของคันทาง ทั้งนี้ ในกรณีที่มีการใช้เสาเข็มร่วมกับคันทางบนดินอ่อน ควรมีการติดตั้งเครื่องมือวัด (Instrumentation) เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวและการทรุดตัวของโครงสร้างจริง เนื่องจากเสาเข็มอาจเกิดการเคลื่อนตัวไปพร้อมกับดินอ่อนได้ หากไม่มีแรงต้านด้านข้างเพียงพอ ข้อมูลจากการตรวจวัดภาคสนามสามารถนำมาใช้สนับสนุนการเลือกใช้วิธีปรับปรุงดินที่เหมาะสมต่อไป

7.2 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

7.2.1 ควรกำหนดมาตรฐานการออกแบบและก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน โดยเฉพาะในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคใต้ ให้มีข้อกำหนดชัดเจนเกี่ยวกับวิธีการเสริมกำลังที่เหมาะสมกับสภาพดินและความสูงของคันทาง

7.2.2 ควรส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) ในกระบวนการออกแบบงานดินและฐานราก เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างถนน และลดความเสี่ยงจากการพังทลายของคันทาง

7.2.3 ควรกำหนดข้อกำหนดด้านการตรวจสอบและบำรุงรักษาโครงสร้างคันทางอย่างต่อเนื่อง พร้อมจัดทำคู่มือปฏิบัติ (Guideline) สำหรับวิศวกรผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงาน เพื่อให้การก่อสร้างและการบำรุงรักษามีมาตรฐานเดียวกัน

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับคำแนะนำและข้อเสนอแนะทางวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Terzaghi, K., Peck, R. B. and Mesri, G. 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd ed. New York, USA: John Wiley & Sons.
- [2] Bjerrum, L. 1973. "Problems of soil mechanics and construction on soft clays," In *Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, 3: pp. 111-159.
- [3] Mesri, G. and Olson, R. E. 1971. "Mechanisms controlling the undrained shear strength of clays," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(4): pp. 515-528.
- [4] Duncan, J. M. and Wright, S. G. 2005. *Soil Strength and Slope Stability*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- [5] Leroueil, S. and Hight, D. W. 2003. "Behaviour and properties of natural soils and soft rocks," In *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, 1: pp. 29-254.
- [6] Indraratna, B., Rujikiatkarnjorn, C. and Balasubramaniam, A. S. 2012. *Soft Ground Improvement*. Oxford, UK: Elsevier.

- [7] Phanwitsawakan, P. 2018. "Time-dependent undrained shear behavior of marine soft clay under thermal load: A case study of Pak Phanang clay," Master's thesis, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand. (in Thai)
- [8] Phromphutthangkun, P. and et al. 1999. "Slope stability analysis using stress state from finite element analysis," Research report. Songkhla, Thailand: Rajamangala University of Technology Srivijaya. (in Thai)
- [9] Ruenkraierk, T. and et al. 1999. "Increasing embankment stability by using reinforcement pile row," Research report. Bangkok, Thailand: Department of Highways. (in Thai)
- [10] Jantaroj, N. and et al. 2025. "Stability analysis of embankment on soft clay reinforced with soil-cement piles using finite element model: A case study of drainage canal construction project, Phra Nakhon Si Ayutthaya Province," In *Proceedings of the 30th National Convention on Civil Engineering*, 30: p. GTE-14. (in Thai)
- [11] Pinphet, A. 2013. "A study on the effect of embankment reinforcement with geotextile: A case study of rural road maintenance, line SH.4003," Master's thesis, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. (in Thai)
- [12] Rojanamekha, S. 1998. "The use of geotextile to reinforce bearing capacity in road construction on soft clay, Suphan Buri Province," Master's thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. (in Thai) [13] Bunyanun, Y. 2013. "Application of geosynthetics to increase road embankment stability in Phra Nakhon Si Ayutthaya Province," Master's thesis, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. (in Thai)
- [14] Sae-jew, A. 2009. "Geotechnical engineering characteristics of soft clay in Pak Phanang river basin area," Master's thesis, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand. (in Thai)
- [15] Chuthatsiriwong, A. 2003. *Coastal Geology of Southern Thailand*. Songkhla, Thailand: Prince of Songkla University. (in Thai)
- [16] Department of Highways. 2018. *Guidelines for Construction on Soft Clay Areas*. Bangkok, Thailand: Department of Highways.
- [17] Rowe, R. K. and Soderman, K. L. 1987. "Stabilization of very soft soils using geosynthetics," *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(5): pp. 497-513. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1987\)113:5\(497](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1987)113:5(497)
- [18] Broms, B. B. 1987. "Stabilization of soft clay with piles," In *Proceedings of the 10th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Taipei, 1: pp. 73-85.
- [19] Indraratna, B. and Chu, J. 2005. "Ground improvement techniques for embankments on soft clay," *Ground Improvement*, 9(2): pp. 61-77. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1680/grim.2005.9.2.61>
- [20] Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S. and Swolfs, W. 2019. *PLAXIS 2D Reference Manual*. Delft, Netherlands: Bentley Systems.

- [21] Potts, D. M. and Zdravković, L. 1999. *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering*. London, UK: Thomas Telford.
- [22] Griffiths, D. V. and Lane, P. A. 1999. "Slope stability analysis by finite elements," *Géotechnique*, 49(3): pp. 387-403. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387>
- [23] Nakhon Si Thammarat Provincial Office of Public Works and Town & Country Planning. 2026. "Soil Boring Test Report," Project report. Nakhon Si Thammarat, Thailand. (in Thai)

การประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจต่อการใช้งานเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วย กึ่งอัตโนมัติแบบทูอินวันสำหรับงานกายภาพบำบัด

EFFICIENCY AND USER SATISFACTION EVALUATION OF A SEMI-AUTOMATED 2-IN-1 WALKING AND LIFTING ASSIST DEVICE FOR PHYSICAL THERAPY

อภิพงศ์ ชื่นประกอบเกิด¹, ฉัตรชัย แก้วดี^{2*}, วีรพล ปานศรีนวล², วีระยุทธ สุตสมบุญ²

Apipong Chinprakopkerd¹, Chatchai Kaewdee^{2*}, Weeraphol Pansrinual², Weerayute Sudsomboon²

¹ แผนกวิชาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคสิชล นครศรีธรรมราช

² สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

¹ Department of Machine Shop, Sichon Technical College, Nakhon Si Thammarat

² Department of Industrial Technology Innovation, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

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

วันที่รับบทความ: 21 มีนาคม 2569; วันที่ทบทวนบทความ: 8 เมษายน 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 11 เมษายน 2569;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 29 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ประเมินประสิทธิภาพเชิงเวลาและภารกิจ (Task performance & Efficiency) ของเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติแบบทูอินวันในการเคลื่อนย้ายและพยุงเดินสำหรับงานกายภาพบำบัด 2) ศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้งานทั่วไปและนักกายภาพบำบัดที่มีต่อการใช้งานเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติแบบทูอินวัน กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ ผู้ใช้งานทั่วไปและนักกายภาพบำบัด จำนวน 10 คน ซึ่งได้มาจากการสุ่มตัวอย่างแบบง่าย (Simple random sampling) เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลคือแบบบันทึกผลการทดสอบประสิทธิภาพเชิงเวลาและภารกิจ และแบบสอบถามความพึงพอใจ สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ผลการวิจัยพบว่า 1) ด้านการประเมินประสิทธิภาพเชิงภารกิจ เครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติสามารถช่วยลดภาระด้านบุคลากรลงได้ร้อยละ 50 โดยใช้ผู้ดูแลเพียง 1 คน ในการปฏิบัติงานเมื่อเทียบกับวิธีปกติที่ใช้ 2 คน ในขณะที่กลุ่มตัวอย่างสามารถปฏิบัติภารกิจลุล่วงในสถานการณ์จำลองได้ตามภารกิจที่ออกแบบไว้ โดยใช้เวลาลากตัวผู้ป่วยจำลองเฉลี่ย 46.45 วินาที และเวลาในการจัดทำพยุงเดินเฉลี่ย 53.50 วินาที 2) ผลการประเมินความพึงพอใจที่มีต่อเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติสำหรับงานกายภาพบำบัด พบว่า ในภาพรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.48$, S.D. = 0.17) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่า ด้านการออกแบบมีความพึงพอใจเฉลี่ยสูงสุดอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.57$, S.D. = 0.31) รองลงมาคือ ด้านโครงสร้างมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.44$, S.D. = 0.29) และด้านการใช้งานมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.44$, S.D. = 0.26) ตามลำดับ จากการวิจัยจึงสรุปได้ว่าเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติแบบทูอินวันมีความเหมาะสมทั้งในด้านโครงสร้าง การออกแบบ และการใช้งานสามารถนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ทางเลือกเพื่อสนับสนุนการปฏิบัติงานของนักกายภาพบำบัดและเพิ่มความสะดวกในการดูแลผู้ป่วยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เครื่องช่วยพยุงเดินกึ่งอัตโนมัติ, การยกผู้ป่วย, กายภาพบำบัด

Abstract This research aimed to 1) evaluate the task performance and efficiency of a semi-automated 2-in-1 walking and lifting assist device for patient transfer and walking assistance in physical therapy, and 2) study the satisfaction of general users and physical therapists with the semi-automated 2-in-1 device. The sample group for this study consisted of 10 participants, including general users and physical therapists, selected through simple random sampling. The research instruments included task performance record forms and a satisfaction questionnaire. Data were analyzed using frequency, percentage, mean ($\bar{X}$) and standard deviation (S.D.). The results revealed that: 1) In terms of task performance evaluation, the semi-automated device decreased the personnel workload by 50%, requiring only one caregiver compared to the conventional two-person method. Meanwhile, the participants were able to successfully accomplish the tasks within the simulated scenario as designed, recording an average simulated patient lifting time of 46.45 seconds and an average walking posture preparation time of 53.50 seconds. 2) Regarding the satisfaction with the semi-automated walking and lifting assist device for physical therapy, the overall satisfaction was at a high level ($\bar{X} = 4.48$, S.D. = 0.17). When considering specific aspects, design received the highest satisfaction at the highest level ($\bar{X} = 4.57$, S.D. = 0.31), followed by structure ($\bar{X} = 4.44$, S.D. = 0.29) and usability ($\bar{X} = 4.44$, S.D. = 0.26), both at a high level. In conclusion, the developed semi-automated 2-in-1 walking and lifting assist device is highly suitable in terms of structure, design, and usability. It can effectively serve as an alternative device to support physical therapy operations and enhance convenience in patient care.

Key words: Semi-automated walking assist device, Patient lifting, Physical therapy

1. บทนำ

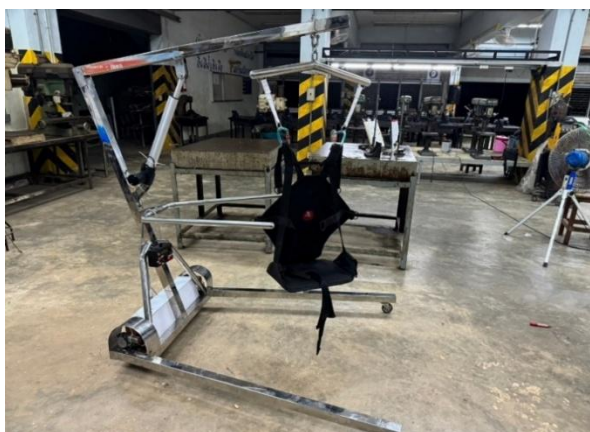
ประเทศไทยในปัจจุบันกำลังเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของประชากรที่ก้าวเข้าสู่ภาวะสังคมสูงวัยอย่างเต็มรูปแบบ ส่งผลให้สถิติของผู้ป่วยที่มีความบกพร่องทางการเคลื่อนไหวเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะกลุ่มผู้ป่วยที่ได้รับผลกระทบจากภาวะหลอดเลือดสมอง ภาวะอัมพฤกษ์ และอัมพาต ซึ่งข้อจำกัดทางกายภาพเหล่านี้ส่งผลให้ผู้ป่วยไม่สามารถปฏิบัติกิจวัตรประจำวันได้ตามปกติ และมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเข้ารับการฟื้นฟูสมรรถภาพอย่างสม่ำเสมอเพื่อป้องกันภาวะแทรกซ้อนจากการนอนติดเตียงในระยะยาว [1], [2] กระบวนการทางกายภาพบำบัดเพื่อฟื้นฟูความสามารถในการก้าวเดินและการทรงตัวถือเป็นองค์ประกอบสำคัญที่จะช่วยให้ผู้ป่วยกลับมาใช้ชีวิตประจำวันได้ใกล้เคียงกับสภาวะปกติมากที่สุด [3], [8] อย่างไรก็ตาม การดำเนินงานในขั้นตอนการเคลื่อนย้ายผู้ป่วย

ออกจากเตียงและการฝึกเดินในแต่ละครั้งเป็นภารกิจที่ต้องอาศัยแรงกายภาพจากนักกายภาพบำบัดหรือผู้ดูแลอย่างน้อย 1 ถึง 2 คน ซึ่งการแบกรับน้ำหนักตัวของผู้ป่วยที่ทั้งตัวลงทั้งหมดในระหว่างการปฏิบัติงานอย่างต่อเนื่อง ก่อให้เกิดความเสี่ยงสูงต่อการเกิดกลุ่มอาการความผิดปกติทางระบบกระดูกและกล้ามเนื้อ จากการปฏิบัติงาน (Work-Related Musculoskeletal Disorders: WMSDs) โดยเฉพาะอาการบาดเจ็บรุนแรงบริเวณหลังส่วนล่างซึ่งเป็นปัญหาเรื้อรังที่พบได้บ่อยในกลุ่มผู้ปฏิบัติงานที่ต้องยกและเคลื่อนย้ายผู้ป่วยด้วยร่างกาย [4], [5], [9]

นอกจากนี้ข้อจำกัดของอุปกรณ์สนับสนุนการกายภาพบำบัดและเครื่องยกตัวที่มีอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่มักมีลักษณะการทำงานแบบหน้าที่เดียว (Single function) เช่น เครื่องยกตัวผู้ป่วยหรืออุปกรณ์ช่วยพยุงเดินแบบทั่วไป ซึ่งส่งผลต่อความคล่องตัวในพื้นที่จำกัด สิ้นเปลืองพื้นที่ในการจัดเก็บ และ

มักมีต้นทุนในการจัดซื้อที่สูง [7], [8] ทำให้สถานพยาบาลระดับท้องถิ่นหรือผู้ป่วยที่ต้องการพักฟื้นภายในที่พักอาศัยไม่สามารถเข้าถึงเทคโนโลยีเหล่านี้ได้อย่างทั่วถึง

จากสภาพปัญหาและข้อจำกัดที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำองค์ความรู้ทางวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติสำหรับงานกายภาพบำบัด (Semi-automated walking and lifting assist device) ที่มีการทำงานในรูปแบบทูอินวัน (2 in 1) โดยสามารถปฏิบัติการกิจได้ทั้งการยกเคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกจากเตียงและการเป็นอุปกรณ์สนับสนุนการฝึกพยุงเดินในเครื่องเดียว ซึ่งนวัตกรรมนี้มุ่งเน้นการลดภาระงานเชิงกลศาสตร์และลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บของผู้ปฏิบัติงาน ควบคู่ไปกับการเพิ่มระดับความปลอดภัยและสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้ป่วยในระหว่างขั้นตอนการทำกายภาพบำบัด [6], [9] ทั้งนี้ การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นที่การศึกษาและประเมินประสิทธิภาพเชิงภารกิจร่วมกับระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานและนักกายภาพบำบัด เพื่อใช้เป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ในการยืนยันสมรรถนะของอุปกรณ์และเตรียมความพร้อมสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงสาธารณสุขให้มีคุณภาพสูงสุด โดยลักษณะทางกายภาพของนวัตกรรมต้นแบบปรากฏดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องช่วยพยุงเดิน และยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติ

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงเวลาและภารกิจ (Task performance & efficiency) ของเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติแบบทูอินวันในการเคลื่อนย้ายและพยุงเดินสำหรับงานกายภาพบำบัด

2.2 เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้งานทั่วไปและนักกายภาพบำบัดที่มีต่อการใช้งานเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติแบบทูอินวัน

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้ครั้งนี้มุ่งเน้นกระบวนการวิจัยเชิงประเมินผล (Evaluation Research) เพื่อตรวจสอบสมรรถนะและความปลอดภัยของนวัตกรรมต้นแบบที่ผ่านการออกแบบและสร้างขึ้นตามมาตรฐานทางวิศวกรรม โดยมีระเบียบวิธีวิจัยที่ครอบคลุมตั้งแต่การกำหนดคุณลักษณะทางเทคนิคไปจนถึงการทดสอบสมรรถนะเชิงประจักษ์กับกลุ่มตัวอย่าง ดังมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานตามลำดับต่อไปนี้

3.1 คุณลักษณะทางเทคนิคและการเตรียมต้นแบบเครื่องช่วยพยุงเดินกึ่งอัตโนมัติ 2 in 1 ในการศึกษาประสิทธิภาพ ผู้วิจัยได้ดำเนินการเตรียมเครื่องต้นแบบที่มีกระบวนการสร้างนวัตกรรมโดยประยุกต์ใช้องค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมเครื่องกลและการเชื่อมประกอบอุตสาหกรรม เพื่อให้มั่นใจในความเสถียรของโครงสร้างก่อนนำไปทดสอบเชิงประเมินผล ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนทางเทคนิคดังนี้

3.1.1 การวิเคราะห์เชิงออกแบบ (Technical design analysis) ผู้วิจัยได้กำหนดโครงสร้างเชิงวิศวกรรมในรูปแบบ 3 มิติ โดยคำนึงถึงหลักการยศาสตร์ (Ergonomics) และสรีรวิทยาการเคลื่อนไหว เพื่อให้มิติตัวเครื่องสอดคล้องกับระยะก้าวเดินและตำแหน่งการพยุงของผู้ป่วยรวมถึงตำแหน่งการควบคุมของผู้ดูแล นอกจากนี้ยังมีการคำนวณและกำหนดจุดศูนย์กลาง (Center of gravity) เพื่อป้องกันภาวะวิกฤตจากการพลิกคว่ำขณะตัวเครื่องรองรับน้ำหนักสูงสุดในระหว่างการเคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกจากเตียง [6], [7]

3.1.2 การสร้างและประกอบโครงสร้าง (Engineering construction) ได้ดำเนินการคัดเลือกวัสดุ เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นโครงสร้างหลัก เพื่อคุณสมบัติด้านความทนทานต่อการกัดกร่อนและสามารถรองรับแรงกดทับเชิงกลศาสตร์ได้ในระดับสูง กระบวนการประกอบใช้เทคนิคการเชื่อมทั้งสแตนเลสอาร์กแก๊ส (TIG welding) เพื่อให้รอยต่อมีความแข็งแรงสูงสุดในระดับมาตรฐานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ป้องกันความเสี่ยงจากการแตกร้าวบริเวณจุดรับน้ำหนักวิกฤต (Critical load points) พร้อมติดตั้งระบบรอกส่งกำลังและมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนฟังก์ชันการยกตัวกึ่งอัตโนมัติ ดังภาพที่ 2 [4], [9]



ภาพที่ 2 การสร้างและประกอบโครงสร้างเครื่องช่วยพยุงเดิน และยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติ

3.1.3 การทดสอบสมรรถนะเชิงโครงสร้างเบื้องต้น (Preliminary performance testing) ก่อนการทดสอบกับกลุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบการรับน้ำหนักจำลอง (Load test) ทั้งในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอนที่พิคัด 120 กิโลกรัม เพื่อตรวจสอบหาค่าการเสียรูป (Deformation) และความล้าของวัสดุ เพื่อยืนยันว่าโครงสร้างมีความมั่นคงและปลอดภัยเพียงพอสำหรับการนำไปทดสอบการใช้งานจริงกับมนุษย์ ดังแสดงรายละเอียดลักษณะทางกายภาพของเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติในภาพที่ 3 และ 4 [4], [5]



ภาพที่ 3 การทดสอบสมรรถนะเชิงโครงสร้างเบื้องต้น เครื่องช่วยพยุงเดิน และยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติ



ภาพที่ 4 การทดสอบสมรรถนะการใช้งานจริงของเครื่องช่วยพยุงเดิน และยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติ

3.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง กลุ่มเป้าหมายที่ใช้ในการศึกษาเพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงภารกิจและระดับความพึงพอใจในครั้งนี้ คือกลุ่มบุคลากรที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับ

กระบวนการฟื้นฟูสมรรถภาพผู้ป่วย ซึ่งประกอบด้วยผู้ใช้งานทั่วไปและนักกายภาพบำบัดวิชาชีพ จำนวน 10 คน โดยดำเนินการคัดเลือกผ่านวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบง่าย (Simple random sampling) ทั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์การคัดเข้า (Inclusion criteria) ที่สำคัญคือต้องเป็นผู้ปฏิบัติงานที่มีความรู้ความเข้าใจในกระบวนการดูแลผู้ป่วยเบื้องต้น หรือเป็นผู้ที่มีประสบการณ์ด้านกายภาพบำบัด เพื่อให้ผลการประเมินมีความเที่ยงตรงและสะท้อนสมรรถนะการใช้งานในสถานการณ์จริงได้อย่างมีนัยสำคัญ [2], [4]

3.3 การประเมินประสิทธิภาพเชิงเวลาและภารกิจ
ในการประเมินสมรรถนะเชิงลึกของนวัตกรรมต้นแบบ ผู้วิจัยได้กำหนดระเบียบวิธีทดสอบตามสถานการณ์จำลอง (Scenario-based testing) เพื่อวิเคราะห์ขีดความสามารถของเครื่องในสภาวะการใช้งานที่ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง โดยกลุ่มตัวอย่างทั้ง 10 คน ปฏิบัติภารกิจร่วมกับหุ่นจำลองน้ำหนัก 80 กิโลกรัม ซึ่งเป็นน้ำหนักมาตรฐานโดยเฉลี่ยของผู้ป่วยในวัยผู้ใหญ่ เพื่อทดสอบความเสถียรเชิงกลไกและการรองรับภาระงานผ่าน 2 ภารกิจหลัก ดังนี้ [3], [6]

3.3.1 ภารกิจการยกเคลื่อนย้าย (Lifting task)
เป็นการประเมินขีดความสามารถของระบบรอกและมอเตอร์ไฟฟ้ากึ่งอัตโนมัติในการพยุงตัวผู้ป่วยจำลองจากท่านอนบนเตียงขึ้นสู่ท่าเตรียมพร้อมสำหรับการก้าวเดิน

3.3.2 ภารกิจการสนับสนุนการเดิน เป็นการประเมินประสิทธิภาพความต่อเนื่องในการพยุงและรักษาความสมดุลในระหว่างการก้าวเดินต่อเนื่องในระยะทาง 10 เมตร

โดยผู้วิจัยทำการจัดเก็บข้อมูลเชิงประจักษ์ (Objective data) ผ่านตัวชี้วัดประสิทธิภาพ 3 มิติ เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงสมรรถนะ ได้แก่ ระยะเวลาในการปฏิบัติภารกิจ (Time on Task) ความสำเร็จลู่ของภารกิจ โดยปราศจากข้อผิดพลาด (Task completion) และจำนวนบุคลากรที่จำเป็นต้องใช้ในการกิจ (Manpower requirement) เพื่อประเมินศักยภาพในการลดภาระงานเชิงมนุษย์เมื่อเทียบกับการดูแลด้วยวิธีปกติ [1], [5], [9]

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยและตรวจสอบคุณภาพ
เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการรวบรวมข้อมูลสำหรับการวิจัยเชิงประเมินผลในครั้งนี้ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ดังนี้

3.4.1 แบบบันทึกผลการทดสอบประสิทธิภาพเชิงเวลาและภารกิจ เป็นเครื่องมือที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นเพื่อจัดเก็บข้อมูลจากการทดสอบใช้งานจริงในสถานการณ์จำลอง (Scenario-based testing) ประกอบด้วย มาตรฐานวัดเชิงปริมาณด้านเวลา (Time on task) โดยใช้นาฬิกาจับเวลามาตรฐานที่มีหน่วยเป็นวินาทีการตรวจสอบความสำเร็จของภารกิจ (Task completion) โดยพิจารณาจากความปลอดภัยและความต่อเนื่องของกลไกขณะปฏิบัติงาน และการประเมินการลดภาระงาน (Manpower requirement) โดยบันทึกจำนวนผู้ดูแลที่จำเป็นต้องใช้ในการควบคุมเครื่องเทียบกับการปฏิบัติงานด้วยร่างกายแบบดั้งเดิม เพื่อวิเคราะห์ขีดความสามารถของนวัตกรรมในการลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บทางระบบกระดูกและกล้ามเนื้อของผู้ดูแล [4], [5], [9]

3.4.2 แบบสอบถามความพึงพอใจต่อการใช้งานเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติแบบทูอินวัน เป็นเครื่องมือวัดเจตคติที่แบ่งเนื้อหาการประเมินออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ปัจจัยด้านคุณลักษณะส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถาม (เพศ อายุ และประเภทผู้ใช้งาน) ส่วนที่ 2 การประเมินความพึงพอใจเชิงลึกในมิติด้านโครงสร้างการออกแบบ และฟังก์ชันการใช้งาน โดยใช้มาตรวัดแบบประมาณค่า (Likert scale) 5 ระดับ เพื่อประเมินความสอดคล้องระหว่างการออกแบบเชิงการศาสตร์และสมรรถนะการใช้งานจริง และส่วนที่ 3 ข้อเสนอแนะปลายเปิดเพื่อรวบรวมความคิดเห็นสำหรับการพัฒนาต่อยอดนวัตกรรมในอนาคต [3], [6], [7]

สำหรับการตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือ ผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้างความเชื่อมั่นเชิงวิชาการด้วยการหาค่าความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (Content validity) โดยให้ผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน พิจารณาคำดัชนีความสอดคล้อง (IOC) ซึ่งผลการตรวจสอบปรากฏค่าระหว่าง 0.67 ถึง 1.00 และทำการทดสอบหาค่าความเชื่อมั่น (Reliability) ของแบบสอบถามด้วยวิธีหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's

Alpha) จนได้ค่าความเชื่อมั่นทั้งฉบับไม่ต่ำกว่า 0.80 จึงนำไปใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลจริงเพื่อให้ผลการประเมินมีความน่าเชื่อถือและเป็นไปตามหลักสถิติวิจัย

3.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 10 คน ซึ่งประกอบด้วยผู้ใช้งานทั่วไปและนักกายภาพบำบัดวิชาชีพ โดยกำหนดขั้นตอนการปฏิบัติที่เป็นมาตรฐานเดียวกันเพื่อให้ผลการประเมินมีความเที่ยงตรงและน่าเชื่อถือ ดังนี้

3.5.1 ขั้นเตรียมการและปฐมนิเทศ ผู้วิจัยทำการประสานงานกับกลุ่มตัวอย่างเพื่อชี้แจงวัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัยเชิงประเมินผล พร้อมทั้งสาธิตระบบการทำงานเชิงวิศวกรรมของเครื่องช่วยพยุงเดินกึ่งอัตโนมัติ โดยมุ่งเน้นความเข้าใจในระบบขับเคลื่อนรอกและมอเตอร์ไฟฟ้า รวมถึงกลไกการบังคับทิศทางในพื้นที่จำกัด ตลอดจนการยึดตามมาตรการความปลอดภัยเชิงเทคนิคเพื่อป้องกันความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบสมรรถนะ ซึ่งถือเป็นหัวใจสำคัญของการจัดการความปลอดภัยในการเคลื่อนย้ายและบริหารผู้ป่วย [5]

3.5.2 ผู้วิจัยกำหนดสถานการณ์จำลอง เพื่อให้กลุ่มตัวอย่างแต่ละคนทดลองปฏิบัติงานร่วมกับหุ่นจำลองน้ำหนัก 80 กิโลกรัม ผ่าน 2 ภารกิจหลัก คือ การยกเคลื่อนย้ายตัวออกจากเตียงและการควบคุมการพยุงเดินในระยะทาง 10 เมตร ในระหว่างกระบวนการนี้ ผู้วิจัยทำหน้าที่เป็นผู้สังเกตการณ์เชิงระบบเพื่อจับเวลาการปฏิบัติงาน บันทึกความสำเร็จของภารกิจ และจำนวนบุคลากรที่จำเป็นต้องใช้ เพื่อประเมินขีดความสามารถในการลดภาระทางกลศาสตร์และความเสี่ยงต่อการเกิดกลุ่มอาการบาดเจ็บทางระบบกระดูกและกล้ามเนื้อของผู้ดูแล ซึ่งสอดคล้องกับระเบียบวิธีวิจัยในการประเมินประสิทธิภาพอุปกรณ์เคลื่อนย้ายและเครื่องพยุงเดินเพื่อลดความเสี่ยงจากการปวดหลังของบุคลากร [3], [4], [6], [9]

3.5.3 ขั้นประเมินความพึงพอใจและทัศนคติ ภายหลังจากการทดลองใช้งานเครื่องช่วยพยุงเดินกึ่งอัตโนมัติครบถ้วนตามฟังก์ชันที่กำหนด ผู้วิจัยดำเนินการแจกแบบสอบถามความพึงพอใจให้แก่กลุ่มตัวอย่าง

เพื่อประเมินสมรรถนะของนวัตกรรมในมิติด้านโครงสร้างการออกแบบ และความสะดวกในการใช้งานเชิงคลินิก พร้อมทั้งเปิดโอกาสให้กลุ่มตัวอย่างเสนอข้อคิดเห็นเชิงวิพากษ์สำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติของเครื่องช่วยเดินให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ความพึงพอใจในงานวิจัยเชิงทบทวนอย่างเป็นระบบด้านเทคโนโลยีหุ่นยนต์ช่วยเดิน [2]

3.5.4 ขั้นรวบรวมและตรวจสอบความสมบูรณ์ของข้อมูล ผู้วิจัยดำเนินการรวบรวมแบบบันทึกผลการทดสอบประสิทธิภาพและแบบสอบถามความพึงพอใจทั้งหมดจำนวนอย่างละ 10 ชุด เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความครบถ้วนของข้อมูล (Data Integrity) ก่อนจะนำข้อมูลเชิงปริมาณทั้งหมดไปลงรหัสเพื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติตามระเบียบวิธีวิจัยที่กำหนดไว้

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงประจักษ์และข้อมูลทางทัศนคติ ผู้วิจัยดำเนินการตรวจสอบความสมบูรณ์ของชุดข้อมูล (Data cleaning) และนำข้อมูลเข้าสู่กระบวนการประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ โดยกำหนดแนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็น 3 ส่วนหลักเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยเชิงประเมินผลและครอบคลุมมิติด้านวิศวกรรมการแพทย์ ดังนี้ [3], [6]

3.6.1 การวิเคราะห์ข้อมูลสถานภาพทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง เป็นการวิเคราะห์ลักษณะทางประชากรศาสตร์และบริบทของกลุ่มตัวอย่างที่ร่วมการทดสอบ ประกอบด้วย เพศ อายุ และประเภทของผู้ใช้งาน (นักกายภาพบำบัดวิชาชีพและผู้ดูแลทั่วไป) โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ในการแจกแจงความถี่ (Frequency) และค่าร้อยละ (Percentage) เพื่ออธิบายลักษณะพื้นฐานของกลุ่มตัวอย่างที่ให้ข้อมูลและใช้เป็นฐานในการอภิปรายผลการวิจัยในเชิงคลินิก [2], [4]

3.6.2 การวิเคราะห์ข้อมูลด้านประสิทธิภาพ เชิงเวลาและภารกิจ (Task performance and efficiency analysis) ผู้วิจัยนำข้อมูลเชิงประจักษ์ (Objective data) ที่จัดเก็บจากการทดสอบในสถานการณ์จำลองมาวิเคราะห์

เชิงเปรียบเทียบเพื่อยืนยันสมรรถนะของนวัตกรรม
กึ่งอัตโนมัติ ประกอบด้วย

1) ระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการกิจ
(Time on task) ดำเนินการวิเคราะห์โดยการหาค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)
ของระยะเวลาที่กลุ่มตัวอย่างทั้ง 10 คน ใช้ในการปฏิบัติ
ภารกิจยกตัวผู้ป่วยออกจากเตียงและการจัดท่าทางเพื่อพยุง
เดินต่อเนื่องในระยะทาง 10 เมตร เพื่อประเมินความรวดเร็ว
และความคล่องตัวเชิงเทคนิคของระบบขับเคลื่อน [1], [5]

2) การลดภาระงานและบุคลากร
(Manpower reduction) วิเคราะห์ผลจากจำนวนผู้ช่วยที่ลดลง
ในแต่ละภารกิจเมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของการ
เคลื่อนย้ายผู้ป่วยด้วยแรงกายตามปกติ โดยนำมาคำนวณค่า
ร้อยละ (Percentage) ของประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเพื่อสะท้อน
ความสามารถของอุปกรณ์ในการลดความเสี่ยงจากการบาดเจ็บ
ทางระบบกระดูกและกล้ามเนื้อของผู้ดูแล [3], [6]

3) การวิเคราะห์ข้อมูลระดับความพึงพอใจ
และเจตคติของผู้ใช้งาน วิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถามชนิด
มาตราส่วนประมาณค่า (Likert scale) 5 ระดับ โดยใช้สถิติ
เชิงพรรณนาประกอบด้วยค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) เพื่อดูระดับการ
ยอมรับ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เพื่อประเมินความ
สอดคล้องของความคิดเห็นที่มีต่อโครงสร้าง การออกแบบ และ
ฟังก์ชันการใช้งานของเครื่องช่วยพยุงเดินกึ่งอัตโนมัติ [2], [4]
โดยมีเกณฑ์การแปลความหมายค่าเฉลี่ยเพื่อระบุระดับความ
เหมาะสมของนวัตกรรมตามช่วงคะแนน

ค่าเฉลี่ย 4.50 – 5.00 หมายถึง มีความ
พึงพอใจหรือมีความเหมาะสมในระดับ มากที่สุด

ตารางที่ 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพเชิงเวลาและภารกิจ (Task Performance) ของกลุ่มตัวอย่าง (N = 10)

ลำดับ	ประเภทผู้ทดสอบ	ภารกิจที่ 1 การยกตัว จากเตียง (วินาที)	ภารกิจที่ 2 การพยุงเดิน 10 ม. (วินาที)	ความสำเร็จ ในภารกิจ	จำนวน ผู้ช่วย (คน)	หมายเหตุ/ข้อสังเกตเชิงคุณภาพที่ พบระหว่างทดสอบ
1	นักกายภาพบำบัด	35.50	42.20	สำเร็จ	1	ระบบรอกทำงานได้ราบรื่น ควบคุม ทิศทางได้ง่าย
2	นักกายภาพบำบัด	38.20	45.10	สำเร็จ	1	การจัดท่าทางผู้ป่วยเข้ากับสายพยุง ทำได้รวดเร็ว
3	นักกายภาพบำบัด	36.40	43.50	สำเร็จ	1	เครื่องมีความมั่นคง เสถียรภาพการ เคลื่อนที่เยี่ยม

ค่าเฉลี่ย 3.50 – 4.49 หมายถึง มีความ

พึงพอใจหรือมีความเหมาะสมในระดับ มาก

ค่าเฉลี่ย 2.50 – 3.49 หมายถึง มีความ

พึงพอใจหรือมีความเหมาะสมในระดับ ปานกลาง

ค่าเฉลี่ย 1.50 – 2.49 หมายถึง มีความ

พึงพอใจหรือมีความเหมาะสมในระดับ น้อย

ค่าเฉลี่ย 1.00 – 1.49 หมายถึง

มีความพึงพอใจหรือมีความเหมาะสมในระดับ น้อยที่สุด

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของความ
คิดเห็นเพิ่มเติมซึ่งเป็นคำถามปลายเปิด ผู้วิจัยใช้วิธีการ
วิเคราะห์เชิงเนื้อหา (Content analysis) เพื่อรวบรวมประเด็น
และข้อเสนอแนะเชิงลึกสำหรับนำไปปรับปรุงสมรรถนะของ
เครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติให้มีความสมบูรณ์
ตามมาตรฐานทางสาธารณสุขสากลต่อไป [5]

4. ผลการศึกษาวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงภารกิจและเวลา
ในการประเมินสมรรถนะเชิงประจักษ์ของเครื่องช่วยพยุงเดิน
และยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติแบบทูอินวัน ผู้วิจัยได้ดำเนินการ
จัดเก็บและรวบรวมข้อมูลผ่านแบบบันทึกผลการทดสอบ
ประสิทธิภาพเชิงเวลาและภารกิจ (Task Performance
Record Form) จากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 10 คน โดยวิเคราะห์
ความสำเร็จเชิงหน้าที่และดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพเชิงเวลา
ในการปฏิบัติการกิจหลักภายใต้สถานการณ์จำลอง ดังแสดง
รายละเอียดในตารางที่ 1

ลำดับ	ประเภทผู้ทดสอบ	ภารกิจที่ 1 การยกตัว จากเตียง (วินาที)	ภารกิจที่ 2 การพุงเดิน 10 ม. (วินาที)	ความสำเร็จ ในภารกิจ	จำนวน ผู้ช่วย (คน)	หมายเหตุ/ข้อสังเกตเชิงคุณภาพที่ พบระหว่างทดสอบ
4	ผู้ใช้งานทั่วไป	48.30	55.40	สำเร็จ	1	ใช้เวลาเล็กน้อยในการทำความเข้าใจ จุดปรับระดับ
5	ผู้ใช้งานทั่วไป	52.10	58.20	สำเร็จ	1	รู้สึกต้องออกแรงขึ้นในช่วงออก ตัวเล็กน้อย
6	ผู้ใช้งานทั่วไป	45.50	52.30	สำเร็จ	1	คำแนะนำเบื้องต้นช่วยให้ใช้งาน ระบบยกได้ง่ายขึ้น
7	ผู้ใช้งานทั่วไป	55.20	62.10	สำเร็จ	1	การเลี้ยวในมุมแคบผู้ใช้งานทั่วไปยัง กระะยะได้ช้า
8	ผู้ใช้งานทั่วไป	49.40	56.50	สำเร็จ	1	รู้สึกปลอดภัย มั่นใจว่าผู้ป่วยจะไม่ ล้ม
9	ผู้ใช้งานทั่วไป	50.30	59.40	สำเร็จ	1	ระบบมอเตอร์ยกตัวช่วยผ่อนแรงได้ ดีมาก
10	ผู้ใช้งานทั่วไป	53.60	60.30	สำเร็จ	1	ช่วงแรกเกร็ง แต่เมื่อคุ้นชินสามารถ พุงเดินได้ดี
ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)		46.45	53.50	-	1 คน	-
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)		7.26	7.34	-	-	-

จากข้อมูลเชิงประจักษ์ที่ปรากฏในตารางที่ 1 ผู้วิจัยสามารถวิเคราะห์และสรุปประเด็นสำคัญด้านประสิทธิภาพเชิงเวลาและภารกิจจากการใช้งานนวัตกรรมต้นแบบได้ดังนี้ (1) ประสิทธิภาพเชิงเวลา (Time efficiency) ในภารกิจที่ 1 ซึ่งเป็นขั้นตอนการยกตัวผู้ป่วยจำลองออกจากเตียงสู่ท่าพร้อมเดิน กลุ่มตัวอย่างใช้เวลาเฉลี่ยรวม 46.45 วินาที (S.D. = 7.26) โดยผลการวิเคราะห์พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างประเภทผู้ใช้งาน กล่าวคือ กลุ่มนักกายภาพบำบัดสามารถปฏิบัติภารกิจได้รวดเร็วกว่าเนื่องจากมีความเชี่ยวชาญในด้านสรีรวิทยาและการจัดทำทางผู้ป่วยให้เข้ากับอุปกรณ์พุงตัว [2], [4] ในขณะที่ภารกิจที่ 2 ซึ่งเป็นการจัดทำและพุงเดินในระยะทาง 10 เมตร ใช้เวลาเฉลี่ยรวม 53.50 วินาที (S.D. = 7.34) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สอดคล้องกับมาตรฐานความปลอดภัยและไม่ก่อให้เกิดความเหนื่อยล้าสะสมต่อทั้งผู้ดูแลและผู้ป่วยในระหว่างกระบวนการฟื้นฟู [3] (2) อัตราความสำเร็จและการเพิ่มศักยภาพการบริหารจัดการบุคลากร (Success rate and manpower optimization)

ผลการทดสอบยืนยันว่ากลุ่มตัวอย่างทั้ง 10 คน สามารถปฏิบัติภารกิจได้ลุล่วงร้อยละ 100 โดยปราศจากอุบัติเหตุหรือข้อผิดพลาดเชิงโครงสร้าง ประเด็นที่สำคัญที่สุดคือความสามารถในการลดจำนวนผู้ดูแลเหลือเพียง 1 คน (Manpower = 1) ในทุกสถานการณ์จำลอง ซึ่งถือเป็นการยกระดับประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับการเคลื่อนย้ายผู้ป่วยด้วยแรงกายแบบดั้งเดิมที่ต้องใช้บุคลากรอย่างน้อย 2 ถึง 3 คน ส่งผลให้สามารถลดภาระงานเชิงกลศาสตร์และลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บทางระบบกระดูกและกล้ามเนื้อของผู้ปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4], [9] และ (3) ผลการสังเกตการณ์เชิงคุณภาพ (Qualitative observation) จากการศึกษาข้อมูลภาคสนามพบว่ากลุ่มนักกายภาพบำบัดให้การยอมรับในด้านเสถียรภาพของระบบรถและกล้ามเนื้อจำลองที่ช่วยผ่อนแรงกระทำได้อย่างชัดเจน ส่วนกลุ่มผู้ใช้งานทั่วไปสะท้อนทัศนคติในทิศทางเดียวกันว่าระบบมอเตอร์กึ่งอัตโนมัติช่วยลดความกังวลเรื่องอาการปวดหลังและสร้างความเชื่อมั่นในความปลอดภัยขณะพุงเดิน ซึ่งสอดคล้องกับ

วัตถุประสงค์ในการออกแบบอุปกรณ์ที่มุ่งเน้นการสนับสนุนทางกายภาพบำบัดระดับครัวเรือนและสถานพยาบาล [1], [5]

4.2 ผลการวิเคราะห์ระดับความพึงพอใจต่อการใช้งาน
ผู้วิจัยได้ดำเนินการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถามความพึงพอใจที่มีต่อเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติแบบทูอินวัน โดยกลุ่มตัวอย่างทั้ง 10 คน ได้ร่วมประเมินสมรรถนะของนวัตกรรมภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการทดสอบใช้งานจริง ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสถานะภาพทั่วไปจากผู้ตอบแบบสอบถาม จำนวน 10 คน ได้แก่ เพศ อายุ และ ประเภทผู้ใช้งาน ซึ่งแปลผลข้อมูลได้ดังนี้

ตารางที่ 1 จำนวนและร้อยละของสถานะภาพทั่วไปเกี่ยวกับเพศ

เพศ	จำนวน	ร้อยละ
เพศ		
- ชาย	7	70.00
- หญิง	3	30.00
รวม	10	100.00

จากข้อมูลที่ปรากฏในตารางที่ 1 พบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศชายจำนวน 7 คน คิดเป็นร้อยละ 70.00 และเป็นเพศหญิงจำนวน 3 คน คิดเป็นร้อยละ 30.00 โดยสัดส่วนดังกล่าวครอบคลุมลักษณะทางกายภาพของผู้ปฏิบัติงานในกลุ่มงานเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและกายภาพบำบัด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินแรงกดทับเชิงกลศาสตร์และการบังคับทิศทางของอุปกรณ์กึ่งอัตโนมัติ

ตารางที่ 2 จำนวนและร้อยละของสถานะภาพทั่วไปเกี่ยวกับอายุ

ช่วงอายุ	จำนวน	ร้อยละ
อายุ		
- 31-40 ปี	7	70.00
- 41-50 ปี	3	30.00
รวม	10	100.00

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า การกระจายตัวด้านอายุของกลุ่มตัวอย่างตามที่แสดงในตารางที่ 2 พบว่าส่วนใหญ่อยู่ในช่วงอายุ 31 ถึง 40 ปี จำนวน 7 คน คิดเป็นร้อยละ 70.00 และช่วงอายุ 41 ถึง 50 ปี จำนวน 3 คน คิดเป็นร้อยละ 30.00 ข้อมูลด้านอายุมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสบการณ์ในการดูแลผู้ป่วยและความคุ้นเคยในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่เพื่อสนับสนุนงานกายภาพบำบัด [3]

ตารางที่ 3 จำนวนและร้อยละของสถานะภาพทั่วไปเกี่ยวกับประเภทผู้ใช้งาน

ประเภทผู้ใช้งาน	จำนวน	ร้อยละ
ผู้ใช้งาน		
- นักกายภาพ	3	30.00
- ผู้ใช้งานทั่วไป	7	70.00
รวม	10	100.00

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่า มิติด้านประเภทผู้ใช้งานซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การวิจัยตามที่แสดงในตารางที่ 3 พบว่ากลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยผู้ใช้งานทั่วไปจำนวน 7 คน คิดเป็นร้อยละ 70.00 และนักกายภาพบำบัดวิชาชีพจำนวน 3 คน คิดเป็นร้อยละ 30.00 การกำหนดสัดส่วนเช่นนี้มุ่งหวังผลการประเมินที่ครอบคลุมทั้งในเชิงวิชาชีพทางการแพทย์เพื่อยืนยันประสิทธิภาพเชิงภารกิจและมิติด้านผู้ใช้งานทั่วไปเพื่อประเมินความสะดวกในการนำอุปกรณ์ไปใช้ภายในครัวเรือนหรือสถานพยาบาลระดับท้องถิ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2], [4]

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ผู้วิจัยดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 10 คน ภายหลังจากทดสอบนวัตกรรมต้นแบบในสถานการณ์จำลอง โดยครอบคลุมดัชนีชี้วัด 3 มิติหลัก ได้แก่ ด้านโครงสร้าง ด้านการออกแบบ และด้านการใช้งาน เพื่อประเมินความเหมาะสมเชิงวิศวกรรมการแพทย์และทัศนคติของผู้ใช้งานที่มีต่อระบบกึ่งอัตโนมัติ [2], [4]

โดยมีผลการวิเคราะห์ปรากฏรายละเอียดดังตารางที่ 4 ถึง ตารางที่ 6

ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ความคิดเห็นพึงพอใจด้าน โครงสร้าง

ประเด็นการพิจารณา	$\bar{X}$	S.D.	ระดับ ความคิดเห็น
1. ขนาดมีความเหมาะสม	4.50	0.50	มากที่สุด
2. อุปกรณ์ประกอบมีความ เหมาะสม	4.33	0.47	มาก
3. มีความแข็งแรง	4.50	0.50	มากที่สุด
รวม	4.44	0.29	มาก

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4 พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามมีความพึงพอใจต่อองค์ประกอบด้านโครงสร้างของเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติในภาพรวมอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.44$, S.D. = 0.29) เมื่อพิจารณาเป็นรายประเด็นพบว่าความพึงพอใจสูงสุดอยู่ในระดับมากที่สุดในด้านขนาดที่มีความเหมาะสม ($\bar{X} = 4.50$, S.D. = 0.50) และด้านความแข็งแรงเชิงโครงสร้าง ($\bar{X} = 4.50$, S.D. = 0.50) ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการคัดเลือกวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมที่สามารถรองรับภาระทางกลศาสตร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสอดคล้องกับคุณลักษณะของอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ต้องมีความมั่นคงปลอดภัยสูงสุด [4], [5]

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ระดับความพึงพอใจด้านการ ออกแบบ

ประเด็นการพิจารณา	$\bar{X}$	S.D.	ระดับ ความคิดเห็น
1. การทำงานมีความเหมาะสม	4.66	0.47	มากที่สุด
2. มีความสะดวกต่อการใช้งาน	4.50	0.50	มากที่สุด
3. การเลือกใช้วัสดุมีความเหมาะสม	4.56	0.50	มากที่สุด
รวม	4.57	0.31	มากที่สุด

จากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ระดับความพึงพอใจในมิติด้านการออกแบบตามที่ปรากฏในตารางที่ 5 พบว่าในภาพรวมกลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.57$, S.D. = 0.31) โดยประเด็นที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดคือ

ความเหมาะสมของการทำงานเชิงหน้าที่ ($\bar{X} = 4.66$, S.D. = 0.47) รองลงมาคือความเหมาะสมในการเลือกใช้วัสดุ ($\bar{X} = 4.56$, S.D. = 0.50) และความสะดวกในการใช้งานเชิงปฏิบัติการ ($\bar{X} = 4.50$, S.D. = 0.50) ตามลำดับ ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าการออกแบบที่คำนึงถึงหลักการยศาสตร์ (Ergonomics) สามารถตอบสนองต่อการใช้งานจริงของทั้งผู้ป่วยและนักกายภาพบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2]

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ระดับความพึงพอใจด้านการใช้งาน

ประเด็นการพิจารณา	$\bar{X}$	S.D.	ระดับ ความคิดเห็น
1. ใช้งานได้ง่าย	4.46	0.50	มาก
2. ใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์	4.50	0.50	มากที่สุด
3. มีความปลอดภัยในการใช้งาน	4.36	0.49	มาก
4. มีความคุ้มค่าในการลงทุน	4.43	0.50	มาก
รวม	4.44	0.26	มาก

จากตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่า มิติด้านการใช้งานจริงตามรายละเอียดที่ปรากฏในตารางที่ 6 พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามมีความพึงพอใจในภาพรวมอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.44$, S.D. = 0.26) โดยประเด็นที่ได้รับความพึงพอใจสูงสุดอยู่ในระดับมากที่สุดคือความสามารถในการใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ ($\bar{X} = 4.50$, S.D. = 0.50) รองลงมาคือความสะดวกและง่ายต่อการเรียนรู้วิธีการใช้งาน ($\bar{X} = 4.46$, S.D. = 0.50) และประเด็นความคุ้มค่าในการลงทุนเชิงเศรษฐศาสตร์สุขภาพ ($\bar{X} = 4.43$, S.D. = 0.50) ในขณะที่ความพึงพอใจด้านความปลอดภัยในการใช้งานอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.36$, S.D. = 0.49) ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่สะท้อนถึงขีดความสามารถของนวัตกรรมในการลดภาระงานเชิงมนุษย์และลดความเสี่ยงจากการบาดเจ็บทางระบบกระดูกและกล้ามเนื้อของผู้ดูแลได้อย่างเห็นผลชัดเจน [3], [6]

5. สรุปผล

จากการประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจต่อการใช้งานเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติแบบทูอินวันสำหรับงานกายภาพบำบัด ผู้วิจัยพบความสำเร็จในการ

ทดสอบนวัตกรรมที่บูรณาการฟังก์ชันการทำงานหลักสองประการคือกระบวนการยกตัวผู้ป่วยออกจากเตียงและการเป็นอุปกรณ์ช่วยพยุงในขณะฝึกเดินเข้าด้วยกันอย่างมีประสิทธิภาพ ตัวเครื่องที่ผลิตด้วยโครงสร้างเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) แสดงสมรรถนะทางกลศาสตร์ที่โดดเด่น โดยสามารถรองรับน้ำหนักบุคคลได้สูงสุดถึง 120 กิโลกรัม ทั้งในลักษณะการยกตัวในแนวตั้งและการประคองตัวในแนวราบโดยปราศจากการเสียวหรือการหลุดตัวเชิงโครงสร้างขณะรับภาระวิกฤต ซึ่งยืนยันถึงความมั่นคงของระบบขับเคลื่อนและความปลอดภัยของกลไกตามมาตรฐานสุขอนามัยทางการแพทย์ [4], [5], [9] ในมิติของประสิทธิภาพเชิงเวลาและการกิจจากการทดสอบในสถานการณ์จำลองดังที่ปรากฏรายละเอียดข้อมูลในตารางที่ 1 พบว่ากลุ่มตัวอย่างทั้งหมดสามารถปฏิบัติภารกิจได้สำเร็จลุล่วงร้อยละ 100 โดยมีจุดเด่นสำคัญคือการบริหารจัดการบุคลากรที่สามารถลดภาระด้านผู้ดูแลลงได้ร้อยละ 50 หรือใช้ผู้ดูแลเพียง 1 คนในการปฏิบัติงานแทนวิธีการเคลื่อนย้ายแบบดั้งเดิมที่ต้องใช้กำลังคนอย่างน้อย 2 คน ผลการจัดเก็บข้อมูลเชิงประจักษ์ระบุว่าระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการยกตัวผู้ป่วยออกจากเตียงจนถึงท่าเตรียมพร้อมอยู่ที่ 46.45 วินาที และใช้ระยะเวลาในการกิจการจัดท่าทางเพื่อพยุงเดินต่อเนื่องในระยะ 10 เมตรเฉลี่ยเพียง 53.50 วินาที ข้อมูลเหล่านี้ยืนยันว่าระบบกึ่งอัตโนมัติสามารถทดแทนแรงงานมนุษย์และลดระยะเวลาในขั้นตอนการเตรียมผู้ป่วยได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้นักกายภาพบำบัดสามารถมุ่งเน้นไปที่การฟื้นฟูสมรรถภาพร่างกายของผู้ป่วยได้อย่างเต็มที่ [6], [9] นอกจากสมรรถนะเชิงตัวเลขแล้ว ผลการประเมินความรู้สึกและการตอบรับจากผู้ใช้งานดังที่แสดงข้อมูลในตารางที่ 4 ถึงตารางที่ 6 ยังชี้ให้เห็นถึงการยอมรับในระดับสูง โดยภาพรวมความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.48$, S.D. = 0.17) ซึ่งเมื่อพิจารณาเจาะลึกเป็นรายด้านจะพบว่าด้านการออกแบบได้รับคะแนนเฉลี่ยสูงสุดในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.57$, S.D. = 0.31) โดยกลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจสูงสุดในประเด็นที่เกี่ยวกับความเหมาะสมของมิติอุปกรณ์ที่สอดคล้องกับสรีระและการ

เคลื่อนไหวของผู้ป่วย ($\bar{X} = 4.66$) ขณะที่ด้านโครงสร้างและด้านการใช้งานมีระดับความพึงพอใจเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.44$) เท่ากันทั้งสองด้าน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเชื่อมั่นในความปลอดภัยและความคุ้มค่าของนวัตกรรม [3], [7], [8] สรุปได้ว่าเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นนี้มีความสมบูรณ์ทั้งในด้านวิศวกรรมโครงสร้างการออกแบบตามหลักการยศาสตร์ และสมรรถนะในการใช้งานจริง ถือเป็นนวัตกรรมต้นแบบที่มีประสิทธิภาพสูงในการสนับสนุนภารกิจทางการแพทย์ ช่วยลดภาระงานของผู้ดูแลและยกระดับคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยที่มีข้อจำกัดทางการเคลื่อนไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. อภิปรายผล

จากการประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจต่อการใช้งานเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติแบบพวยอินวันสำหรับงานกายภาพบำบัด มีประเด็นสำคัญที่ค้นพบและนำมาสู่อภิปรายผลเชิงวิชาการโดยเชื่อมโยงกับหลักการทางวิศวกรรมศาสตร์ หลักการยศาสตร์ (Ergonomics) และวิทยาศาสตร์การฟื้นฟูสมรรถภาพทางการแพทย์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

6.1 ประเด็นด้านประสิทธิภาพเชิงภารกิจและการลดภาระทางชีวกลศาสตร์ ผลการทดสอบประสิทธิภาพที่พบว่าสามารถลดจำนวนผู้ดูแลเหลือเพียง 1 คน ตามที่ปรากฏข้อมูลในตารางที่ 1 และใช้เวลาเฉลี่ยในการเคลื่อนย้ายที่ต่ำกว่า 1 นาทีต่อภารกิจ ถือเป็นดัชนีชี้วัดความสำเร็จเชิงหน้าที่ที่สำคัญของนวัตกรรมกึ่งอัตโนมัตินี้ การที่ระบบมอเตอร์และรอกไฟฟ้าสามารถทำหน้าที่ยกตัวผู้ป่วยที่มีน้ำหนักตัวมากแทนการใช้แรงงานคนช่วยลดภาระงานเชิงกลศาสตร์ (Mechanical load) และป้องกันความเสี่ยงต่อการเกิดกลุ่มอาการผิดปกติทางระบบกระดูกและกล้ามเนื้อของผู้ดูแลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการจัดการความปลอดภัยเชิงประจักษ์ในงานบริการผู้ป่วยเพื่อลดอุบัติเหตุการบาดเจ็บจากการยกและเคลื่อนย้ายของ Fusakul, Y. [3], พรพรรณ เครืออนุรัตน์ [6] และ ยุพาวดี ชันทบัลลัง และคณะ [9] นอกจากนี้ ความแตกต่างของ

ระยะเวลาในการปฏิบัติภารกิจระหว่างกลุ่มนักกายภาพบำบัด และผู้ใช้งานทั่วไปในตารางที่ 1 ซึ่งให้เห็นว่าความชำนาญ ในด้านสรีรวิทยาและการจัดทำทางมีผลโดยตรงต่อความ รวดเร็วและความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน ดังนั้นการจัดทำ คู่มือการใช้งานเชิงเทคนิคหรือการฝึกอบรมทักษะเบื้องต้น จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่จะช่วยยกระดับสมรรถนะของผู้ดูแล ทั่วไปให้มีมาตรฐานใกล้เคียงกับบุคลากรวิชาชีพได้ตาม แนวทางของ Nelson A. และ Baptiste A.S. [5]

6.2 ประเด็นด้านการออกแบบเชิงการยศาสตร์และ ความเชื่อมั่นของผู้ป่วย ระดับคะแนนความพึงพอใจด้าน การออกแบบที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.57$) ตามรายละเอียดในตารางที่ 5 สะท้อนถึงความสำเร็จในการบูร ณาการหลักการยศาสตร์ (Ergonomics) เข้ากับกระบวนการ ผลิตเชิงวิศวกรรม โครงสร้างต้นแบบที่ออกแบบมาให้สอดคล้อง กับสรีระและการเคลื่อนไหวของผู้ป่วยดังที่แสดงในภาพที่ 1 ไม่เพียงแต่ช่วยเสริมความมั่นคงทางกายภาพ แต่ยังสร้าง ความปลอดภัยเชิงจิตวิทยา (Psychological Safety) ซึ่งเป็น หัวใจสำคัญในกระบวนการฟื้นฟูสมรรถภาพทางกายภาพ บำบัด การที่ผู้ป่วยรู้สึกมั่นคงและลดความวิตกกังวลเรื่องการ พลัดตกหกล้มจะส่งผลเชิงบวกต่อความกล้าในการลงน้ำหนัก และก้าวเดิน ซึ่งเป็นปัจจัยกระตุ้นการฟื้นตัวที่สำคัญสำหรับ ผู้ป่วยที่มีภาวะอัมพฤกษ์และกลุ่มผู้สูงอายุตามงานวิจัยของ รัตนพรพรรณ จันทร์อุบล และคณะ [1], Cho, J. E. และคณะ [2] และ Khruanonrat, P. และคณะ [8]

6.3 ประเด็นด้านความเสถียรของโครงสร้างและจุดที่ ควรพัฒนาต่อยอด แม้ผลการประเมินด้านโครงสร้างในตาราง ที่ 4 จะอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.44$) แต่ประเด็นความปลอดภัย ในการใช้งานตามข้อมูลในตารางที่ 6 กลับมีค่าเฉลี่ยอยู่ใน ระดับต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับประเด็นอื่น ($\bar{X} = 4.36$) อภิปราย ได้ว่าเนื่องจากเครื่องช่วยเดินมีคุณลักษณะเป็นระบบ กึ่งอัตโนมัติที่ยังต้องอาศัยผู้ดูแลในการประกอบและควบคุม ทิศทางร่วมด้วย ส่งผลให้ผู้ใช้งานบางส่วนยังมีความกังวลต่อ เสถียรภาพของจุดศูนย์ถ่วง (Center of gravity) ในขณะที่มี การเลี้ยวหรือเคลื่อนย้ายในพื้นที่จำกัด ข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นความ

จำเป็นในการยกระดับสมรรถนะของอุปกรณ์ด้วยการติดตั้ง ระบบความปลอดภัยอัจฉริยะเพิ่มเติม เช่น ระบบเบรก อัตโนมัติในสภาวะเสียสมดุล หรือการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับ สิ่งกีดขวาง เพื่อยกระดับความเชื่อมั่นให้สอดคล้องกับ มาตรฐานสากล ISO 10535 ว่าด้วยเรื่องอุปกรณ์ช่วย เคลื่อนย้ายสำหรับผู้พิการและผู้สูงอายุในอนาคตตาม ข้อเสนอแนะของสุภาวดี ทับลำ และคณะ [4], Nelson, A. และ Baptiste, A. S. [5] และ วรรัตน์ สิทธิเหล่านาวาร และ บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ [7]

7. ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

7.1 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย มีดังนี้

7.1.1 การขยายขอบเขตการประเมินผลเชิงคลินิก

เนื่องจากการทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้นดังที่ปรากฏ ข้อมูลในตารางที่ 1 เป็นการดำเนินงานกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 10 คนภายใต้สถานการณ์จำลองกับหุ่นจำลอง น้ำหนักมาตรฐานเพียงระดับเดียว ดังนั้นในการศึกษาเชิงลึก ครั้งต่อไปควรขยายผลการทดสอบไปยังกลุ่มผู้ป่วยที่มีพยาธิ สภาพหลากหลายและมีความซับซ้อนของอาการที่แตกต่าง กัน โดยเฉพาะผู้ป่วยที่มีระดับความบกพร่องของแรง กล้ามเนื้อในเกณฑ์ต่ำ (Motor power grade 0-3) ซึ่งเป็น กลุ่มที่ไม่สามารถพุงตัวได้เองและมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิด ภาวะแทรกซ้อนในระหว่างการฝึกพุงเดิน เพื่อตรวจสอบขีด ความสามารถสูงสุดของระบบบรอกและกลไกการยกตัว กึ่งอัตโนมัติในสภาวะที่ผู้ป่วยมีข้อจำกัดทางการเคลื่อนไหว อย่างรุนแรง

7.1.2 การประเมินสมรรถนะในสภาพแวดล้อมเชิง วิศวกรรมที่แปรเปลี่ยน ควรมีการเพิ่มมิติการทดสอบ สมรรถนะการเคลื่อนที่และเสถียรภาพเชิงโครงสร้าง บนพื้นผิวที่มีความแตกต่างกัน เช่น พื้นผิวที่มีความลาดชัน หรือพื้นผิวที่มีค่าสัมประสิทธิ์ ความเสียดทานต่ำ เพื่อ วิเคราะห์ความสมดุลของจุดศูนย์ถ่วง (Center of gravity) และความมั่นคงของโครงสร้างหลักกล้าไร้สนิมดังที่แสดงใน ภาพที่ 1 อย่างละเอียดในทุกทิศทางของการเคลื่อนไหว ซึ่งข้อมูล ทางเทคนิคดังกล่าวจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการปรับปรุง

ระบบเบรกและความปลอดภัยเชิงกลไกให้สอดคล้องกับมาตรฐานอุปกรณ์ช่วยเคลื่อนย้ายผู้พิการและผู้สูงอายุระดับสากล

7.1.3 การบูรณาการเครื่องมือวัดเชิงสรีรวิทยาเพื่อการประเมินเชิงประจักษ์ นอกจากการรวบรวมข้อมูลเชิงปริมาณผ่านการจับเวลาและการวัดระดับความพึงพอใจในตารางที่ 4 ถึงตารางที่ 6 แล้ว การศึกษาในอนาคตควรนำเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์การเคลื่อนไหวขั้นสูงเข้ามาประยุกต์ใช้ในการประเมินผลร่วมด้วย เช่น การใช้เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ (Electromyography: EMG) เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบภาระงาน (Workload) ของกล้ามเนื้อส่วนต่างๆ ของผู้ดูแลในขณะปฏิบัติงานทั้งในกรณีที่ใช้งานเครื่องและไม่ใช้งานเครื่อง ข้อมูลเชิงประจักษ์เหล่านี้จะช่วยยืนยันประสิทธิภาพของเครื่องช่วยพยุงเดินและยกผู้ป่วยกึ่งอัตโนมัติในการลดความเสี่ยงจากการบาดเจ็บทางระบบกระดูกและกล้ามเนื้อ (Work-related Musculoskeletal Disorders: WMSDs) ของบุคลากรทางการแพทย์และผู้ดูแลได้อย่างชัดเจนและเป็นไปตามหลักการวิทยาศาสตร์ระดับสูง

7.2 ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้ หรือพัฒนาในอนาคต มีดังนี้

7.2.1 การพัฒนาระบบความปลอดภัยอัจฉริยะ (Smart Safety System) จากผลการประเมินความพึงพอใจในมิติด้านการใช้งานที่ปรากฏในตารางที่ 6 ซึ่งพบว่าประเด็นความปลอดภัยในการใช้งานได้รับคะแนนเฉลี่ยต่ำที่สุด ($\bar{X} = 4.36$) เมื่อเทียบกับประเด็นอื่น จึงควรมีการพิจารณาติดตั้งระบบเบรกอัตโนมัติ (Automatic braking) เพื่อยกระดับการควบคุมในสภาวะที่ผู้ป่วยเสียสมดุล หรือการติดตั้งระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางด้วยเซนเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic sensors) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการนำทางในพื้นที่จำกัดให้มีความมั่นคงสูงขึ้น

7.2.2 การเพิ่มสมรรถนะความคล่องตัวเชิงโครงสร้างและการลดน้ำหนักอุปกรณ์ ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนวัสดุโครงสร้างหลักจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่ปรากฏในภาพที่ 1 เป็นวัสดุอลูมิเนียมเกรดอากาศยาน

(Aircraft grade aluminum) หรือวัสดุคอมโพสิตที่มีน้ำหนักเบาแต่ยังคงความแข็งแรงเชิงกลตามมาตรฐานสากล ISO 10535 ทั้งนี้เพื่อลดภาระงานของผู้ดูแลที่เป็นสตรีหรือผู้สูงอายุให้สามารถควบคุมทิศทางของอุปกรณ์ได้อย่างปราดเปรียวและลดความเหนื่อยล้าทางสรีรวิทยาได้ดียิ่งขึ้น

7.2.3 การบูรณาการเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) เพื่อยกระดับนวัตกรรมสู่ระบบการฟื้นฟูอัจฉริยะ ควรพัฒนาต่อยอดด้วยการติดตั้งระบบติดตามและบันทึกข้อมูลการก้าวเดิน (Gait Tracking System) โดยทำการเชื่อมต่อฐานข้อมูลผ่านแอปพลิเคชัน เพื่อให้ทันกายภาพบำบัดสามารถวิเคราะห์พัฒนาการและติดตามระยะเวลาการฝึกปฏิบัติของผู้ป่วยได้แบบเวลาจริง (Real-time) ซึ่งจะช่วยให้การวางแผนการรักษาและการฟื้นฟูสมรรถภาพเป็นไปอย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ

7.2.4 การขับเคลื่อนสู่มาตรฐานการผลิตเชิงพาณิชย์และการจัดทำคู่มือปฏิบัติงานมาตรฐาน ในการนำนวัตกรรมไปประยุกต์ใช้ในระดับสาธารณสุข ควรมีการกำหนดมาตรฐานการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive maintenance) โดยเฉพาะความมั่นคงของระบบรอกและสายพวงตัว พร้อมทั้งจัดทำคู่มือการใช้งานในรูปแบบวิดีโอสาธิตเชิงเทคนิค เพื่อให้ผู้ใช้งานทั่วไปสามารถปฏิบัติตามขั้นตอนการใช้งานและการดูแลรักษาได้อย่างถูกต้องและปลอดภัยสูงสุดตามหลักเกณฑ์สุขอนามัยทางการแพทย์

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chan-Ubol, R. and et al. 2012. "Gait training in subacute stroke using a robotic-assisted gait trainer: a randomized controlled trial compared with conventional physical therapy," *Journal of Rehabilitation Medicine*, 22(2): pp. 40-48.
[Online]. Available: <https://doi.org/10.14456/jrm.2012.5> (in Thai)
- [2] Cho, J. E. and et al. 2018. "Systematic review of appropriate robotic intervention for gait function

- in subacute stroke patients," *BioMed Research International*, 2018: pp. 1-13. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2018/3521369>
- [3] Fusakul, Y. 2017. "Walking device," *Vajira Medical Journal: Journal of Urban Medicine*, 61(2): pp. 139-153. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14456/vj.2017.15> (in Thai)
- [4] Thabklam, S., Nilkon, S. and Chaloodprasert, S. 2021. "A pilot study on improving lateral patient transfer devices to reduce back pain risks for hospital personnel," *The Journal of the Royal Thai Army Nurses*, 22(1): pp. 154-163. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14456/jrtan.2021.16> (in Thai)
- [5] Nelson, A. and Baptiste, A. S. 2006. "Evidence-based interventions for safe patient handling and movement," *Online Journal of Issues in Nursing*, 11(3). [Online]. Available: <https://doi.org/10.3912/OJIN.Vol11No03Man03>
- [6] Khruanonrat, P. 2017. "Study and development of assist devices for the elderly," M.S. thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14456/kmitl.2017.1> (in Thai)
- [7] Sittlaothaworn, W. and Roongruangduayboon, B. 2018. "Design of a walking assist device with partial body weight support system for people with gait movement problems, version 2.0," *Kasetsart Engineering Journal*, 31(105): pp. 1-10. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14456/kuengj.2018.10> (in Thai)
- [8] Konstantinovic, L. M., Veg, A. and Schwirtlich, L. B. 2014. "Gait training of poststroke patients assisted by the Walkaround (body postural support)," *International Journal of Rehabilitation Research*, 37(1): pp. 22-28. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1097/MRR.0000000000000035>
- [9] Khanthaballang, Y., Suwanthen, W. and Chaichana, N. 2022. "Development and efficiency of innovative patient transfer equipment," *Journal of Health and Nursing Education*, 28(1): pp. 1-15. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14456/jhen.2022.1> (in Thai)

APPLICATION OF BAMBOO POWDER COMPOSITES IN FRUIT PACKAGING

การประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบจากผงไม้ไผ่ในบรรจุภัณฑ์ผลไม้

Yumei Fu^{1*}, Miyoung Seo², Kriangsak Khiaomang³ยูเหมย ฟู่^{1*}, มียอง โซ², เกียรติศักดิ์ เขียวมั่ง³¹Student, Master of the Fine Arts Program in Visual Arts, Design, and Cultural Management, Faculty of Fine and Applied Arts Burapha University²Assistant Professor, Department of Product design, Faculty of Fine and Applied Arts, Burapha University³Associate Professor, Department of Product design, Faculty of Fine and Applied Arts, Burapha University

*Corresponding Author, E-mail: 158015280@qq.com

Article submission date: March 25, 2026; Article review date: April 11, 2026; Article acceptance date: April 15, 2026;

Online publication date: April 29, 2026

Abstract: Amid global efforts to mitigate carbon emissions and plastic pollution, the fruit packaging industry urgently seeks renewable and biodegradable alternatives to conventional petroleum-based materials. Although low-density polyethylene (LDPE) films and polypropylene (PP) trays possess excellent moisture resistance and structural stability, they lack biodegradability. Conversely, while corrugated cardboard and molded pulp are biodegradable, their structural integrity significantly degrades under high-humidity conditions, limiting their utility in cold-chain logistics. This study prepared and evaluated bamboo powder/PBAT/PLA composites for fruit packaging applications. Four bamboo powder particle sizes (60, 200, 400, and 800 mesh) were investigated under identical formulation conditions. The results revealed that particle size exerts a significant influence on the mechanical properties of the composites. Among the experimental groups, the 400-mesh bamboo powder-reinforced composite exhibited the optimal overall performance, characterized by a tensile strength of 26.30 ± 1.30 MPa, elongation at break of $16.20 \pm 2.00\%$, flexural strength of 40.10 ± 3.10 MPa, flexural modulus of 3.00 ± 0.20 GPa, and impact strength of 13.80 ± 1.30 kJ/m². Compared to the 60-mesh group, the 400-mesh composite showed markedly improved tensile and flexural properties, indicating superior filler dispersion and interfacial compatibility within the polymer matrix. Based on the material performance data and the structural requirements for fruit packaging in China and Thailand, a “material parameters–structural functions–application pathways” framework was established. The analysis indicates that the composite has significant potential for tray supports and cushioning liners, whereas its application in external packaging structures necessitates further validation through compression and moisture-resistance testing. This study provides both experimental and application-oriented support for the development of low-carbon and biodegradable fruit packaging materials.

Keywords: Bamboo powder composites, Fruit packaging materials, Low-carbon alternatives, Biodegradable polymers

บทคัดย่อ: ท่ามกลางความพยายามในระดับโลกเพื่อลดการปล่อยคาร์บอนและมลพิษจากพลาสติก อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ผลไม้มีความต้องการวัสดุทางเลือกที่สามารถหมุนเวียนและย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อทดแทนวัสดุฐานปิโตรเลียมแบบดั้งเดิมอย่างเร่งด่วน แม้ว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low-Density Polyethylene: LDPE) และกรดพอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) จะมีคุณสมบัติในการต้านทานความชื้นและความเสถียรเชิงโครงสร้างที่ดีเยี่ยม แต่เป็นวัสดุที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ในทางตรงกันข้าม กระดาษลูกฟูกและเยื่อกระดาษขึ้นรูปสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพแต่กลับแสดงคุณสมบัติเชิงโครงสร้างที่ต่ำภายใต้สภาวะที่มีความชื้นสูง ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์ผลไม้สำหรับระบบโลจิสติกส์โซ่ความเย็น การศึกษานี้ได้ดำเนินการเตรียมและประเมินวัสดุเชิงประกอบจากผงไม้ไผ่ร่วมกับพอลิเมอร์ PBAT และ PLA สำหรับการใช้งานในบรรจุภัณฑ์ผลไม้ โดยวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของผงไม้ไผ่ 4 ระดับ ได้แก่ 60, 200, 400 และ 800 เมช (Mesh) ภายใต้เงื่อนไขสัดส่วนผสมเดียวกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ โดยกลุ่มที่ใช้ผงไม้ไผ่ขนาด 400 เมช ให้สมรรถนะโดยรวมดีที่สุด ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 26.30 ± 1.30 เมกะพาสกัล (MPa) ค่าความยืดหยุ่น ณ จุดขาดร้อยละ 16.20 ± 2.00 ค่าความต้านทานแรงดัด 40.10 ± 3.10 เมกะพาสกัล (MPa) ค่ามอดูลัสการดัด 3.00 ± 0.20 กิกะพาสกัล (GPa) และค่าความต้านทานแรงกระแทก 13.80 ± 1.30 กิโลจูลต่อตารางเมตร (kJ/m²) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม 60 เมช พบว่ากลุ่ม 400 เมช มีสมบัติแรงดึงและแรงดัดที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการกระจายตัวของสารเติมแต่งและความเข้ากันได้กับบริเวณพื้นผิวสัมผัสภายในเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่ดีกว่าจากผลสมรรถนะของวัสดุและข้อกำหนดเชิงโครงสร้างของบรรจุภัณฑ์ผลไม้ในกรณีศึกษาตัวแทนตลาดจากประเทศจีนและประเทศไทย การวิจัยนี้จึงได้กำหนดกรอบการวิเคราะห์แบบ “พารามิเตอร์วัสดุ-หน้าที่เชิงโครงสร้าง-แนวทางการประยุกต์ใช้” ผลการวิเคราะห์ระบุว่าวัสดุเชิงประกอบนี้มีศักยภาพในการนำไปใช้สำหรับถาดรองรับและแผ่นรองกันกระแทก ในขณะที่การนำไปใช้ในโครงสร้างบรรจุภัณฑ์ภายนอกยังจำเป็นต้องมีการตรวจสอบเพิ่มเติมผ่านการทดสอบแรงกดและการต้านทานความชื้น งานวิจัยนี้ให้ข้อมูลสนับสนุนเชิงทดลองและเชิงประยุกต์สำหรับการพัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์ผลไม้คาร์บอนต่ำที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

คำสำคัญ: วัสดุเชิงประกอบจากผงไม้ไผ่, วัสดุบรรจุภัณฑ์ผลไม้, ทางเลือกคาร์บอนต่ำ, พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

1. Introduction

Driven by the global transition toward low-carbon development and the urgent need to reduce plastic pollution, the ecological transformation of packaging materials has become an important direction in sustainable industrial innovation [1], [3]. Fruit packaging is a high-consumption and fast-turnover packaging category, and it must provide sufficient load-bearing capacity, cushioning protection, and environmental adaptability during transportation, stacking, retail

display, and cold-chain storage [2]. At the same time, packaging systems are increasingly expected to reduce environmental impact through recyclability, biodegradability, and the use of renewable biomass resources [3].

At present, petroleum-based plastics such as low-density polyethylene (LDPE) films and polypropylene (PP) trays are widely used in fruit packaging because of their excellent moisture resistance, structural stability, and preservation performance [1], [2]. However, these

materials are non-biodegradable and create long-term environmental burdens after disposal [1]. In contrast, fiber-based materials such as corrugated cardboard and molded pulp have clear environmental advantages because they are recyclable or biodegradable [4], [11]. Nevertheless, these materials are sensitive to moisture and may lose structural integrity under high-humidity or cold-chain conditions [2], [11]. Therefore, a major challenge in fruit packaging is to develop materials that can balance mechanical protection, moisture resistance, and environmental sustainability [2], [3].

Among renewable biomass resources, bamboo has attracted increasing attention because of its rapid growth, wide availability, and high renewability [3], [14]. Bamboo powder can be used as a natural filler in biodegradable polymer matrices to improve stiffness and structural performance while reducing dependence on petroleum-based materials [5], [6], [7], [8], [12]. Recent studies on bamboo-based or natural fiber-reinforced composites have mainly focused on material composition, interfacial compatibility, and basic mechanical properties [5], [6], [7], [8], while studies on sustainable packaging have emphasized biodegradability, environmental trends, and material substitution [3], [4], [12]. In parallel, research on fruit packaging has highlighted the need for structural protection, cushioning performance, and compatibility with cold-chain logistics [2], [9]. However, existing studies still show three limitations. First, there is a lack of systematic comparison of bamboo powder particle size effects on the overall mechanical performance of biodegradable composites [5], [6], [7], [8]. Second, limited research has linked composite test results directly with the structural requirements of

specific fruit packaging systems [2], [9]. Third, few studies have integrated material performance, packaging structure, and application pathways into a unified analysis for practical packaging design [2], [12].

To address these gaps, this study investigates the performance and application of bamboo powder/PBAT/PLA composites in fruit packaging. Bamboo powder with particle sizes of 60, 200, 400, and 800 mesh was incorporated into the same formulation system, and the effects of particle size on particle characteristics and mechanical properties were analyzed. On this basis, representative fruit packaging cases from China and Thailand were examined to identify the functional requirements of different packaging structures, including tray supports, cushioning liners, and outer packaging components. A “material parameters–structural functions–application pathways” framework was then established to connect composite performance with packaging application needs.

The main contributions of this study are as follows. First, it systematically compares the effects of bamboo powder particle size on the mechanical performance of biodegradable composites. Second, it relates material test results to the functional requirements of fruit packaging structures. Third, it proposes application pathways and optimization directions for using bamboo powder composites in fruit packaging. Through this combination of material testing and application analysis, the study provides experimental and design-oriented support for the development of low-carbon and biodegradable fruit packaging materials.

2. Research Objectives

The primary objectives of this study were to evaluate the performance of bamboo powder/PBAT/PLA composites with diverse bamboo powder particle sizes and to examine their applicability in fruit packaging systems. The specific research objectives were as follows:

2.1 To compare the effects of varying bamboo powder particle sizes on the physical and mechanical properties of bamboo powder/PBAT/PLA composites. 2.2 To analyze the correlation between the material performance of the composites and the functional requirements of fruit packaging, encompassing load-bearing capacity, cushioning protection, and environmental adaptability. 2.3 To evaluate the application feasibility and structural compatibility of bamboo powder composites within representative fruit packaging components, such as tray supports, cushioning liners, and outer packaging structures. 2.4 To propose application pathways and optimization strategies for the implementation of bamboo powder composites in low-carbon and biodegradable fruit packaging.

3. Scope of Research

3.1 Content Scope

3.1.1 Packaging Application and Market Scope This study investigates the contemporary utilization of fruit packaging materials and structures to identify practical application requirements for bamboo powder-based composites. The scope encompasses:

1) Analysis of commonly utilized fruit packaging materials in contemporary markets;

2) Evaluation of representative packaging structures and their respective performance characteristics;

3) Investigation of representative fruit packaging cases to identify the functional limitations of conventional materials;

4) Analysis of the application potential of bamboo powder composites within fruit packaging systems.

3.1.2 Material and Performance Scope This study focuses on the material characteristics and performance of bamboo powder/PBAT/PLA composites concerning fruit packaging applications. The scope includes:

1) Review of existing research on bamboo powder composites and environmentally responsible packaging materials;

2) Preparation and formulation of bamboo powder/PBAT/PLA composite materials with varying bamboo powder particle sizes;

3) Characterization of particle size distribution and the specific surface area of bamboo powder;

4) Evaluation of the mechanical properties of the composites following processing and film formation.

This scope delineates the research boundaries from both material and application perspectives. The study concentrates on the effects of bamboo powder particle size on composite performance and the correlation between material properties and fruit packaging requirements. Primary emphasis is placed on performance testing, structural matching, and application analysis, rather than on

large-scale industrial production or long-term commercial validation.

3.2 Research Approach This study examines the performance and application of bamboo powder/PBAT/PLA composites in fruit packaging using a “material parameters–structural functions–application pathways” framework. Initially, bamboo powder of varying particle sizes was incorporated into a standardized formulation system to evaluate the influence of particle size on particle characteristics, interfacial interactions, and mechanical performance. This step served to identify the particle size range yielding the most favorable reinforcement effect.

Subsequently, the structural requirements for fruit packaging were analyzed, encompassing load-bearing capacity, cushioning performance, compression resistance, and environmental adaptability during transportation, stacking, and cold-chain conditions. Representative fruit packaging cases from China and Thailand were examined to identify the primary limitations of conventional packaging materials, specifically the poor moisture resistance of fiber-based materials and the environmental impact of petroleum-based plastics. Finally, the material test results were aligned with the structural requirements of diverse fruit packaging components, such as tray supports, cushioning liners, and outer packaging structures, to evaluate application feasibility and propose practical pathways for bamboo powder composites. This comprehensive approach integrates material performance evaluation with packaging application analysis, providing a technical foundation for developing low-carbon and biodegradable fruit packaging materials

4. Research Methods

4.1 Research Type and Approach This study employs a combination of material performance testing and application-oriented analysis to evaluate the potential of bamboo powder/PBAT/PLA composites for fruit packaging. The research synthesizes material characterization, mechanical property evaluation, literature review, and market case analysis. Utilizing the “material parameters–structural functions–application pathways” framework, the study examines the effects of bamboo powder particle size on composite performance and further correlates the test results with the functional requirements of fruit packaging, emphasizing structural protection, cushioning behavior, and environmental adaptability. This approach provides both experimental support and application-oriented interpretation for the development of low-carbon and biodegradable fruit packaging materials.

4.2 Research Steps

4.2.1 Literature Collection and Theoretical Analysis Relevant international and domestic literature on bamboo powder composites, biodegradable polymers, environmentally responsible packaging materials, and fruit packaging systems was reviewed. This step was conducted to identify the key material properties required for packaging applications and to establish the theoretical foundation for subsequent material evaluation and application analysis.

4.2.2 Material Preparation and Performance Parameter Collection Bamboo powder/PBAT/PLA composites with varying bamboo powder particle sizes were prepared under identical formulation conditions. The particle size distribution,

specific surface area, and mechanical properties of the composites were then collected and organized for comparative analysis. Concurrently, the renewable and biodegradable characteristics of the composite system were considered to support the environmental evaluation of the material.

4.2.3 Analysis of Structural Requirements for Fruit Packaging The functional requirements of fruit packaging were analyzed from the perspectives of transportation, stacking, retail display, and cold-chain storage. Significant emphasis was placed on load-bearing capacity, compression resistance, cushioning performance, and environmental adaptability to ensure that the technical demands of various packaging components could be clearly identified.

4.2.4 Matching Analysis between Material Properties and Packaging Requirements The physical and mechanical properties of the composites were compared with the structural requirements of fruit packaging. This matching analysis was conducted to evaluate the suitability of bamboo powder-based composites for various packaging components, including tray supports, cushioning liners, and outer packaging structures.

4.2.5 Application Feasibility Analysis Utilizing the material performance results and the structural matching analysis, the application potential of bamboo powder composites in fruit packaging was evaluated. This stage focused on mechanical performance, processing adaptability, environmental attributes, and practical application limitations to propose suitable application pathways for the material.

4.3 Data Sources and Analytical Methodology

4.3.1 Data Sources The data utilized in this study were derived from three primary sources. First, experimental data were obtained from bamboo powder/PBAT/PLA composites, encompassing formulation composition, particle size distribution, specific surface area, and mechanical properties. These data served to evaluate the influence of bamboo powder particle size on composite performance. Four particle-size groups were investigated under identical formulation conditions; the detailed formulation design is presented in Table 2. Second, the data comprised representative fruit packaging cases observed in wholesale and retail markets in China and Thailand. These cases were utilized to identify common packaging structures, material limitations, and practical functional requirements for fruit packaging applications. Typical cases included apple, persimmon, mango, and blueberry packaging systems, reflecting variations in load-bearing, cushioning, retail display, and environmental responsibility requirements. Third, the data included published academic literature and industry reports concerning biodegradable materials, fruit packaging, molded fiber packaging, and bamboo-based alternatives. These references supported the interpretation of material performance, environmental advantages, and application trends in environmentally responsible packaging.

4.3.2 Analytical Methods This study employs comparative analysis, structural-functional matching, and application-oriented evaluation. Initially, the effects of bamboo powder particle size on particle characteristics and mechanical properties were compared across the four experimental groups.

Subsequently, the test results were aligned with the functional requirements of fruit packaging structures. Finally, the feasibility of applying bamboo powder composites to diverse packaging components was evaluated by considering structural performance, processing characteristics, and environmental attributes within the proposed “material parameters–structural functions–application pathways” framework. This analytical process was designed to connect material testing with practical packaging application analysis.

4.4 Experimental Methods

4.4.1 Chemical Properties of Matrix Materials and Additives To facilitate formulation design and the selection of processing parameters, the

chemical and thermal properties of the matrix materials and additives were evaluated. In this composite system, poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) and polylactic acid (PLA) were utilized as the biodegradable polymer matrix, while KH570 and ethylene bis-stearamide (EBS) served as the silane coupling agent and processing additive, respectively. PBAT primarily contributed flexibility, whereas PLA provided rigidity and dimensional stability. KH570 improved interfacial adhesion between the bamboo powder and the polymer matrix, and EBS enhanced melt flowability during processing. The chemical formulas, molecular weights, glass transition temperatures, and melting points of these materials are summarized in Table 1.

Table.1: Chemical Properties of Base Materials and Additives

Material	Chemical Formula	Molecular Weight (g/mol)	Glass Transition Temperature (°C)	Melting Point (°C)
PBAT	$(C_{12}H_{20}O)_n$	25,000–35,000	-30 ~ -20	110–120
PLA	$(C_3H_4O_2)_n$	50,000–200,000	55–65	150–180
KH570 (Silane)	$C_9H_{20}O_5Si$	236.34	—	217
EBS (stearamide)	$C_{36}H_{70}N_2O_2$	593.0	—	140–145

4.4.2 Formulation Composition of Experimental Groups with Varying Particle Sizes

To investigate the influence of bamboo powder particle size on composite performance, four experimental groups were established using bamboo

powder with particle sizes of 60, 200, 400, and 800 mesh. Across all groups, particle size served as the solitary variable, while the formulation composition was maintained constant. The detailed formulation for each experimental group is presented in Table 2.

Table.2: Formulation Composition of Experimental Groups with Different Bamboo Powder Particle Sizes

Group	Bamboo Powder Particle Size (Mesh)	Bamboo Powder (%)	PBAT (%)	PLA (%)	KH570 (%)	EBS (%)	Total mass(kg)
1	60	15.0	25.0	58.0	1.0	1.0	1.50
2	200	15.0	25.0	58.0	1.0	1.0	1.50
3	400	15.0	25.0	58.0	1.0	1.0	1.50
4	800	15.0	25.0	58.0	1.0	1.0	1.50

5. Research Findings and Analysis

5.1 Market Analysis of Fruit Packaging Materials

5.1.1 Common Fruit Packaging Material Types and Performance Characteristics Common fruit packaging materials in contemporary markets primarily consist of petroleum-based plastics and fiber-based materials. Among these, low-density polyethylene (LDPE) and polypropylene (PP) are widely utilized due to their superior toughness, rigidity, and moisture resistance, rendering them suitable for plastic bags, fresh-keeping films, and rigid trays. However, these materials are non-biodegradable and are associated with a significant environmental burden

following disposal. Conversely, corrugated cardboard and molded pulp offer distinct environmental advantages as they are recyclable or biodegradable. Corrugated cardboard is frequently utilized for outer packaging due to its compressive strength, whereas molded pulp is commonly used for fruit trays due to its cushioning performance. Nevertheless, molded pulp exhibits poor moisture resistance and tends to soften under humid conditions, which restricts its reliability in cold-chain logistics and storage. The primary characteristics of these common materials are summarized in Table 3.

Table.3: Comparison of Common Fruit Packaging Materials and Their Performance Characteristics

Material Type	Main Composition	Key Structural Performance Characteristics	Moisture Resistance	Environmental Attributes	Typical Application Forms
Low-Density Polyethylene (LDPE)	Petroleum-based plastic	Good impact resistance and high toughness	Excellent moisture resistance	Non-biodegradable; high carbon emissions	Plastic bags; fresh-keeping films
Polypropylene (PP)	Petroleum-based plastic	Relatively high rigidity and impact resistance	Excellent moisture resistance	Non-biodegradable	Plastic trays
Corrugated Cardboard	Pulp fiber	Good compressive strength	Moderate moisture resistance	Recyclable	Outer packaging boxes
Molded Pulp	Plant fiber	Good cushioning performance	Easily absorbs moisture	Biodegradable	Fruit trays

Overall, existing fruit packaging materials continue to exhibit a distinct trade-off between structural performance and long-term environmental responsibility. Petroleum-based plastics demonstrate superior moisture protection and structural stability, whereas fiber-based materials offer enhanced environmental profiles but remain susceptible to

moisture and varied operating conditions. This limitation underscores the difficulty in identifying a singular packaging material that concurrently meets requirements for protection, moisture resistance, and environmental responsibility. Figure 1 illustrates representative examples of these common fruit packaging materials observed in contemporary market.



(a) LDPE flexible packaging



(b) PP rigid plastic tray



(c) Corrugated transport carton



(d) Molded pulp tray

Figure1: Representative fruit packaging materials observed in current markets

Source: Field survey conducted by the author.

5.1.2 Analysis of Common Fruit Packaging Structures and Functional Issues Representative fruit packaging structures in contemporary markets exhibit distinct differences based on fruit characteristics, transport conditions, and retail requirements Apples are commonly packaged in corrugated cartons combined with polyethylene (PE) or polypropylene (PP) mesh sleeves and partition boards This structure is cost-effective and facilitates stacking; however, it possesses limited moisture resistance and is susceptible to deformation under compression during transportation

Persimmons are frequently packed in polyethylene terephthalate (PET) clamshell containers, which provide superior product visibility and display performance, yet their environmental impact remains relatively high due to their non-biodegradable nature Mangoes are often transported in expanded polystyrene (EPS) foam boxes, which offer substantial cushioning protection but are difficult to recycle and occupy a relatively large volume Blueberries are typically sold in transparent plastic cups or hinged containers, which are suitable for retail display but have

limited structural strength and involve high plastic consumption. The primary characteristics and functional issues of these common packaging structures are summarized in Table 4.

Table.4: Comparison of Common Fruit Packaging Structures and Functional Issues

Fruit Type	Packaging Material	Structural Form	Functional Advantages	Existing Problems
Apple	Corrugated cardboard + PE/PP mesh sleeve	Box body + mesh sleeve + partition board	Low cost; easy stacking	Insufficient moisture resistance; easily deformed under compression
Persimmon	PET plastic box	Clamshell tray/box	Good product visibility and display performance	Non-biodegradable; relatively high environmental burden
Mango	EPS foam box	Integral cushioned box structure	Strong cushioning performance	Difficult to recycle; bulky volume
Blueberry	Transparent plastic cup	Clamshell cup-type container	Convenient for retail display	Limited structural strength; high plastic consumption

These cases indicate that contemporary fruit packaging systems continue to encounter a common challenge: packaging structures that exhibit superior performance in cushioning, display, or stacking frequently depend on petroleum-based or non-recyclable materials, whereas environmentally responsible alternatives are often constrained by moisture sensitivity or insufficient structural stability.

Consequently, the development of alternative materials necessitates not only environmental benefits but also compatibility with the specific structural and functional requirements of fruit packaging. Figure 2 illustrates representative fruit packaging structures observed in wholesale and retail markets in China and Thailand.



(a) Apple – Corrugated carton with PE/PP foam net



(b) Persimmon – PET clamshell container



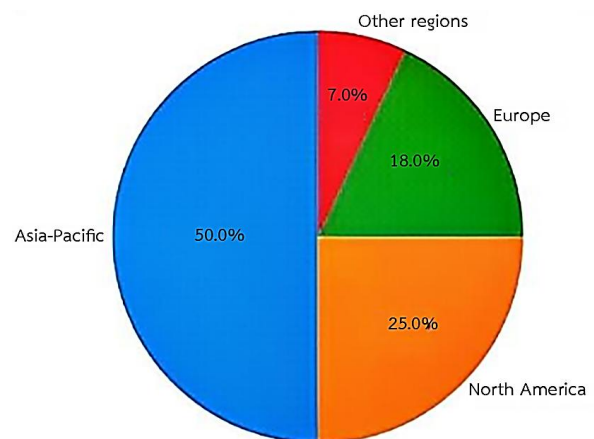
(c) Mango in EPS cushioning box



(d) Blueberry in transparent hinged plastic cup

Figure 2: Representative fruit packaging structures observed in wholesale and retail markets**Source:** Field survey conducted by the author

5.2 Regional Development Trends of Bamboo-Based Packaging Materials Figure 3 illustrates that molded fiber packaging activity is primarily concentrated in the Asia-Pacific region, followed by North America and Europe [13]. Although these data do not directly represent the exact market size of bamboo powder composites, they provide a valuable reference for understanding regional development trends in biomass-based packaging materials. Recent studies also indicate that food packaging materials are gradually shifting from conventional wood pulp to non-wood biomass fibers, such as bagasse, wheat straw, and bamboo. Alongside improvements in pulping and thermoforming technologies, this trend underscores the growing application potential of bamboo-based materials in fruit packaging. However, their actual suitability necessitates further evaluation in conjunction with material performance, processing behavior, and packaging functional requirements.

**Figure 3:** Regional market share distribution of molded fiber packaging

5.3 Fabrication and Performance Analysis of Bamboo Powder Composites

5.3.1 Bamboo Powder Particle Size Distribution and Specific Surface Area The particle size distribution and specific surface area of bamboo powder are important factors affecting filler dispersion, interfacial contact, and the mechanical performance of the composites. As shown in Table 5, the particle size decreased progressively with increasing mesh number, while the specific surface area increased accordingly. For example, the D50 value decreased from 250.0 μm at 60 mesh to 38.0 μm at 400 mesh and 18.0 μm at

800 mesh, while the specific surface area increased from 2.10 m²/g to 18.20 m²/g and 35.70 m²/g, respectively. These results indicate that finer bamboo powder provides a larger contact area with the polymer matrix, which is beneficial for interfacial interaction. However, the Span value also increased from 0.68 to 1.50 as the particle size became finer, suggesting a

broader particle size distribution and a higher possibility of agglomeration and processing instability. Therefore, particle refinement can improve the reinforcement potential of bamboo powder, but excessively fine particles may also create dispersion and processing challenges. The detailed particle size distribution and specific surface area data are summarized in Table 5.

Table 5: Statistics on Bamboo Powder Particle Size Distribution and Specific Surface Area

Bamboo powder particle size (mesh)	D10(μm)	D50(μm)	D90(μm)	Span	Specific surface area(m ² /g)
60	180.0	250.0	350.0	0.68	2.10
200	45.0	75.0	120.0	1.00	8.50
400	20.0	38.0	65.0	1.18	18.20
800	8.0	18.0	35.0	1.50	35.70

5.3.2 Mechanical Properties Analysis Figure 4 illustrates that bamboo powder particle size exerted a significant influence on the mechanical properties of the composites. The overall performance demonstrated an upward trend from 60 mesh to 400 mesh, followed by a decline at 800 mesh. Among the evaluated experimental groups, the 400-mesh composite exhibited the optimal overall performance, characterized by a tensile strength of 26.30 ± 1.30 MPa, a flexural strength of 40.10 ± 3.10 MPa,

and an impact strength of 13.80 ± 1.30 kJ/m². Conversely, both the 60-mesh and 800-mesh groups displayed inferior mechanical performance. This result indicates that the 400-mesh bamboo powder provided a superior balance between filler dispersion and interfacial reinforcement, whereas excessively coarse or excessively fine particles proved less effective. These findings provide a technical foundation for the subsequent evaluation of the material for fruit packaging applications.

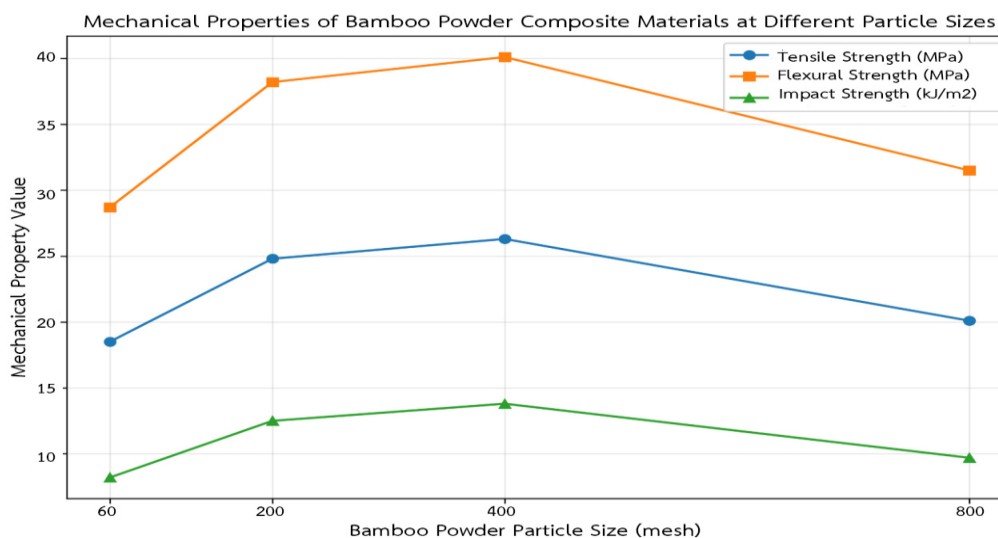


Figure 4: Mechanical Properties of Bamboo Powder Composite Materials at Different Particle Sizes

5.3.3 Images Related to the Experimental Process Figure 5 illustrates representative images depicting the preparation and processing stages of the bamboo powder composites, encompassing material handling, masterbatch preparation, and hot-melt film formation. These images provide visual documentation

of the fabrication procedure, demonstrating the processability of the composite materials under the designated experimental conditions. Nevertheless, these visuals primarily serve as procedural documentation and do not inherently constitute a comprehensive validation of packaging performance.

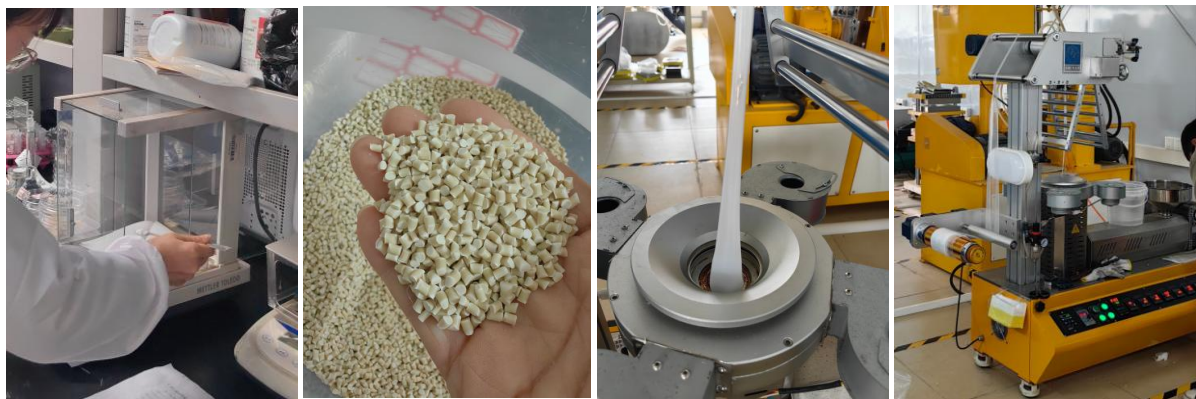


Figure 5: Representative images of bamboo powder composite masterbatch preparation and hot-melt film formation.

Source: Experimental photographs taken by the author.

6. Conclusions and Discussion

This study examined the performance and application potential of bamboo powder/PBAT/PLA composites for fruit packaging and established a “material parameters–structural functions–application pathways” framework to align material test results with packaging requirements. The findings revealed that bamboo powder particle size exerted a significant influence on composite performance. Among the evaluated groups, the 400-mesh bamboo powder demonstrated the optimal overall mechanical performance, indicating a more favorable balance between filler dispersion, interfacial interaction, and reinforcement efficiency. Based on the material test results and the structural requirements of representative fruit packaging systems, the composites exhibit potential for utilization in tray supports and

cushioning liners. These outcomes provide experimental and application-oriented support for the development of low-carbon and biodegradable fruit packaging materials. From an application perspective, the study suggests that bamboo powder composites may offer both structural and environmental advantages over conventional petroleum-based materials in specific packaging components.

Utilizing bamboo powder as a renewable biomass filler can reduce reliance on fossil-based resources, while the PBAT/PLA matrix provides a biodegradable foundation. However, the current results should be interpreted within the scope of this investigation. Although the material demonstrated favorable mechanical performance and fundamental processing feasibility, the present work did not encompass prototype compression testing, high-humidity moisture-

resistance testing, or long-term service validation under actual logistics and cold-chain conditions. Consequently, the current conclusions support preliminary application feasibility rather than comprehensive industrial validation.

Claims regarding large-scale commercial implementation should be pursued with caution until further engineering verification is finalized. In summary, this study contributes to the field in three primary ways. First, it compares the influence of bamboo powder particle size on the performance of biodegradable composites under a controlled formulation system. Second, it correlates material test results with the structural and functional requirements of fruit packaging in representative market cases from China and Thailand. Third, it proposes application pathways for utilizing bamboo powder composites in fruit packaging while acknowledging the current boundaries of validation. These outcomes provide a foundation for future prototype design, performance testing, and environmentally responsible packaging development.

7. Recommendations

7.1 Technical Application Recommendations For practical packaging design, the utilization of bamboo powder composites should initially focus on applications with relatively controllable structural requirements, such as tray supports and cushioning liners. In these applications, the material formulation, bamboo powder content, and structural geometry should be adjusted in accordance with fruit characteristics, packaging forms, and transportation conditions. Significant emphasis should be placed on the relationship between mechanical support, cushioning performance, and processability.

Furthermore, the interfacial compatibility between bamboo powder and the PBAT/PLA matrix should be continuously optimized to enhance the overall stability and efficiency of the composite structure. Prior to broader implementation, prototype development and fundamental engineering validation are recommended.

7.2 Recommendations for Industrialization and Engineering Implementation

Prior to large-scale commercial utilization, small-batch pilot trials should be conducted to assess the material under realistic transportation, stacking, and cold-chain conditions. Specifically, future engineering evaluations should encompass prototype compression testing, moisture-resistance testing under high-humidity conditions, and processing consistency assessments [15]. Concurrently, a preliminary economic comparison with conventional petroleum-based plastics and fiber-based packaging materials should be considered to clarify the practical advantages and current limitations of the composite system. Life Cycle Assessment (LCA) is also recommended to quantify carbon reduction potential, resource utilization, and environmental impacts [16]. These procedures are essential for transitioning from laboratory-scale material evaluation to industrial decision-making.

7.3 Recommendations for Future Research

Future investigations should further optimize processing parameters and examine the influence of bamboo powder content, particle size distribution, and matrix ratios on composite behavior. More importantly, future work should involve replicated experiments and statistical validation to clarify the quantitative relationship between particle size and mechanical performance. Additional studies should also examine long-term durability, degradation behavior, and

functional stability within actual packaging environments To better meet the requirements of fresh-fruit supply chains, subsequent research may further investigate moisture-barrier enhancement, structural prototype design, and the potential incorporation of active or intelligent packaging functions for fresh-fruit preservation [10], [17], [18].

8. Acknowledgments

The authors extend sincere gratitude to their advisor for the professional guidance and valuable suggestions provided throughout the research and revision of this thesis.

9. References

- [1] Geyer, R., Jambeck, J. R. and Law, K. L. 2017. "Production, use, and fate of all plastics ever made," *Science Advances*, 3(7): p. e1700782. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- [2] Defraeye, T. and et al. 2015. "Towards integrated performance evaluation of future packaging for fresh produce in the cold chain," *Trends in Food Science & Technology*, 44(2): pp. 201-225. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.008>
- [3] Mohanty, A. K. and et al. 2018. "Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations," *Science*, 362: pp. 536-542. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/science.aat9072>
- [4] Amara, C. and et al. 2021. "Nanocellulose-based composites for packaging applications," *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 31: p. 100512. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100512>
- [5] Bari, E. and et al. 2019. "Assessment of physical and mechanical properties of bamboo-plastic composites," *Polymer Composites*, 40(7): pp. 2834-2839. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/pc.25097>
- [6] Hu, F. and et al. 2022. "Surface characteristics of thermally modified bamboo fibers and its utilization potential for bamboo plastic composites," *Materials*, 15(13): p. 4481. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ma15134481>
- [7] Ochi, S. 2022. "Mechanical properties of bamboo fiber bundle-reinforced bamboo powder composite materials," *European Journal of Wood and Wood Products*, 80: pp. 263-275. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01757-4>
- [8] Nukala, S. G. and et al. 2022. "Development of biodegradable composites using polycaprolactone and bamboo powder," *Polymers*, 14(19): p. 4169. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym14194169>
- [9] Zheng, D. and et al. 2022. "Packaging design to protect Hongmeiren orange fruit from mechanical damage during simulated and road transportation," *Horticulturae*, 8(3): p. 258. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8030258>
- [10] Sani, M. A. and et al. 2021. "Recent advances in the development of smart and active biodegradable packaging materials," *Nanomaterials*, 11(5): p. 1331. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/nano11051331>

- [11] Semple, K. E. and et al. 2022. "Moulded pulp fibers for disposable food packaging: A state-of-the-art review," *Food Packaging and Shelf Life*, 34: p. 100908. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100908>
- [12] Bangar, S. P. and et al. 2023. "Plant-based natural fibers for food packaging: A green approach to the reinforcement of biopolymers," *Journal of Polymers and the Environment*, 31(12): pp. 5029-5049. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02849-3>
- [13] DI Research. 2024. *Global molded fiber pulp packaging competitive landscape professional research report 2024*. [Online]. Available: <https://www.marketresearch.com/Deep-Insights-Research-Co-DIR-v4285/Global-Molded-Fiber-Pulp-Packaging-37313502/>
- [14] Li, Y., Wang, N. and Abdul Latiff, A. R. 2025. "Development of the bamboo forest economy: Reviewing China's 'bamboo as a substitute for plastic' initiative and its development," *Advances in Bamboo Science*, 11: p. 100130. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2025.100130>
- [15] Jalali, A. and et al. 2019. "Application of humidity absorbing trays to fresh produce packaging: Mathematical modeling and experimental validation," *Journal of Food Engineering*, 244: pp. 115-125. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.09.006>
- [16] Ponnusamy, P. G. and Mani, S. 2022. "Life cycle assessment of manufacturing cellulose nanofibril-reinforced chitosan composite films for packaging applications," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27: pp. 380-394. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02035-y>
- [17] Rodriguez, O. T. and et al. 2024. "Performance of biodegradable active packaging in the preservation of fresh-cut fruits: A systematic review," *Polymers*, 16(24): p. 3518. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym16243518>
- [18] Jahangiri, F., Mohanty, A. K. and Misra, M. 2024. "Sustainable biodegradable coatings for food packaging: Challenges and opportunities," *Green Chemistry*, 26: pp. 4934-4974. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1039/D3GC02647G>

ชั้นพื้นทางจากส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์นำกลับมาใช้ใหม่และดินลูกรังผสมกับซีเมนต์

BASE DERIVED FROM RAP AND LATERITIC SOIL MIXED WITH CEMENT

วรงค์ เสาวนีย์พิทักษ์^{1*}, ภาณุ พร้อมพุทธานุกร²Warong Saowaneevitak ^{1*}, Panu Promputthangkoon²¹ นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย² หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย¹ Graduate Student, Master of Engineering Program Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya² Master of Engineering Program Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya* ผู้ประสานงานเผยแพร่ Corresponding author; E-mail Address: warong.srt@gmail.com

วันที่รับบทความ: 31 มีนาคม 2569; วันที่ทบทวนบทความ: 13 เมษายน 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 15 เมษายน 2569 ;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 29 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาการพัฒนาส่วนผสมและสมรรถนะด้านความคงทนของวัสดุผสมเชิงประกอบระหว่างดินลูกรัง วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุนวัตกรรมในงานก่อสร้างชั้นพื้นทาง 2) วิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สุด 3) ประเมินความสอดคล้องของคุณสมบัติวัสดุผสมเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานงานทางของกรมทางหลวงชนบท และ 4) เพื่อสังเคราะห์ข้อมูลสนับสนุนทางวิศวกรรมและโครงสร้างจุลภาคสำหรับการนำวัสดุหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ไปปฏิบัติงานจริงในเชิงอุตสาหกรรมก่อสร้าง วิธีการดำเนินงานวิจัยใช้การทดสอบทางวิศวกรรมเชิงปฏิบัติการในห้องปฏิบัติการ โดยเตรียมตัวอย่างวัสดุผสมในอัตราส่วน RAP ต่อดินลูกรังที่ร้อยละ 100:0 0:100 90:10 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 1.5 3 และ 4.5 โดยน้ำหนัก กระบวนการทดสอบประกอบด้วยการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) เพื่อวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สุด การทดสอบอัตราส่วนความแข็งแรงในการรับน้ำหนัก (CBR) และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่ออธิบายกลไกการยึดประสานทางเคมี ผลการวิจัยพบว่า อัตราส่วนผสมของชุดตัวอย่าง C (RAP ต่อดินลูกรัง 90:10) และชุดตัวอย่าง D (RAP ต่อดินลูกรัง 80:20) เมื่อผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 สามารถพัฒนาค่า CBR ได้ถึงร้อยละ 152.52 และ 148.87 ตามลำดับ ซึ่งมีสมรรถนะสูงกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานชั้นพื้นทางกำหนดไว้อย่างชัดเจน การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการบูรณาการวัสดุเหลือทิ้งจากผิวทางร่วมกับปูนซีเมนต์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรับน้ำหนักบรรทุกและเป็นทางเลือกนวัตกรรมที่ช่วยเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งสำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรในอุตสาหกรรมงานทางให้เกิดประโยชน์สูงสุด

คำสำคัญ: วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่, ปูนซีเมนต์, คุณสมบัติเชิงกล, โครงสร้างจุลภาค, ดินลูกรัง

Abstract: This research aims to: 1) study the development of compressive strength and durability performance of composite mixtures consisting of lateritic soil, Recycled Asphalt Pavement (RAP), and Portland cement type 1 for application as an innovative material in pavement base course construction; 2) analyze the engineering influence of controlled variables, including RAP content, optimum moisture content, cement content, and curing period, on the development of mechanical properties; 3) evaluate the compliance of the mixture properties compared to the pavement standards of the Department of Rural Roads; and 4) synthesize engineering and microstructural supporting data for the practical implementation of recycled materials in the construction industry. The research methodology utilized laboratory engineering tests by preparing mixture samples with RAP to lateritic soil weight ratios of 100:0, 0:100, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, and 50:50, and stabilized with cement at 0%, 1.5%, 3%, and 4.5% by weight. The testing process included modified compaction to determine maximum dry density and optimum moisture content, California Bearing Ratio (CBR) testing, and microstructural analysis using X-ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) to explain chemical bonding mechanisms. The research results revealed that the mixtures of Sample Set C (90:10 RAP to lateritic soil) and Sample Set D (80:20 RAP to lateritic soil), when stabilized with 3% cement, achieved CBR values of 152.52% and 148.87%, respectively, which significantly exceed the criteria specified by pavement base standards. This study demonstrates that integrating recycled pavement waste with cement enhances load-bearing efficiency and serves as an innovative alternative that adds value to waste materials for optimal resource management in the road construction industry.

Keywords: Recycled asphalt pavement, Cement, Mechanical properties, Microstructure, Lateritic soil

1. บทนำ

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลกส่งผลกระทบต่อความต้องการใช้งานระบบสาธารณูปโภคพื้นฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงข่ายการคมนาคมขนส่งทางถนนซึ่งเป็นเส้นเลือดใหญ่ในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ ประเทศไทยซึ่งมีประชากรสูงเป็นอันดับที่ 20 ของโลกคิดเป็นประมาณร้อยละ 0.9 ของประชากรโลก (แผนกประชากร สำนักงานสังคมและเศรษฐกิจแห่งประชาชาติ 19 มีนาคม 2565) กำลังเผชิญกับความท้าทายจากการขยายตัวของปริมาณการจราจรและน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สภาพทางหลวงที่ถูกออกแบบไว้ในอดีตจึงไม่สามารถรองรับความต้องการใช้งานในสภาวะปัจจุบันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้โครงสร้างทางเกิดการเสื่อมสภาพก่อนครบอายุการใช้งานเชิงวิศวกรรม ความเสียหายที่พบโดยทั่วไปประกอบด้วย การหลุดร่อนของผิวทาง การเกิดร่องล้อจากการสะสมความเครียด และรอยแตกรูปแบบ

ต่าง ๆ ซึ่งหากขาดการวางแผนการบำรุงรักษาที่ถูกต้องและรวดเร็ว ความเสียหายดังกล่าวจะขยายวงกว้างและลดทอนความปลอดภัยในการสัญจร แม้ในปัจจุบันจะมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการก่อสร้างและซ่อมแซมถนนที่หลากหลาย แต่ข้อจำกัดด้านงบประมาณ ระยะเวลา และการขาดแคลนวัสดุก่อสร้างที่ได้มาตรฐานในบางพื้นที่ยังคงเป็นอุปสรรคสำคัญที่ส่งผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้างนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐาน [1], [2]

แนวทางการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) [3] เป็นกลยุทธ์ทางเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางเพื่อแก้ปัญหาวิกฤตการณ์ด้านวัสดุ ปัจจุบันกรมทางหลวงชนบทได้นำแนวทางนี้มาใช้ในการบำรุงรักษาถนนโดยแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ การนำวัสดุไปผสมใหม่ที่โรงงานผลิต (In-plant recycling) และการหมุนเวียนวัสดุกลับมาใช้ในพื้นที่ก่อสร้าง (In-place recycling)

กระบวนการซ่อมแซมถนนด้วยวิธีนี้มักมีการขุดไส (Milling) ผิวทางเดิมทิ้งเพื่อเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพชั้นทางใหม่จากการรวบรวมข้อมูลในโครงการซ่อมสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในพื้นที่รับผิดชอบของแขวงทางหลวงชนบทปัตตานีพบว่ากระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดเศษวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมากซึ่งมักถูกนำไปกองทิ้งโดยไม่ได้ใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้การทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาในงานวิจัยหลายฉบับระบุถึงศักยภาพในการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการซ่อมแซมถนนมาพัฒนาเป็นส่วนประกอบของชั้นโครงสร้างทางที่มีสมรรถนะสูง [4], [5], [6] ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นความสำคัญในการนำเศษวัสดุเหล่านี้มาประยุกต์ใช้เป็นนวัตกรรมวัสดุสำหรับชั้นพื้นทางเพื่อเพิ่มมูลค่าทางอุตสาหกรรม

ปัญหาสำคัญในการก่อสร้างทางในภูมิภาคที่ห่างไกลคือการขาดแคลนแหล่งวัสดุธรรมชาติที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมตรงตามมาตรฐาน การขนส่งวัสดุจากแหล่งอื่นที่มีระยะทางไกลส่งผลให้ต้นทุนรวมและระยะเวลาดำเนินการเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ประกอบกับข้อจำกัดในการจัดการพื้นที่กักเก็บเศษวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement หรือ RAP) [7], [8], [9], [10] ปัจจุบัน RAP ได้รับการยอมรับในการนำมาเป็นวัสดุผสมรวมทดแทนเนื่องจากมีต้นทุนต่ำและมีปริมาณเพียงพอในพื้นที่งานทาง การบูรณาการ RAP ร่วมกับดินลูกรังและปูนซีเมนต์จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการเพิ่มกำลังอัดและการยึดประสานของโครงสร้างวัสดุผสม [11], [12], [13], [14] สำหรับในประเทศไทย การนำเทคโนโลยีดินซีเมนต์มาใช้งานทางเริ่มต้นตั้งแต่ปีพุทธศักราช 2508 โดยมีการทดลองนำดินลูกรังผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มความเสถียรภาพและขีดความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นพื้นทาง

ด้วยเหตุผลด้านการบริหารจัดการเศษวัสดุเหลือทิ้งเชิงอุตสาหกรรมและข้อจำกัดของทรัพยากรธรรมชาติ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนานวัตกรรมวัสดุผสมที่สามารถตอบโจทย์การใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการพัฒนา กำลังอัดและสมรรถนะความคงทนของวัสดุผสมเชิงประกอบระหว่างดินลูกรัง วัสดุ RAP และปูนซีเมนต์ เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงวิศวกรรมเชิงลึกสำหรับงาน

ชั้นพื้นทาง โดยพิจารณาอิทธิพลของตัวแปรสำคัญ ได้แก่ อัตราส่วนปริมาณ RAP ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม ปริมาณปูนซีเมนต์ และระยะเวลาในการบ่มตัวที่มีต่อวิวัฒนาการกำลังอัด ผลการศึกษาที่ได้จะถูกนำไปประเมินเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบทเพื่อใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนเชิงเทคนิคในการส่งเสริมการใช้วัสดุทางเลือกในระดับอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้ดินซีเมนต์ (Soil cement) ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงของถนน ลดต้นทุนการจัดหาวัสดุ และลดงบประมาณการขนส่งได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังช่วยปรับระดับความสูงของชั้นทางและเปลี่ยนผิวถนนที่ชำรุดให้มีความราบเรียบและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น [15], [16], [17], [18], [19] การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในดินลูกรังที่สัดส่วนร้อยละ 2 - 5 ตามคำแนะนำของกรมทางหลวงชนบทถือเป็นแนวทางที่คุ้มค่าและลดระยะเวลาการดำเนินงานในกรณีเร่งด่วน การวิจัยนี้จึงเป็นการต่อยอดเพื่อแก้ปัญหาการจัดการ RAP และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานวัสดุผสมในพื้นที่ห่างไกลให้เกิดประโยชน์สูงสุด [20], [21], [22]

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาการพัฒนา กำลังอัดและความคงทนของวัสดุผสมระหว่างดินลูกรัง วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้างชั้นพื้นทาง

2.2 เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ปริมาณ RAP ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และระยะเวลาในการบ่ม ที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสม

2.3 เพื่อประเมินและเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุผสมกับมาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบท

2.4 เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนทางวิศวกรรมในการนำวัสดุดังกล่าวไปใช้งานจริงและเป็นทางเลือกนวัตกรรมสำหรับงานก่อสร้างทาง

3. ขอบเขตการวิจัย

เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยสามารถตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ผู้วิจัยได้วางกรอบและขอบเขตของการศึกษาโดยครอบคลุมปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างละเอียดดังนี้

3.1 ขอบเขตด้านตัวแปรที่ศึกษา การศึกษาครั้งนี้กำหนดตัวแปรต้นคืออัตราส่วนผสมระหว่างดินลูกรังและวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) โดยน้ำหนักที่อัตราส่วน 100:0, 0:100, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 ร่วมกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 0, 1.5, 3 และ 4.5 โดยน้ำหนักสำหรับตัวแปรตามคือคุณสมบัติทางวิศวกรรมเชิงกลและลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม

3.2 ขอบเขตด้านวัสดุที่ใช้ในการวิจัย วัสดุหลักที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมประกอบด้วยวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) ซึ่งรวบรวมจากการรื้อและขุดไผ่ผิวทางในโครงการซ่อมสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตของแขวงทางหลวงชนบทจังหวัดปัตตานี โดยนำมาย่อยและร่อนผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐานเพื่อคัดขนาดเศษที่ไม่เหมาะสมออก วัสดุดินลูกรังจัดหาจากบ่อยืมในพื้นที่จังหวัดปัตตานี ซึ่งผ่านการประเมินคุณสมบัติเบื้องต้นตามเกณฑ์มาตรฐานวัสดุรองพื้นทางของกรมทางหลวงชนบท และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน (Binder)

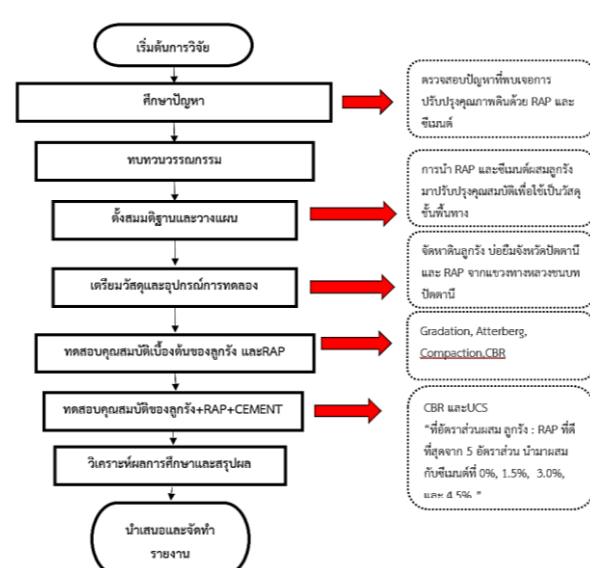
3.3 ขอบเขตด้านการทดสอบและตัวชี้วัด งานวิจัยนี้ประเมินคุณสมบัติของวัสดุผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการแขวงทางหลวงชนบทปัตตานี โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนหลักคือ การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลซึ่งประกอบด้วย การหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Grain size analysis) การหาค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก (Atterberg's limits) การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) เพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่เหมาะสม และการทดสอบค่าอัตราส่วนความแข็งแรงในการรับน้ำหนัก (CBR) อีกส่วนหนึ่งคือการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ซึ่งรวมถึงการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และ

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.4 ขอบเขตด้านมาตรฐานการอ้างอิง กระบวนการวิเคราะห์ผลและการประเมินคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุผสมจะดำเนินการโดยอ้างอิงและตรวจสอบความสอดคล้องกับมาตรฐานวัสดุงานทางของกรมทางหลวงชนบท (ทล.ฉ.) เพื่อพิจารณาและยืนยันประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของวัสดุว่ามีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานเป็นวัสดุชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทางในงานก่อสร้างทางต่อไป

4. วิธีดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยมุ่งเน้นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์และวัสดุผสมระหว่างดินลูกรังและวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement หรือ RAP) ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อประเมินศักยภาพในการนำมาใช้งานทดแทนวัสดุหินคลุกซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ยากในพื้นที่จังหวัดปัตตานี กระบวนการทดสอบครอบคลุมทั้งคุณสมบัติดัชนีพื้นฐานและสมรรถนะด้านการรับกำลังเพื่อกำหนดอัตราส่วนผสมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการก่อสร้างชั้นพื้นทาง โดยลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่การรวบรวมข้อมูลทฤษฎีจนถึงการสรุปผลการศึกษาปรากฏรายละเอียดดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

4.1 วัสดุและคุณสมบัติทางกายภาพ

4.1.1 ดินลูกรัง การศึกษาเริ่มต้นจากการสำรวจและรวบรวมวัสดุดินลูกรังจากบ่อขุดในเขตพื้นที่จังหวัดปัตตานี เพื่อใช้เป็นมวลรวมหลักในส่วนผสม โดยนำมาเตรียมตัวอย่างตามมาตรฐานเพื่อผสมร่วมกับวัสดุ RAP และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามสัดส่วนที่กำหนดเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมเชิงกล

4.1.2 วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ วัสดุ RAP ที่นำมาศึกษาได้จากโครงการซ่อมสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตของแขวงทางหลวงชนบทจังหวัดปัตตานี ผู้วิจัยดำเนินการเตรียมวัสดุด้วยการย่อยและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 3 นิ้วเพื่อให้ได้ขนาดคละที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบบดอัด จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content) โดยอาศัยวิธีการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.2-2545 [28] ทั้งนี้มีการแปรผันปริมาณปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 0, 1.5, 3.0 และ 4.5 โดยน้ำหนัก โดยจำกัดปริมาณไม่ให้เกินร้อยละ 4.5 เพื่อควบคุมและลดโอกาสการเกิดรอยแตกจากการหดตัว (Shrinkage crack) อันเนื่องมาจากความเข้มข้นของปูนซีเมนต์ที่สูงเกินไป [20], [21], [22]

4.1.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทาอ่อนและมีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.15 ถูกนำมาใช้เป็นสารเชื่อมประสานหลัก (Binder) คุณสมบัติการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจะก่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมทำให้วัสดุผสมมีกำลังอัดสูงขึ้นและสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้ดียิ่งขึ้น [18], [19] โดยสัดส่วนการผสมสำหรับชุดการทดสอบต่าง ๆ แสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของแต่ละชุดการทดสอบที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับ	อัตราส่วนผสม (ดินลูกรัง : RAP)	ปริมาณปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)
ชุด A	100 : 0	0, 1.5, 3 และ 4.5
ชุด B	0 : 100	0, 1.5, 3 และ 4.5

ลำดับ	อัตราส่วนผสม (ดินลูกรัง : RAP)	ปริมาณปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)
-------	--------------------------------	---------------------------

ชุด C	90 : 10	0, 1.5, 3 และ 4.5
ชุด D	80 : 20	0, 1.5, 3 และ 4.5
ชุด E	70 : 30	0, 1.5, 3 และ 4.5
ชุด F	60 : 40	0, 1.5, 3 และ 4.5
ชุด G	50 : 50	0, 1.5, 3 และ 4.5

จากรายละเอียดในข้างต้นแสดงให้เห็นถึงการกำหนดสัดส่วนของตัวแปรที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบอย่างเป็นระบบเพื่อประเมินพฤติกรรมทางวิศวกรรมของวัสดุผสม โดยแบ่งชุดการทดสอบออกเป็น 7 ชุดหลัก ได้แก่ชุด A ถึงชุด G ซึ่งชุด A ทำหน้าที่เป็นชุดควบคุมที่ใช้ดินลูกรังร้อยละ 100 และชุด B เป็นชุดที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) ร้อยละ 100 สำหรับชุด C ถึงชุด G เป็นการผสมวัสดุ RAP เพื่อทดแทนดินลูกรังในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นตามลำดับตั้งแต่ร้อยละ 10 ไปจนถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ในทุกอัตราส่วนผสมยังได้ทำการแปรผันปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานที่ระดับร้อยละ 0, 1.5, 3 และ 4.5 โดยน้ำหนัก การออกแบบอัตราส่วนการทดสอบที่ครอบคลุมความหลากหลายของตัวแปรทั้งปริมาณ RAP และปริมาณปูนซีเมนต์นี้ จะช่วยให้ผู้วิจัยสามารถวิเคราะห์อิทธิพลของวัสดุที่มีต่อการพัฒนา กำลังอัดและประสิทธิภาพการรับน้ำหนักได้อย่างละเอียดถี่ถ้วน เพื่อค้นหาสัดส่วนที่มีความเหมาะสมสูงสุดในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเชิงนวัตกรรม ซึ่งตัวแปรและเงื่อนไขการทดสอบทั้งหมดมีความสอดคล้องตามรายละเอียดที่ปรากฏในตารางที่ 1

4.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลในห้องปฏิบัติการ

4.2.1 การหาขนาดเม็ดของวัสดุ การวิเคราะห์ขนาดเม็ดวัสดุหรือการทดสอบขนาดคละเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการประเมินลักษณะทางกายภาพของวัสดุงานทางเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการบดอัด กำลังแรงเฉือน และสมบัติการซึมผ่านของน้ำ โดยกระบวนการ

ทดสอบมุ่งเน้นการกำหนดการกระจายตัวของขนาดมวลรวมเพื่อใช้ในการจำแนกประเภทวัสดุตามมาตรฐาน ASTM D421 [23], [24] และเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท ข้อมูลที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานยังถูกนำไปใช้เป็นตัวชี้สำคัญสำหรับการออกแบบส่วนผสมในชั้นโครงสร้างทางทั้งชั้นรองพื้นทาง ชั้นพื้นทาง และชั้นผิวทาง เพื่อให้วัสดุผสมมีโครงสร้างที่หนาแน่น มีลักษณะการกระจายขนาดเม็ดที่เหมาะสม (Well-graded) ซึ่งจะช่วยให้อนุภาคสามารถจัดเรียงตัวและถ่ายแรงระหว่างเม็ดวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

4.2.2 การหาค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก การทดสอบค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์กเป็นวิธีมาตรฐานสำหรับการจำแนกประเภทและประเมินพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินที่มีอนุภาคละเอียด (Fine-grained soil) โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินเหนียวและดินตะกอนซึ่งสามารถเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นพลาสติกและของเหลวเมื่อมีความชื้นเปลี่ยนแปลงตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.5-2545 และ ทล.ฉ. 501.6-2545 [25], [26], [27] การทดสอบนี้มีเป้าหมายหลักในการกำหนดค่าดัชนีสำคัญได้แก่ ขีดจำกัดของเหลว (Liquid limit) ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit) และดัชนีพลาสติก (Plasticity index) ข้อมูลดังกล่าวช่วยให้ผู้วิจัยสามารถประเมินพฤติกรรมของวัสดุในสภาวะที่มีความชื้นเปลี่ยนแปลง โดยหากวัสดุมีค่าขีดจำกัดของเหลวสูงอาจมีแนวโน้มเกิดการพองตัวและทรุดตัวเมื่อเปียกน้ำ หรือหากมีค่าดัชนีพลาสติกสูงอาจเกิดการเสียรูปเมื่อถูกบดอัด ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปตรวจสอบกับเกณฑ์มาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางที่มักควบคุมค่าขีดจำกัดของเหลวให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยเพื่อความปลอดภัยของโครงสร้างทาง

4.2.3 การทดสอบการบดอัด การบดอัดเป็นกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นให้แก่โครงสร้างวัสดุผสมโดยการให้พลังงานกลด้วยวิธีแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) ตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.2-2545 [28] เพื่อไล่อากาศออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดดินและมวลรวม RAP วัตถุประสงค์หลักของการทดสอบคือการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความหนาแน่นของวัสดุผสมแต่ละอัตราส่วน เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด

(Maximum dry density) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สุด (Optimum moisture content) กระบวนการนี้ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ลดอัตราการยุบตัวของโครงสร้างทาง และลดสมบัติการซึมผ่านของน้ำ โดยผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรควบคุมที่สำคัญสำหรับการเตรียมตัวอย่างในระดับร้อยละ 95 ของการบดอัดสูงสุดเพื่อหาค่ากำลังรับแบกทานเชิงวัฏกรรมในลำดับถัดไป

4.2.4 การหาค่าอัตราส่วนความแข็งแรงในการรับน้ำหนัก การทดสอบค่าซีบีอาร์เป็นเกณฑ์มาตรฐานสากลที่ใช้ในการประเมินกำลังและสมรรถนะการรับแรงของวัสดุผสมผสมสำหรับงานวิศวกรรมทางหลวงชนบทตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.3-2545 [29] โดยเป็นการวัดความแข็งแรงของตัวอย่างวัสดุที่ผ่านการบดอัดในห้องปฏิบัติการและนำไปคำนวณเปรียบเทียบกับกำลังรับแบกทาน (Bearing capacity) ภายใต้น้ำหนักกดกับกำลังมาตรฐาน ณ ค่าระยะยุบตัวที่กำหนด การทดสอบนี้ครอบคลุมถึงการวิเคราะห์แรงเฉือนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก และประเมินอัตราการบวมตัว (Swelling) ของตัวอย่าง เพื่อจัดลำดับความเหมาะสมของวัสดุผสมแต่ละชุดว่ามีประสิทธิภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในชั้นวัสดุคัตเลือก ชั้นรองพื้นทางหรือชั้นพื้นทางได้อย่างปลอดภัย

4.2.5 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ การวิเคราะห์ในระดับจุลภาคอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุหลังการผสมด้วยปูนซีเมนต์ [30], [31] ประกอบด้วยการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางเคมีโดยละเอียด การใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction หรือ XRD) เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางแร่ธาตุและโครงสร้างผลึก รวมถึงการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยา รูปทรงของผลึก และการจัดเรียงตัวของอนุภาค ข้อมูลเชิงลึกเหล่านี้มีความสำคัญในการใช้อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน การเกิดสารประกอบเจลซิลิเกตที่ช่วยในการยึดเกาะ และ

พฤติกรรมการพัฒนาที่กำลังเกิดขึ้นภายในวัสดุผสมได้อย่าง มีหลักการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

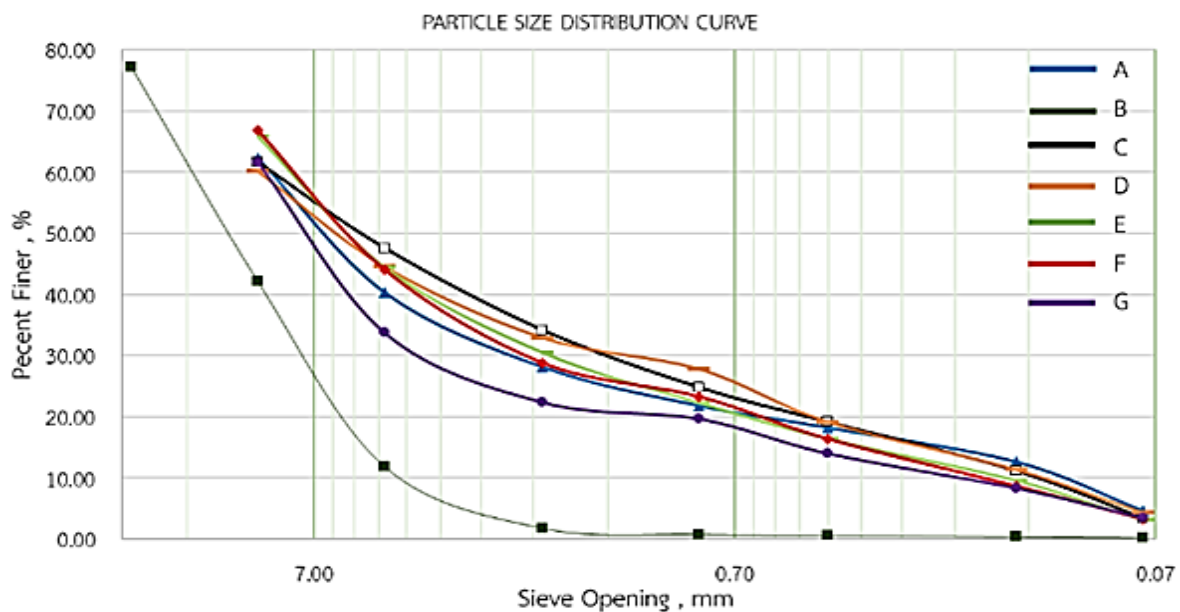
5. ผลการวิจัย

5.1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลในห้องปฏิบัติการ

5.1.1 ผลการทดสอบการกระจายขนาดเม็ดของวัสดุ การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเม็ดวัสดุ (Particle Size Distribution) สำหรับวัสดุผสมระหว่างดินลูกรัง และวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) ในชุดการ ทดสอบ A, B, C, D, E, F และ G สามารถประเมินพฤติกรรมทาง กายภาพได้จากเส้นโค้งการกระจายขนาดเม็ด (Particle size distribution curve) ร่วมกับการพิจารณาค่าขนาดเม็ดวัสดุ เฉลี่ย (D50) ซึ่งเป็นดัชนีสำคัญที่บ่งชี้ถึงความสม่ำเสมอของ ขนาดมวลรวม (Uniformity) ตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุ งานทาง ASTM D422 [23], [24] จากภาพที่ 2 ผลการทดสอบ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวัสดุผสมในชุดตัวอย่าง A, C และ D มีลักษณะเส้นโค้งการกระจายตัวที่ต่อเนื่องและครอบคลุม ทุกขนาดเม็ด (Well-graded) โดยมีค่า D50 อยู่ในช่วงประมาณ 4 ถึง 5 มิลลิเมตร ลักษณะขนาดคละที่ดีย่อมเช่นนี้ส่งผลให้ อนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกตัวเข้าไปเติมเต็มช่องว่าง ระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ โครงสร้างวัสดุเกิดการขัดถูและจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น (Interlocking) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ช่วยยกระดับศักยภาพใน การถ่ายเทแรงและเพิ่มสมรรถนะการรับน้ำหนักของชั้น โครงสร้างทางให้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสมชุดอื่น

ในทางตรงกันข้าม วัสดุผสมชุดตัวอย่าง B และ E ปรากฏลักษณะเส้นโค้งที่มีความชันสูงและมีการกระจายตัว ของขนาดเม็ดที่ไม่ต่อเนื่อง (Poorly-graded) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชุดตัวอย่าง B มีสัดส่วนของมวลรวมหยาบในปริมาณมาก ส่งผลให้ค่า D50 ขยับตัวสูงขึ้นไปอยู่ในช่วงประมาณ 6 ถึง 7 มิลลิเมตร ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะของวัสดุที่มีขนาดสม่ำเสมอ มากเกินไป พฤติกรรมดังกล่าวส่งผลให้เกิดปริมาณช่องว่าง ระหว่างเม็ดวัสดุที่กว้างขึ้น โครงสร้างขาดเสถียรภาพ และ ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างมวลรวมลดต่ำลง สำหรับ วัสดุผสมชุดตัวอย่าง F และ G พบว่าค่า D50 มีแนวโน้มลดลง มาอยู่ในช่วงประมาณ 3 ถึง 4 มิลลิเมตร โดยลักษณะของเส้น โค้งการกระจายตัวจัดอยู่ในระดับปานกลาง แม้ว่าจะมีการ กระจายของขนาดเม็ดที่ค่อนข้างเหมาะสมแต่ก็ยังไม่สามารถ จัดเรียงตัวได้สมบูรณ์และหนาแน่นเทียบเท่ากับชุดตัวอย่าง A, C และ D

ดังนั้นจากการประเมินลักษณะขนาดคละและค่า D50 จึงสามารถวิเคราะห์และสรุปได้ตามหลักวิชาการว่า วัสดุผสม ชุดตัวอย่าง A, C และ D เป็นสัดส่วนที่มีการกระจายขนาดเม็ด ที่เหมาะสมที่สุดและสอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานวัสดุชั้นพื้น ทาง ทำให้วัสดุกลุ่มดังกล่าวมีศักยภาพทางวิศวกรรมที่พร้อม สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในชั้นโครงสร้างทางได้ อย่างมีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยสูงสุดในการรับ น้ำหนักบรรทุก โดยลักษณะทางกายภาพของการกระจาย ขนาดเม็ดวัสดุในแต่ละชุดการทดสอบปรากฏรายละเอียด ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ผลการทดสอบขนาดเม็ดของวัสดุ

5.1.2 ผลการทดสอบค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก (Atterberg's limit) การประเมินพฤติกรรมของวัสดุภายใต้ความแปรปรวนของปริมาณความชื้นสามารถพิจารณาได้จากผลการทดสอบค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก ซึ่งประกอบด้วย ค่าขีดจำกัดของเหลว (Liquid Limit) ค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit) และค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity index) ปริมาณความชื้นในมวลรวมมีอิทธิพลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการบดอัดและโครงสร้างของวัสดุในเชิงอุตสาหกรรมงานทาง เนื่องจากเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับขีดจำกัด น้ำจะเข้าไปแทรกตัวระหว่างอนุภาคและทำให้ดินเปลี่ยนสถานะจากกึ่งของแข็งไปสู่สภาวะพลาสติกและของเหลวตามลำดับ ส่งผลให้เสถียรภาพและความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นทางลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.5-2545 และ ทล.ฉ. 501.6-2545 [25], [26] ซึ่งปรากฏผลการทดสอบดังรายละเอียดในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์กของวัสดุผสมแต่ละชุดการทดสอบ

ลำดับ	ค่าขีดจำกัด	ค่าขีดจำกัด	ค่าดัชนี
	เหลว	พลาสติก	พลาสติก
	(L.L.)	(P.L.)	(P.I.)
	%	%	%
ชุด A	35.39	21.12	3.91
ชุด B	-	-	-
ชุด C	22.95	13.98	8.97
ชุด D	21.43	15.31	6.12
ชุด E	20.30	14.24	6.06
ชุด F	19.20	-	19.20
ชุด G	17.50	-	17.50

จากตารางที่ 2 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) และความไวต่อน้ำของวัสดุผสม โดยพบว่าชุดตัวอย่าง A ซึ่งเป็นดินลูกรังล้วน มีค่าขีดจำกัดของเหลวสูงถึงร้อยละ 35.39 ซึ่งเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบทที่กำหนดไว้ว่าต้องมีค่าขีดจำกัดของเหลวไม่เกินร้อยละ 25 อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดแทนดินลูกรังด้วยวัสดุ RAP ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่าค่าขีดจำกัดของเหลวและค่าขีดจำกัดพลาสติกมีแนวโน้ม

ลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในชุดตัวอย่าง C (RAP ร้อยละ 10) ชุดตัวอย่าง D (RAP ร้อยละ 20) และชุดตัวอย่าง E (RAP ร้อยละ 30) ซึ่งมีค่าขีดจำกัดของเหลวลดลงมาอยู่ที่ร้อยละ 22.95 21.43 และ 20.30 ตามลำดับ การปรับลดลงนี้ส่งผลให้คุณสมบัติความไวต่อน้ำของวัสดุผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นชั้นโครงสร้างทางสำหรับชุดตัวอย่าง B ซึ่งใช้ RAP ร้อยละ 100 ไม่ปรากฏค่าความเป็นพลาสติก (Non-plastic) เนื่องจากคุณลักษณะทางกายภาพของผิวทางแอสฟัลต์เก่าที่ไม่มีสมบัติการอุ้มน้ำ ข้อมูลจากการทดสอบนี้เป็นเครื่องยืนยันทางวิศวกรรมว่าการนำวัสดุ RAP เข้ามาผสมร่วมกับดินลูกรังสามารถช่วยแก้ไขปัญหาดินที่มีความเป็นพลาสติกสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยช่วยควบคุมขีดจำกัดการอุ้มน้ำให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยและเพิ่มเสถียรภาพในการบดอัดให้แก่วัสดุผสมนวัตกรรมนี้

5.1.3 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ในกระบวนการก่อสร้างโครงสร้างชั้นพื้นทาง ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content หรือ OMC) และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density หรือ MDD) นับเป็นดัชนีทางวิศวกรรมที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการประเมินประสิทธิภาพการบดอัดและการพิจารณาคัดเลือกวัสดุ เพื่อให้มั่นใจว่าชั้นโครงสร้างจะมีความหนาแน่นเพียงพอในการรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างสมบูรณ์ และช่วยลดอัตราการยุบตัวของโครงสร้างในระยะยาว การประเมินค่าดังกล่าวดำเนินการผ่านการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยอาศัยพลังงานกลเพื่อไล่อากาศออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุ ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.2-2545 [28] ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความหนาแน่นของวัสดุผสมทั้ง 7 ชุดการทดสอบ (ชุด A ถึงชุด G) ได้ถูกรวบรวมและวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังในขั้นตอนถัดไป ซึ่งแสดงรายละเอียดความสัมพันธ์ของความหนาแน่นและปริมาณความชื้นในตารางที่ 3

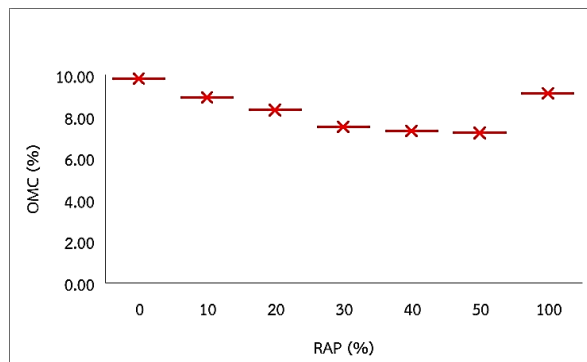
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุผสมแต่ละชุดการทดสอบ

ลำดับ	การบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน	
	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม %	ความหนาแน่นแห้ง g/cm ³
ชุด A	9.8	2.101
ชุด B	9.1	2.037
ชุด C	8.9	2.105
ชุด D	8.3	2.126
ชุด E	7.5	2.190
ชุด F	7.3	2.185
ชุด G	7.2	2.098

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเมื่อพิจารณาร่วมกับการวิเคราะห์การกระจายขนาดเม็ดดินจากค่าดัชนี Cu และ C_u พบว่าความหนาแน่นแห้งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับลักษณะการกระจายของเม็ดวัสดุผสม กล่าวคือ ชุดตัวอย่าง C, D และ E (ที่มีสัดส่วนวัสดุ RAP ร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ) มีค่าความหนาแน่นแห้งที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.2, 1.2 และ 4.2 ตามลำดับ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุละเอียด (Well-graded) เนื่องจากมีค่า Cu สูงและค่า C_u อยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามมาตรฐานงานทาง ลักษณะการกระจายขนาดเม็ดดินที่ดีเยี่ยมนี้ส่งผลให้อนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกตัวเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้โครงสร้างวัสดุเกิดการขัดถูและจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น (Interlocking) ลดช่องว่างภายใน และส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับชุดตัวอย่าง A ที่เป็นดินลูกรังเดิม ในทางตรงกันข้าม ชุดตัวอย่าง B, F และ G จัดเป็นวัสดุละเอียดไม่ดี (Poorly-graded) เนื่องจากมีค่า Cu ต่ำ หรือค่า C_u เบี่ยงเบนจากช่วงที่เหมาะสม แสดงถึงการกระจายขนาดที่ไม่มีประสิทธิภาพ มีขนาดเม็ดวัสดุใกล้เคียงกันหรือขาดช่วงของขนาดเม็ด ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุมากขึ้น แม้จะมีการเพิ่มปริมาณวัสดุ RAP แต่ไม่สามารถช่วยให้การเรียงตัวหนาแน่นขึ้นได้ จึงทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งมีแนวโน้มลดลงโดยเฉพาะในอัตราส่วนที่มีปริมาณ RAP สูง (ร้อยละ 40–50)

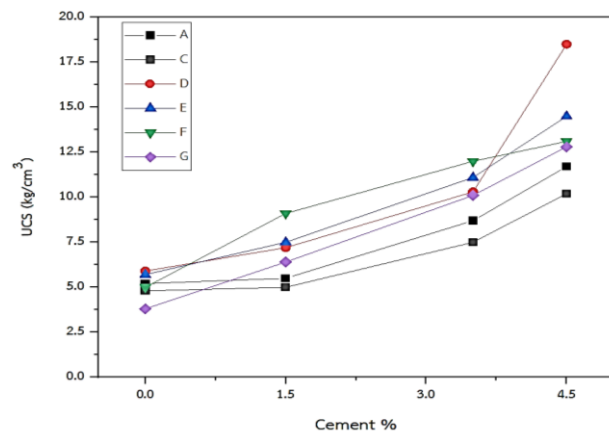
ในขณะที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content) พบว่ามีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องแปรผกผันกับปริมาณวัสดุ RAP ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะ

ทางกายภาพของวัสดุ RAP ที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ มีคุณสมบัติไม่ดูดซับน้ำ ร่วมกับการลดลงของสัดส่วนมวลละเอียดในดินลูกรังจึงทำให้ความต้องการปริมาณน้ำเพื่อการหล่อลื่นอนุภาคระหว่างการบดอัดลดลงตามลำดับ โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณความชื้นและความหนาแน่นของวัสดุผสมแต่ละชุดการทดสอบได้ถูกรวบรวมและแสดงรายละเอียดไว้ดังปรากฏในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุด

5.1.4 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (UCS) เป็นการประเมินความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเพื่อใช้ในทางชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.10-2545 หรือ AASHTO T208-15 [27] จากผลการทดสอบในตารางที่ 4 พบว่าชุดตัวอย่าง A, C, D, E, F และ G เมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 4.5 โดยน้ำหนักมีค่ากำลังอัดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณสารเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่ากำลังอัดสูงสุดในแต่ละชุดการทดสอบอยู่ที่ 11.7, 7.5, 10.3, 11.1, 12.0 และ 10.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ วิวัฒนาการของกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและการเกิดโครงสร้างผลึกที่ช่วยยึดโยงระหว่างมวลรวมดินและวัสดุ RAP ให้เป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงการเปรียบเทียบในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (UCS) ของวัสดุผสมแต่ละชุดการทดสอบ

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสม

No.	Unconfined Compressive Strength; UCS	
	Cement %	kg/cm2
A	0	5.2
	1.5	5.5
	3.0	8.7
	4.5	11.7
C	0	N/P
	1.5	4.8
	3.0	5.0
	4.5	7.5
D	0	10.2
	1.5	5.9
	3.0	7.2
	4.5	10.3
E	0	18.5
	1.5	5.7
	3.0	7.5
	4.5	11.1
F	0	14.5
	1.5	5.0
	3.0	9.1
	4.5	12.0
G	0	13.1
	1.5	3.8
	3.0	6.4

No.	Unconfined Compressive Strength; UCS	
	Cement	
	%	kg/cm ²
	4.5	10.1

5.1.5 ผลการทดสอบอัตราส่วนความแข็งแรงในการรับน้ำหนัก การทดสอบค่าอัตราส่วนความแข็งแรงในการรับน้ำหนัก (CBR) เป็นดัชนีชี้วัดสมรรถนะที่สำคัญในการประเมินขีดความสามารถในการรับแรงแบกทานของนวัตกรรมวัสดุผสมเพื่อใช้ในงานโครงสร้างทาง กระบวนการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.3-2545 [29] โดยจัดเตรียมตัวอย่างที่ระดับความหนาแน่นแห้งร้อยละ 95 ของการบดอัดสูงสุด (95% Maximum dry density) เพื่อจำลองสภาวะการใช้งานจริงในภาคสนาม ผลการวิเคราะห์สมรรถนะการรับกำลังและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุผสมแสดงรายละเอียดในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบค่าซีพีอาร์และการบวมตัวของวัสดุผสมแต่ละชุดการทดสอบ

No.	ความหนาแน่นแห้ง		ค่า CBR	การบวมตัว
	Cement	ที่บดอัด 95 %		
	%	g/cm ³	%	%
A	0	1.995	20.87	16.31
	1.5	1.982	54.57	8.60
	3.0	2.031	135.66	3.91
	4.5	1.992	195.66	3.44
C	0	2.022	21.94	7.75
	1.5	2.011	72.02	7.74
	3.0	2.000	152.52	6.49
	4.5	2.009	189.40	6.45
D	0	2.096	12.6	17.23
	1.5	2.021	64.58	8.66
	3.0	2.002	148.87	5.16
	4.5	2.018	196.24	3.45
E	0	1.988	19.64	15.91
	1.5	2.024	64.04	7.44
	3.0	2.007	106.68	6.05
	4.5	2.052	222.42	5.19

No.	ความหนาแน่นแห้ง		ค่า CBR	การบวมตัว
	Cement	ที่บดอัด 95 %		
	%	g/cm ³	%	%
F	0	2.156	19.01	6.73
	1.5	2.071	65.62	2.59
	3.0	2.056	135.86	2.57
	4.5	2.287	191.71	0.69
G	0	1.999	17.34	11.16
	1.5	2.033	70.26	6.05
	3.0	2.050	126.50	3.46
	4.5	2.017	168.60	3.45

หมายเหตุ: ชุด B (RAP 100%) ไม่สามารถดำเนินการบดอัดและทดสอบตามมาตรฐานนี้ได้เนื่องจากขาดวัสดุประสาน

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการแปรผันปริมาณปูนซีเมนต์และสัดส่วนของวัสดุ RAP มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมรรถนะเชิงกลและเสถียรภาพทางปริมาตร เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 4.5 ค่าซีพีอาร์ของทุกชุดการทดสอบมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งอธิบายได้จากกลไกการก่อตัวของสารประกอบยึดประสานเชิงโครงสร้าง (Cementitious products) ที่ช่วยยึดเกาะระหว่างมวลรวม [18], [19], [30] โดยชุดการทดสอบ E (RAP ร้อยละ 30 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 4.5) พัฒนาค่าซีพีอาร์ได้สูงสุดถึงร้อยละ 222.42 นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และวัสดุ RAP ที่เหมาะสมช่วยลดอัตราการบวมตัว (Swelling) ของวัสดุลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งข้อมูลสมรรถนะการรับแรงทั้งหมดได้ถูกสรุปและเปรียบเทียบในรูปแบบแผนภาพกราฟิกดังปรากฏในภาพที่ 5

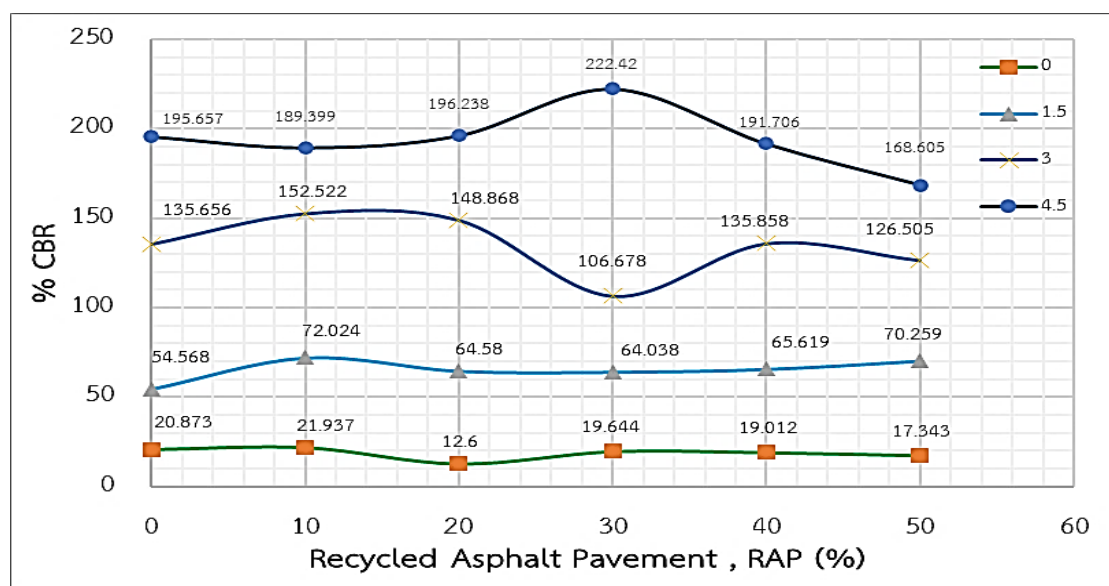
ในการปรับปรุงเนื้อหาส่วนผลการวิจัยและอภิปรายผล (Results and discussion) เพื่อให้สอดคล้องกับแนวทางของวารสารนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (AJIT) โดยยึดตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิและหลักเกณฑ์การเขียนภาษาไทยเชิงวิชาการที่คุณกำหนดไว้ มีรายละเอียดการปรับปรุงและขยายความข้อมูลดังนี้

ในด้านการเปลี่ยนแปลงปริมาตรพบว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ส่งผลให้ค่าการบวมตัว (Swelling) ของวัสดุผสมมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกชุดการทดสอบ ซึ่งแสดงถึงเสถียรภาพทางวิศวกรรมที่เพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุต้องเผชิญกับสถานะความชื้นสูง โดยเฉพาะในชุดการทดสอบ F ที่ระดับปูนซีเมนต์ร้อยละ 4.5 มีค่าการบวมตัวต่ำที่สุดเพียงร้อยละ 0.69 พฤติกรรมดังกล่าวยืนยันว่าการใช้ปูนซีเมนต์ไม่เพียงแต่ช่วยยกระดับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแต่ยังช่วยควบคุมพฤติกรรมการพองตัวของดินลูกรังได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลเชิงลึกด้านการพัฒนากำลังและการลดอัตราการบวมตัวนี้เป็นตัวบ่งชี้สำคัญที่ยืนยันความเหมาะสมของวัสดุนวัตกรรมในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นพื้นทางตามเกณฑ์มาตรฐานงานทางที่ปรากฏรายละเอียดเชิงเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 5

พฤติกรรมการรับกำลังของวัสดุผสมเชิงประกอบระหว่างดินลูกรังและวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) เมื่อผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 0 1.5 3 และ 4.5 แสดงรายละเอียดการเปลี่ยนแปลงดังปรากฏในภาพที่ 4 ผลการทดสอบระบุว่า การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความแข็งแรงในการรับน้ำหนักหรือค่าซีบีอาร์ (CBR) ของทุกชุดอัตราส่วนผสมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน พฤติกรรมดังกล่าวเป็นผลสืบเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบโครงสร้างร่างแหในรูปของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate

Hydrate: C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate: C-A-H) [18], [19] โดยสารประกอบเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานที่มีประสิทธิภาพสูงเข้าห่อหุ้มและยึดเกาะระหว่างเม็ดดินลูกรังกับอนุภาคของวัสดุ RAP ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคภายในมีความหนาแน่นและมีเสถียรภาพในการถ่ายเทน้ำหนักบรรทุกได้ดียิ่งขึ้นตามปริมาณของสารเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้น [30]

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกพบว่าที่ระดับการใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 4.5 ให้ค่าซีบีอาร์สูงที่สุดในทุกสัดส่วนการแทนที่ของวัสดุ RAP โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชุดการทดลอง E (สัดส่วนวัสดุ RAP ร้อยละ 30) ซึ่งให้ค่าสมรรถนะการรับกำลังสูงสุดที่ร้อยละ 222.42 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดตัวอย่างควบคุม A (ดินลูกรังร้อยละ 100) พบว่ามีค่ากำลังเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 13.67 ข้อมูลเชิงประจักษ์นี้แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ดินลูกรังด้วยวัสดุ RAP ในสัดส่วนร้อยละ 30 ร่วมกับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เป็นสัดส่วนที่เกิดกระบวนการขัดประสานระหว่างมวลรวม (Aggregate interlocking) ได้อย่างเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ยังส่งผลโดยตรงต่อการลดค่าการบวมตัวของวัสดุผสม ซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางปริมาตรและความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นโครงสร้างทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยลักษณะการพัฒนากำลังรับน้ำหนักของวัสดุผสมในแต่ละอัตราส่วนได้ถูกสรุปและแสดงผลไว้ในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์และค่าซีบีอาร์ของวัสดุผสมแต่ละอัตราส่วนผสม

5.1.6 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังจากแหล่งวัสดุในพื้นที่จังหวัดปัตตานีด้วยเทคนิคการเรืองแสงรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence: XRF) พบว่าสารประกอบหลักคือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 75.99 และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 15.27 ในขณะที่แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ปรากฏเพียงร้อยละ 0.05 สัดส่วนของ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในมวลดินนี้มีบทบาทสำคัญในการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์เพื่อเกิดกระบวนการไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลังอัดและเสถียรภาพของวัสดุผสมในระยะยาว [30] โดยรายละเอียดขององค์ประกอบทางเคมีทั้งหมดปรากฏดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังจากแหล่งวัสดุจังหวัดปัตตานี

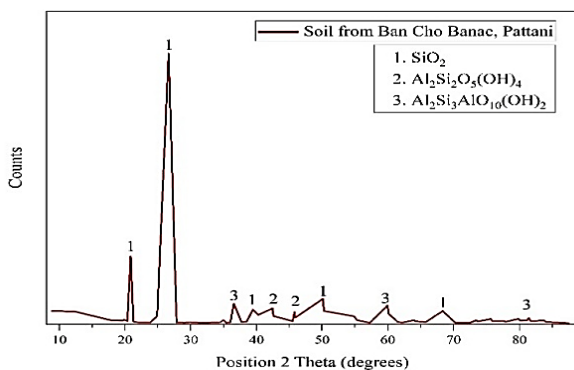
สารประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ดินลูกรังจากแหล่งวัสดุ จังหวัดปัตตานี
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	75.99
อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3)	15.27
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	2.44
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.05
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	0.012

สารประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ดินลูกรังจากแหล่งวัสดุ จังหวัดปัตตานี
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.75
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.03

จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังจากบ่อขุดในพื้นที่จังหวัดปัตตานีโดยภาพรวมประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์หลักที่เอื้อต่อการปรับปรุงคุณภาพ โดยค่าซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ที่มีปริมาณสูงบ่งชี้ว่ามวลดินมีศักยภาพในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ได้ดีเมื่อมีการเติมสารกระตุ้นที่มีแคลเซียมเป็นส่วนประกอบ อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ได้ระบุถึงคุณลักษณะทางเคมีที่สำคัญ 2 ประการที่จำเป็นต้องได้รับการพิจารณาในการพัฒนาเป็นวัสดุชั้นพื้นทาง คือ 1) ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำ โดยมีค่าเฉลี่ยเพียงร้อยละ 0.05 ซึ่งแสดงถึงสภาวะการขาดแคลนสารเชื่อมประสานตามธรรมชาติในมวลดิน หากนำดินลูกรังนี้ไปใช้เป็นโครงสร้างชั้นพื้นทางโดยตรงจะส่งผลให้ชั้นทางขาดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคและเกิดการเสถียรภาพได้ง่าย และ 2) สัดส่วนของซิลิกาและอลูมินาที่มีปริมาณรวมกันสูงกว่าร้อยละ 91 เป็นตัวบ่งชี้ว่าการพัฒนากำลังอัดของวัสดุผสมจะขึ้นอยู่กับการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมจากปูนซีเมนต์

ภายนอกเพื่อสร้างสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาค [30] ดังนั้น ดินลูกรังจากแหล่งวัสดุนี้จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับวัสดุ RAP ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้มั่นใจในสมรรถนะเชิงอุตสาหกรรมและความปลอดภัยของโครงสร้างทางหลวงชนบท ซึ่งสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังได้ถูกรวบรวมและแสดงผลการวิเคราะห์ไว้ในตารางที่ 6

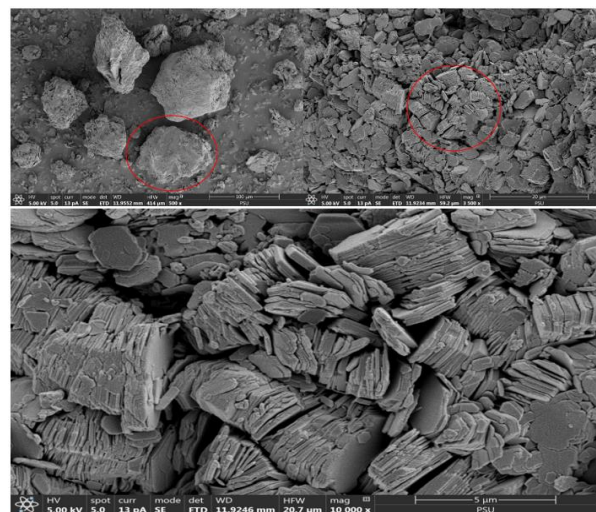
5.1.7 การวิเคราะห์โครงสร้างทางแร่ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ (Mineralogical analysis) ของวัสดุดินลูกรังจากบ่อยืมในพื้นที่จังหวัดปัตตานีด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) พบว่าดินลูกรังมีองค์ประกอบทางแร่ที่สำคัญ ได้แก่ แร่ควอตซ์ หรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) แร่เคลโอไลต์ (Kaolinite) และแร่อีลไลต์ (Illite) การจัดเรียงตัวและสัดส่วนของแร่เหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของดินเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงและเสถียรภาพของวัสดุชั้นทางในเชิงอุตสาหกรรม การปรากฏของแร่ซิลิกาและอะลูมิเนียมซิลิเกตในปริมาณสูงเป็นปัจจัยสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาพอซโซลานเมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมจากปูนซีเมนต์ ก่อให้เกิดสารประกอบยึดประสานที่ช่วยเพิ่มสมรรถนะการรับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ยืนยันองค์ประกอบแร่ของดินลูกรังปรากฏรายละเอียดชัดเจนดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของดินลูกรัง (XRD Pattern)

5.1.8 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphological analysis) ของดินลูกรังผ่านเทคโนโลยีกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าแร่เคลโอไลต์มีลักษณะทางกายภาพเป็นแผ่นซ้อนทับกัน (Stacked flakes) และมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอรวมตัวกันเป็นมวลหนาแน่น ลักษณะดังกล่าวสะท้อนถึงโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูงซึ่งเอื้อต่อกระบวนการยึดเกาะระหว่างเม็ดดินและสารยึดประสานในระบบวัสดุผสมเชิงประกอบ เมื่อมีการเติมปูนซีเมนต์และวัสดุ RAP เข้าไปในระบบ โครงสร้างเหล่านี้จะถูกหล่อหุ้มด้วยเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมี ช่วยเติมเต็มช่องว่างและเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลภาพถ่ายกำลังขยายสูงที่แสดงรายละเอียดพื้นผิวและลักษณะสัณฐานวิทยาเชิงลึกของดินลูกรังปรากฏรายละเอียดดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 สัณฐานวิทยาของดินลูกรังจากการส่องกราดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

ผลการวิเคราะห์ทั้งในระดับองค์ประกอบแร่และระดับโครงสร้างจุลภาคมีความสอดคล้องเชิงทฤษฎีและสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินลูกรังได้อย่างครบถ้วน โดยชี้ให้เห็นว่าแม้ดินชนิดนี้จะมีข้อจำกัดด้านความแข็งแรงตามธรรมชาติแต่มีศักยภาพสูงในการนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยนวัตกรรมวัสดุผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความทนทานของโครงสร้างงานทางอุตสาหกรรมในระยะยาว

การวิจัยครั้งนี้ได้ประเมินศักยภาพของการนำดินลูกรังมาบูรณาการร่วมกับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) และปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อยกระดับเป็นวัสดุทางเลือกในงานวิศวกรรมทาง จากการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลเชิงลึกพบว่าขีดจำกัดในการแทนที่ดินลูกรังด้วยวัสดุ RAP ที่เหมาะสมที่สุดไม่ควรเกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ RAP ที่ระดับร้อยละ 40 และ 50 ส่งผลให้สัดส่วนของมวลละเอียดลดลงอย่างมีนัยสำคัญจนไม่สามารถดำเนินการบดอัดให้เกิดความหนาแน่นสูงสุดตามเกณฑ์มาตรฐานได้ และนำไปสู่การถดถอยของสมรรถนะการรับแรงอัดและค่าซีบีอาร์ ในขณะที่การแทนที่ในระดับร้อยละ 10 20 และ 30 ร่วมกับการใช้ปูนซีเมนต์ช่วยให้เกิดกระบวนการอัดประสานของมวลรวมและการจัดเรียงตัวของอนุภาคที่หนาแน่นที่สุด ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลมีความพร้อมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพตามมาตรฐานงานทางหลวงชนบท โดยข้อมูลสรุปความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของวัสดุผสมทั้งหมดได้ถูกนำเสนอและเปรียบเทียบเชิงวิเคราะห์ไว้ในส่วนสรุปผลการวิจัย

5.2 การประเมินสมรรถนะของวัสดุผสมเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานงานทาง จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อประเมินความสอดคล้องกับมาตรฐานงานทาง (มทข. 203-2557) พบว่าพฤติกรรมทางกายภาพของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญตามสัดส่วนการแทนที่ของวัสดุ RAP โดยในชุดตัวอย่างควบคุม A ซึ่งเป็นดินลูกรังร้อยละ 100 ปรากฏค่าขีดจำกัดของเหลวสูงถึงร้อยละ 35.39 ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 25 อย่างไรก็ตาม เมื่อดำเนินการแทนที่ด้วยวัสดุ RAP ในสัดส่วนร้อยละ 10 ถึง 30 พบว่าค่าขีดจำกัดของเหลวของชุดตัวอย่าง C D และ E ปรับลดลงเหลือร้อยละ 22.95 21.43 และ 20.30 ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้คุณลักษณะของวัสดุผสมผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดด้านคุณสมบัติทางฟิสิกส์อย่างครบถ้วนตามเกณฑ์ของกรมทางหลวงชนบท ในมิติด้านสมรรถนะการรับกำลังพบว่าชุดตัวอย่าง C และ D ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 สามารถพัฒนาค่าซีบีอาร์ (CBR) ได้สูงถึง

ร้อยละ 152.52 และ 148.87 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำสำหรับวัสดุชั้นพื้นทางอย่างชัดเจน ผลการวิจัยจึงเป็นเครื่องยืนยันเชิงประจักษ์ว่าการใช้อัตราส่วนผสมดังกล่าวร่วมกับสารเชื่อมประสานสามารถตอบสนองต่อข้อกำหนดเชิงคุณภาพของหน่วยงานภาครัฐได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีรายละเอียดการเปรียบเทียบค่าดัชนีทางวิศวกรรมที่สำคัญปรากฏในตารางที่ 2 และตารางที่ 4

5.3 การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรและข้อมูลสนับสนุนทางวิศวกรรมเพื่อการนำไปใช้งานจริง ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุมระบุว่าปริมาณวัสดุ RAP และความเข้มข้นของปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักที่กำหนดประสิทธิภาพเชิงกลของส่วนผสม โดยปริมาณวัสดุ RAP ที่เหมาะสมที่สุดต่อกระบวนการบดอัดเชิงกลคือร้อยละ 10 ถึง 30 เนื่องจากช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเรียงอนุภาคจนสามารถยกระดับค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดได้ โดยเฉพาะในชุดตัวอย่าง E (RAP ร้อยละ 30) ที่ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดถึง 2.190 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือมีอัตราการเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.23 เมื่อเปรียบเทียบกับดินลูกรังปกติ ในขณะที่การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลังรับน้ำหนักและความคงทนผ่านการก่อตัวของสารประกอบไฮเดรตในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 75.99 และอลูมินาออกไซด์ร้อยละ 15.27 อันเป็นสารตั้งต้นสำคัญในปฏิกิริยาปอซโซลาน [30] ข้อมูลเชิงลึกทั้งมิติด้านวิศวกรรมทางและลักษณะทางเคมีที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ สามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนที่สำคัญสำหรับการเลือกใช้วัสดุผสมระหว่าง RAP และดินลูกรังเป็นทางเลือกนวัตกรรมสำหรับงานก่อสร้างทาง ซึ่งช่วยยกระดับสมรรถนะของโครงสร้างทางหลวงชนบทและเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการวัสดุเหลือทิ้งจากการซ่อมบำรุงผิวทางให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเป็นระบบ โดยความสัมพันธ์ของตัวแปรควบคุมและการพัฒนากำลังรับน้ำหนักได้ถูกสรุปและแสดงผลเชิงวิเคราะห์ไว้ในภาพที่ 3 และภาพที่ 4

6. สรุปผลและอภิปรายผล

จากการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางวิศวกรรมอย่างครอบคลุมตามวัตถุประสงค์การวิจัย สามารถสรุปประเด็นสำคัญและอภิปรายผลการวิจัยโดยเชื่อมโยงกับหลักการทางวิศวกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

6.1 สรุปผล ผลการวิจัยยืนยันว่าวัสดุผสมเชิงประกอบระหว่างดินลูกรังและวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) จากพื้นที่จังหวัดปัตตานี มีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการพัฒนาเป็นวัสดุนวัตกรรมสำหรับงานทางหลวงชนบท เนื่องจากสามารถพัฒนาค่าอัตราส่วนความแข็งแรงในการรับน้ำหนัก (CBR) ได้สูงสุดถึงร้อยละ 222.42 ในชุดการทดลอง E (RAP ร้อยละ 30 ปูนซีเมนต์ร้อยละ 4.5) ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมร้อยละ 13.67 แม้คุณภาพดินลูกรังเดิมจะมีค่าขีดจำกัดของเหลวสูงถึงร้อยละ 35.39 แต่เมื่อทดแทนด้วย RAP ในสัดส่วนร้อยละ 10 ถึง 30 ค่าดังกล่าวลดลงเหลือร้อยละ 20.30 ถึง 22.95 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มทข. 203-2557 สำหรับวัสดุชั้นพื้นทางอย่างชัดเจน นอกจากนี้ งานวิจัยยังนำไปสู่นวัตกรรม “Pattani RAP-Laterite Stabilization” ที่ใช้กลยุทธ์การแทนที่มวลละเอียดที่ไวต่อน้ำด้วยวัสดุผิวทางเดิมร่วมกับการสร้างพันธะทางเคมีด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 3 ถึง 4.5 เพื่อเสริมสร้างเสถียรภาพเชิงโครงสร้างโดยไม่ต้องพึ่งพามวลรวมหินคลุกคุณภาพสูงที่มีต้นทุนการขนส่งเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์สมรรถนะเชิงกลพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ทางวิศวกรรมและการสร้างประสิทธิภาพในการบริหารจัดการเศษวัสดุงานทางในระยะยาวเชิงประจักษ์

6.2 อภิปรายผล จากข้อสรุปเบื้องต้นสามารถนำมาอภิปรายผลในประเด็นสำคัญต่าง ๆ โดยเชื่อมโยงกับหลักการทางวิศวกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

6.2.1 ศักยภาพและการขัดประสานเชิงโครงสร้างของวัสดุผสม Suebsuk, et al. [10] ระบุว่า การใช้ RAP เข้าไปแทนที่มวลละเอียดที่ไวต่อน้ำในสัดส่วนที่พอเหมาะจะช่วยยกระดับความหนาแน่นแห้งสูงสุดและเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายแรงเชิงโครงสร้าง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาความเหมาะสมของลักษณะขนาดผลในชุดตัวอย่าง C และ D ที่เป็นไปตามแนวคิดการเพิ่มเสถียรภาพมวลรวมด้วยวิธีเชิงกล

(Mechanical stabilization) โดยเน้นการจัดเรียงอนุภาคแบบต่อเนื่อง (Well-graded) เพื่อให้เกิดแรงขัดประสานระหว่างมวลรวม (Aggregate interlocking) การที่ค่าขีดจำกัดของเหลว (LL) ลดลงเหลือร้อยละ 20.30 ถึง 22.95 เมื่อเปรียบเทียบกับดินลูกรังดั้งเดิมที่มีค่า LL สูงถึงร้อยละ 35.39 ถือเป็นการแก้ไขปัญหาความเปราะบางต่อความชื้นได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้สภาพความเป็นพลาสติกอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มทข. 203-2557 อันเป็นปัจจัยวิกฤต (Critical factor) ที่ช่วยป้องกันการเสียรูของชั้นพื้นทางภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกหนัก [10]

6.2.2 นวัตกรรมพัฒนาการกำลังด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชัน Amadi, et al. [19] และ Nafissatou, et al. [30] พบว่า กระบวนการก่อตัวของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) จะเข้าไปทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสาน (Binding agent) ระหว่างผิวสัมผัสของมวลรวมดินและวัสดุ RAP ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนาการรับน้ำหนักของวัสดุผสมผ่านค่า CBR ที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเติมปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 ถึง 4.5 โดยเป็นการประยุกต์ใช้หลักการสร้างร่างแหยึดเกาะ (Cementitious bonding) ที่มีประสิทธิภาพสูง นวัตกรรมนี้โดดเด่นด้วยการเปลี่ยนพฤติกรรมวัสดุจากมวลรวมร่วน (Granular material) ไปสู่มวลรวมเชื่อมประสาน (Stabilized material) ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยยกระดับกำลังรับแรงเพียงอย่างเดียว แต่ยังช่วยลดอัตราการบวมตัว (Swelling) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของ Ayoola และ Philip [6] ที่ใช้เถ้ากระดุกว้าวเป็นส่วนผสมเพิ่ม โดยยืนยันว่าการใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่กำหนดช่วยสร้างความมั่นคงเชิงปริมาตรให้กับชั้นทางในพื้นที่ที่มีสภาพภูมิอากาศแบบฝนชุกได้ [6], [19], [30]

6.2.3 ความคุ้มค่าเชิงวิศวกรรมและการจัดการวัสดุหมุนเวียน กรมทางหลวงชนบท [3] กำหนดแนวทางเกี่ยวกับการนำวัสดุทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ (In-place recycling) ซึ่งสอดคล้องกับการบูรณาการเศษวัสดุชุดไสผิวทางเดิม (RAP) ร่วมกับดินลูกรังภายใต้โมเดลการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ในการศึกษาครั้งนี้ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าด้านต้นทุนวัสดุและการลดภาระงบประมาณในการจัดหาหินคลุก

จากแหล่งใกล้เคียง โดยสัดส่วนการแทนที่ RAP ร้อยละ 30 (ชุดตัวอย่าง E) ให้ประสิทธิภาพการบดอัดสูงสุดและมีค่าความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.23 เมื่อเทียบกับดินลูกรังปกติ นับเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบแนวทางใหม่จากการมองเศษวัสดุผิวทางเป็นขยะไปสู่การบริหารจัดการทรัพยากรที่มีอยู่อย่างชาญฉลาดและคุ้มค่า ซึ่งเป็นการตอบสนองต่อเป้าหมายการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่คำนึงถึงขีดจำกัดของทรัพยากรธรรมชาติในพื้นที่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด [3]

6.3 องค์ความรู้ใหม่ที่ได้จากการวิจัย งานวิจัยเรื่อง “ชั้นพื้นทางจากส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์นำกลับมาใช้ใหม่และดินลูกรังผสมกับซีเมนต์” ก่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในบริบทของวิศวกรรมงานทางและการจัดการนวัตกรรมวัสดุอุตสาหกรรม ดังนี้

6.3.1 นวัตกรรมกระบวนการผสมผสานวัสดุ งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีผสมวัสดุในรูปแบบ “การปรับเสถียรวัสดุผสมแบบไฮบริด (Hybrid Material Stabilization Model)” ซึ่งประยุกต์ใช้หลักการเจือจางคุณสมบัติทางกายภาพที่ไม่พึงประสงค์ของดินลูกรังด้วยวัสดุ RAP ที่มีคุณสมบัติไม่ดูดซับน้ำ (Hydrophobic) ผลการศึกษาในเชิงประจักษ์แสดงให้เห็นว่ากระบวนการนี้สามารถควบคุมค่าดัชนีพลาสติก (PI) และค่าขีดจำกัดของเหลว (LL) ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กรมทางหลวงชนบทกำหนดได้โดยไม่ต้องพึ่งพาสารผสมเพิ่มทางเคมีที่มีราคาสูง จึงถือเป็นต้นแบบ (Model) สำหรับแนวทางการบริหารจัดการวัสดุในพื้นที่จังหวัดปัตตานีและพื้นที่ใกล้เคียงที่มีข้อจำกัดด้านแหล่งวัสดุธรรมชาติคุณภาพสูง

6.3.2 องค์ความรู้เชิงบริบทโครงสร้างจุลภาค แนวทางการจัดการสมรรถนะชั้นพื้นทางผ่านการวิเคราะห์โครงสร้างแร่ธาตุ มุ่งเน้นการออกแบบนวัตกรรมวัสดุที่สอดคล้องกับลักษณะทางธรณีวิทยาเฉพาะถิ่นของพื้นที่จังหวัดปัตตานี โดยการตรวจพบแร่ควอตซ์และแคลไซต์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนทับกัน (Stacked flakes) ผ่านเทคนิค SEM ชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างดังกล่าวจำเป็นต้องได้รับสารเชื่อมประสานในระดับวิกฤต (Critical Dosage) ที่ร้อยละ 3 เพื่อให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดการยึดเกาะที่สมบูรณ์และแข็งแรง อันเป็นปัจจัยชี้ขาดสำคัญต่อความเสถียรของโครงสร้างถนนในพื้นที่ที่มี

อิทธิพลจากสภาพดินกรดและดินพรุซึ่งมักส่งผลกระทบต่อความทนทานของวัสดุงานทาง

6.3.3 ประสิทธิภาพการรับน้ำหนักแบบยกระดับ

การเสริมสร้างความมั่นคงทางโครงสร้างผ่านนวัตกรรมการกระจายความเสี่ยงด้วยวัสดุทางเลือก ช่วยเปลี่ยนมุมมองจากการพึ่งพามวลรวมธรรมชาติเพียงอย่างเดียวไปสู่การเพิ่มมูลค่าวัสดุหมุนเวียนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยผลการวิเคราะห์สมรรถนะระบุว่าแนวทางนี้ช่วยขยายอายุการใช้งานของโครงสร้างทางและลดโอกาสการเกิดร่องล้อ (Rutting) ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยในการบำรุงรักษาต่อหน่วย (Unit maintenance cost) มีความคุ้มค่าสูงกว่าการก่อสร้างด้วยวิธีดั้งเดิม นับเป็นการบริหารจัดการทรัพยากรเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องในระยะยาวของการคมนาคมขนส่งในระดับท้องถิ่นและเกิดประโยชน์สูงสุดในเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

7.1.1 ควรขยายขอบเขตการศึกษาวิจัยไปยังแหล่งดินลูกรังที่หลากหลายหรือดินที่มีคุณสมบัติไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานทางในหลายพื้นที่ เพื่อประเมินขีดความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุด้วยวัสดุ RAP และปูนซีเมนต์ในสถานะที่แตกต่างกัน รวมถึงควรดำเนินการทดสอบในแปลงทดสอบจริงในภาคสนามเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของพฤติกรรมทางวิศวกรรมระหว่างผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับสถานะการใช้งานจริงภายใต้การบรรทุกน้ำหนักจราจรหนักในเชิงอุตสาหกรรมก่อสร้าง

7.1.2 ควรมีการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับอิทธิพลของขนาดมวลรวมวัสดุ RAP โดยการแยกวิเคราะห์สมรรถนะของส่วนที่เป็นมวลรวมหยาบและมวลละเอียด เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบที่มีต่อความหนาแน่นและกำลังรับน้ำหนักของส่วนผสมอย่างชัดเจน ซึ่งข้อมูลที่ได้จะช่วยในการกำหนดมาตรฐานการคัดขนาดวัสดุ RAP ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดก่อนนำไปใช้ในกระบวนการผลิตวัสดุชั้นพื้นทางเชิงอุตสาหกรรม

7.1.3 ควรจัดให้มีการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์อย่าง

ต่อเนื่อง เพื่อศึกษาการก่อตัวของสารประกอบไฮเดรตในรูปของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตที่ทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาค ข้อมูลนี้จะช่วยอธิบายกลไกการพัฒนากำลังรับน้ำหนักและพฤติกรรมการบวมตัวของวัสดุในระดับลึกได้อย่างมีหลักวิชาการและมีความชัดเจนยิ่งขึ้น

7.2 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

7.2.1 หน่วยงานที่รับผิดชอบงานก่อสร้างและซ่อมบำรุงทางควรนำอัตราส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจากผลการวิจัย เช่น ชุดตัวอย่าง C D และ E มาประยุกต์ใช้เป็นทางเลือกนวัตกรรมในการผลิตวัสดุชั้นพื้นทาง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ประสบปัญหาขาดแคลนวัสดุมวลรวมธรรมชาติ เพื่อลดข้อจำกัดด้านงบประมาณและระยะเวลาในการขนส่งวัสดุจากแหล่งอื่น

7.2.2 ควรมีการแจ้งเกณฑ์มาตรฐานทางวิศวกรรมที่ได้จากการศึกษา เช่น ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ให้แก่เจ้าหน้าที่ผู้ควบคุมงานและผู้ปฏิบัติงานทราบ เพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดในการตรวจสอบคุณภาพการบดอัดในภาคสนามให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับคุณสมบัติของวัสดุผสมนวัตกรรมนี้

7.2.3 ควรส่งเสริมให้มีการนำเศษวัสดุจากการขุดไผ่ผิวทางเดิมมาหมุนเวียนใช้งานอย่างต่อเนื่องตามแนวทางการจัดการทรัพยากรเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งนอกจากจะช่วยลดภาระในการจัดหาพื้นที่กักเก็บวัสดุเหลือทิ้งแล้ว ยังช่วยยกระดับเสถียรภาพของโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่ห่างไกลได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณต่อสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนที่มอบให้อย่างต่อเนื่อง และขอขอบคุณหน่วยงานต้นสังกัดที่ให้การส่งเสริมและสนับสนุนจนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chotikakrai, J. 2014. *Highway Engineering*, 5th ed. Bangkok: Kasetsart University Press. (in Thai)
- [2] Aydogmus, T. 2004. "Investigation of interaction behaviour of cement-stabilized cohesive soil and PVA geogrids," in *Proceedings of the 3rd European Geosynthetics Conference*, pp. 559-564. [Online]. Available: <https://www.geosyntheticsociety.org/>
- [3] Department of Rural Roads. 2014. *Standard No. 242-2557 In-Place Recycling of Existing Pavement Materials*. Bangkok: Department of Rural Roads. (in Thai)
- [4] Lambe, T. W. 1959. "Physico-chemical properties of soils: Role of soil technology," *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 85(2): pp. 1-55. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1061/JSE.1959.014>
- [5] Sukprasert, S. 2017. "Application of natural rubber and soil-cement for road construction," Master's thesis, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. [Online]. Available: <https://ir.sut.ac.th/> (in Thai)
- [6] Ayoola, A. and Philip, A. 2023. "Stabilization of lateritic soil for road application using lime and cow bone ash," *Journal of Engineering Research and Reports*, 25(6): pp. 109-121. [Online]. Available: <https://doi.org/10.9734/jerr/2023/v25i6929>

- [7] Montepara, A. and et al. 2012. "Effect on pavement performance of a subbase layer composed by natural aggregate and RAP," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53: pp. 981-990. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.947>
- [8] Chattanajai, P. and et al. 2023. "Effect of temperature on recycled asphalt concrete pavement mixed with lateritic soil," *Journal of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin*, 5(3): pp. 55-63. [Online]. Available: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutr/> (in Thai)
- [9] Wangno, P. 2017. "Improvement of recycled asphalt concrete pavement using calcium carbide residue and fly ash," Master's thesis, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. [Online]. Available: <https://ir.sut.ac.th/> (in Thai)
- [10] Suebsuk, J. and et al. 2016. "Unconfined compressive strength and microstructure of marginal lateritic soil improved with recycled asphalt pavement and cement," *KMITL Engineering Journal*, 33(2): pp. 112-116. [Online]. Available: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/kmitlj/> (in Thai)
- [11] Rungreang, T. 2013. "Improvement of cement-treated crushed rock base mixed with reclaimed asphalt concrete using portland cement," Master's thesis, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. [Online]. Available: <https://ir.sut.ac.th/> (in Thai)
- [12] Charitngam, S. 2014. "Use of lateritic soil-cement for road rehabilitation after flooding," Research report. Nakhon Si Thammarat, Thailand: Nakhon Si Thammarat Rajabhat University. (in Thai)
- [13] Kaewma, P. and et al. 2022. "Effect of temperature on the performance of subbase materials containing reclaimed asphalt pavement," in *Proceedings of the 27th National Convention on Civil Engineering (NCCE 27)*, paper No. GTE51, pp. 1-8. (in Thai)
- [14] Htet, O. K. and Nyam, M. K. 2025. "Stabilization of lateritic soil using cement and lime for road construction," *Innovation in Engineering*, 2(1): pp. 31-43. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3785/innovation.2025.1>
- [15] Mills, W. H. 1936. "Stabilizing soils with Portland cement, experiments by South Carolina Highway Department," *Highway Research Board Proceedings*, 16: pp. 322-347.
- [16] Ngernphrom, N. 2010. "Study on the properties of pavement base materials mixed with lateritic soil, Portland cement, and steel slag," *Journal of Research, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon*. [Online]. Available: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutp/> (in Thai)
- [17] Agus, S. M. and et al. 2013. "Engineering properties of silty soil stabilized with lime and rice husk ash and reinforced with waste plastic fiber," *Journal of Materials in Civil*

- Engineering*, 25(9). [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000659](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000659)
- [18] Wahab, N. A. and et al. 2015. "Effects of cement on the compaction properties of lateritic soil," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1153. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1153/1/012015>
- [19] Amadi, A. A. and et al. 2025. "Stabilization characteristics of cement soil produced with selected cement types," *Cement*, 19: pp. 1-15. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cement.2025.100019>
- [20] Boonthifong, B. and et al. 2016. "Improvement of subbase materials below standard using Portland cement and FGD gypsum," *Engineering Journal Chiang Mai University*: pp. 139-151. [Online]. Available: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/engcmu/> (in Thai)
- [21] Khirirat, C., Keesawatkorn, P. and Rungsakthaweekul, T. 2021. "Improvement of lateritic soil using bottom ash geopolymer for pavement applications," Research report. (in Thai)
- [22] Joseph, E. E., Adrian, O. E. and Onah, A. 2012. "Lateritic soil stabilization of reclaimed asphalt pavement as flexible highway pavement materials," *Advanced Materials Research*, 367: pp. 3-11. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.367.3>
- [23] American Society for Testing and Materials. 2007. *ASTM D422-63 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. West Conshohocken, PA: ASTM International, pp. 1-3. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1520/D0422-63R07E02>
- [24] American Society for Testing and Materials. 2016. *ASTM D421-85 Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants*. West Conshohocken, PA: ASTM International. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1520/D0421-85R07>
- [25] Department of Rural Roads. 2002. *Standard (T) 501.6-2545 Test Method for Determining Plastic Limit*. Bangkok: Department of Rural Roads. (in Thai)
- [26] Department of Rural Roads. 2002. *Standard (T) 501.5-2545 Test Method for Determining Liquid Limit*. Bangkok: Department of Rural Roads. (in Thai)
- [27] American Association of State Highway and Transportation Officials. 2019. *AASHTO T 208-15 Standard Method of Test Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. Washington, DC: AASHTO.
- [28] Department of Rural Roads. 2002. *Standard (T) 501.2-2545 Test Method for Determining Compaction - Modified Method*. Bangkok: Department of Rural Roads. (in Thai)
- [29] Department of Rural Roads. 2002. *Standard (T) 501.3-2545 Test Method for Determining California Bearing Ratio (CBR)*. Bangkok: Department of Rural Roads. (in Thai)

- [30] Nafissatou, S. and et al. 2024. "Stabilization of lateritic soil with Portland cement and crushed granite for pavement base courses," *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 3(23): pp. 3090-3099. [Online]. Available: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.3.3090>
- [31] Dabou, B., Kanali, C. and Zachary, A. G. 2021. "Structural performance of laterite soil stabilized with cement and blue gum (*Eucalyptus globulus*) wood ash for use as a road base material," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 69(9): pp. 257-264. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I9P231>

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรและการวิเคราะห์แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ORGANIZATION CARBON FOOTPRINT ASSESSMENT AND HOTSPOT ANALYSIS OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS AT NAKHON SI THAMMARAT RAJABHAT UNIVERSITY

รอยหทัย แก้วใหม่¹, เอกลักษณ์ กาญจนเพ็ญ^{2*}, ฉัตรชัย แก้วดี³, สันติ ขำตรี¹, ศรีวรรณ ขำตรี⁴

Roihatai Kaewmai¹, Ekkalak Kanchanapen^{2*}, Chatchai Kaewdee³, Santi Khamtree¹, Sriwan Khamtree⁴

¹ หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

² หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

³ หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชานวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

⁴ หลักสูตรเทคโนโลยีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

¹ Bachelor of Industrial Technology Program in Industrial Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

² Bachelor of Industrial Technology Program in Civil Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

³ Doctor of Philosophy Program in Industrial Technology Innovation, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

⁴ Bachelor of Technology Program in Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University

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

วันที่รับบทความ: 5 เมษายน 2569; วันที่ทบทวนบทความ: 8 เมษายน 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 24 เมษายน 2569;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 29 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ตามมาตรฐาน ISO 14064-1 และแนวทางขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) 2) จำแนกและวิเคราะห์ แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีนัยสำคัญในแต่ละขอบเขต และ 3) จัดทำฐานข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรเพื่อใช้เป็น แนวทางในการวางแผนมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัย การศึกษานี้ใช้ข้อมูลกิจกรรมของปีการศึกษา 2565 ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยการปล่อยจากกิจกรรมการเดินทางไป-กลับของบุคลากรและ นักศึกษาในขอบเขตที่ 3 ได้ประเมินจากสมมติฐานรูปแบบการเดินทางร่วมกับข้อมูลประชากรจริงของมหาวิทยาลัย ผลการวิจัย พบว่า มหาวิทยาลัยมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิรวมทั้งสิ้น 8,669.85 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (tCO₂eq) ต่อปี คิดเป็นอัตราการปล่อยเฉลี่ย 0.94 tCO₂eq ต่อคนต่อปี โดยขอบเขตที่ 3 มีสัดส่วนสูงสุดร้อยละ 62.38 รองลงมาคือ ขอบเขตที่ 2 ร้อยละ 27.70 และขอบเขตที่ 1 ร้อยละ 9.92 ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ พบว่า การเดินทางไป-กลับของบุคลากรและนักศึกษาด้วยยานพาหนะส่วนตัวเป็นแหล่งปล่อยสูงสุด คิดเป็น 3,629.61 tCO₂eq ต่อปี รองลงมาคือการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบอาคารและส่วนกลาง คิดเป็น 2,401.54 tCO₂eq ต่อปี และการกำจัดขยะมูลฝอย

1,294.39 tCO₂eq ต่อปี ผลการศึกษาสะท้อนให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของมหาวิทยาลัยในพื้นที่ภูมิภาคที่มีข้อจำกัดด้านระบบขนส่งสาธารณะ ส่งผลให้กิจกรรมการเดินทางเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีนัยสำคัญ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถใช้สนับสนุนการกำหนดนโยบายและมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัย ทั้งในด้านการจัดการการเดินทาง การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และการจัดการของเสีย เพื่อขับเคลื่อนมหาวิทยาลัยสู่การเป็นองค์กรคาร์บอนต่ำอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: คาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร, แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ, ก๊าซเรือนกระจก, มหาวิทยาลัยคาร์บอนต่ำ

Abstract: This research aimed to 1) assess the greenhouse gas emissions of Nakhon Si Thammarat Rajabhat University in accordance with ISO 14064-1 and the guidelines of the Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization), 2) classify and analyze significant greenhouse gas emission sources within each scope, and 3) develop an organizational carbon footprint database to support greenhouse gas mitigation planning for the university. The study used activity data from the 2022 academic year together with greenhouse gas emission factors. Emissions from commuting by university personnel and students under Scope 3 were estimated using commuting pattern assumptions in combination with the university's actual population data. The results showed that the university's total net greenhouse gas emissions were 8,669.85 tCO₂eq per year, with an average emission intensity of 0.94 tCO₂eq per person per year. Scope 3 contributed the largest share of total emissions at 62.38%, followed by Scope 2 at 27.70% and Scope 1 at 9.92%. Hotspot analysis revealed that commuting by private vehicles was the largest emission source, accounting for 3,629.61 tCO₂eq per year, followed by electricity consumption in buildings and central facilities at 2,401.54 tCO₂eq per year, and solid waste disposal at 1,294.39 tCO₂eq per year. These findings reflect the characteristics of a regional university where limitations in public transportation make commuting a significant source of greenhouse gas emissions. The database developed from this study can support the formulation of greenhouse gas reduction policies and measures for the university, particularly in transport management, energy efficiency improvement, and waste management, in order to drive the university toward becoming a sustainable low-carbon organization.

Key words: Organization carbon footprint, Greenhouse gas emission hotspots, Greenhouse gas, Low-carbon university

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นปัญหาสำคัญระดับโลกที่เกิดจากการสะสมของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ และส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ เศรษฐกิจ และสังคมอย่างต่อเนื่อง ประเทศไทยในฐานะภาคีภายใต้กรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)) ได้ประกาศเป้าหมายการบรรลุความเป็นกลางทาง

คาร์บอนภายในปี พ.ศ. 2593 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี พ.ศ. 2608 [1] การขับเคลื่อนให้บรรลุเป้าหมายดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ถูกต้อง และเป็นระบบ เพื่อใช้เป็นฐานในการกำหนดมาตรการลดการปล่อยในระดับองค์กรอย่างมีประสิทธิภาพ [2]

สถาบันอุดมศึกษามีบทบาทสำคัญในการเป็นต้นแบบด้านการพัฒนาอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตาม มหาวิทยาลัยเป็นองค์กรที่มีกิจกรรมหลากหลายซึ่งก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ทั้งจากการใช้พลังงานไฟฟ้า การใช้เชื้อเพลิงในกิจกรรมต่าง ๆ การรั่วไหลของสารทำความเย็น การจัดการของเสีย ตลอดจนการเดินทางของบุคลากรและนักศึกษา ดังนั้นการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร (Carbon Footprint for Organization: CFO) จึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการประเมินปริมาณการปล่อย และระบุแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีนัยสำคัญ เพื่อสนับสนุนการวางแผนมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกในระดับองค์กร

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรในสถาบันอุดมศึกษาหลายแห่ง [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9] โดยช่วยให้เห็นภาพรวมของโครงสร้างการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและแนวทางลดการปล่อยในระดับองค์กร อย่างไรก็ตามหลายการศึกษายังคงให้ความสำคัญกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขอบเขตที่ 1 และขอบเขตที่ 2 มากกว่าการวิเคราะห์การปล่อยทางอ้อมอื่น ๆ ในขอบเขตที่ 3 อย่างเป็นระบบ ทั้งที่ในบริบทของสถาบันอุดมศึกษา กิจกรรมในขอบเขตที่ 3 เช่น การเดินทางไป-กลับของบุคลากรและนักศึกษา อาจเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีนัยสำคัญต่อผลรวมขององค์กรได้

งานวิจัยในต่างประเทศยังชี้ให้เห็นว่า โครงสร้างการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของสถาบันอุดมศึกษาอาจแตกต่างกันไปตามบริบทของพื้นที่ ลักษณะกิจกรรม และรูปแบบการใช้พลังงานของมหาวิทยาลัย เช่น กรณีของ American University of Sharjah พบว่า ขอบเขตที่ 2 เป็นแหล่งปล่อยหลัก ขณะที่การเดินทางของประชากรมหาวิทยาลัยเป็นแหล่งปล่อยสำคัญในขอบเขตที่ 3 อย่างชัดเจน [9] อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเชิงประจักษ์เกี่ยวกับโครงสร้างการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยในพื้นที่ระดับภูมิภาคของประเทศไทยยังมีอยู่จำกัด โดยเฉพาะการวิเคราะห์บทบาทของกิจกรรมการเดินทางในฐานะแหล่งปล่อยสำคัญขององค์กร

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราชเป็นสถาบันอุดมศึกษาในระดับภูมิภาคที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาท้องถิ่น และมีประชากรทั้งบุคลากรและนักศึกษาจำนวนมากใช้พื้นที่มหาวิทยาลัยในแต่ละวัน ลักษณะดังกล่าวอาจทำให้โครงสร้างการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยแตกต่างจากมหาวิทยาลัยในเขตเมือง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ระบบขนส่งสาธารณะยังไม่ครอบคลุมเพียงพอ ส่งผลให้การเดินทางด้วย

ยานพาหนะส่วนตัวมีแนวโน้มเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญขององค์กร อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมหาวิทยาลัยยังขาดฐานข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรที่อ้างอิงตามมาตรฐานสากล และสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการกำหนดนโยบายด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมได้อย่างชัดเจน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราชตามมาตรฐาน ISO 14064-1 [10] และแนวทางขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) [11] พร้อมทั้งวิเคราะห์แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีนัยสำคัญขององค์กร เพื่อชี้ให้เห็นบทบาทของแหล่งปล่อยหลักในแต่ละขอบเขต โดยเฉพาะกิจกรรมในขอบเขตที่ 3 ผลการศึกษานี้จะช่วยจัดทำฐานข้อมูลเชิงประจักษ์สำหรับใช้กำหนดมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัย และสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับสถาบันอุดมศึกษาที่มีบริบทใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะมหาวิทยาลัยในพื้นที่ภูมิภาค ในการขับเคลื่อนสู่การเป็นองค์กรคาร์บอนต่ำอย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ตามมาตรฐาน ISO 14064-1 และแนวทางขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน)

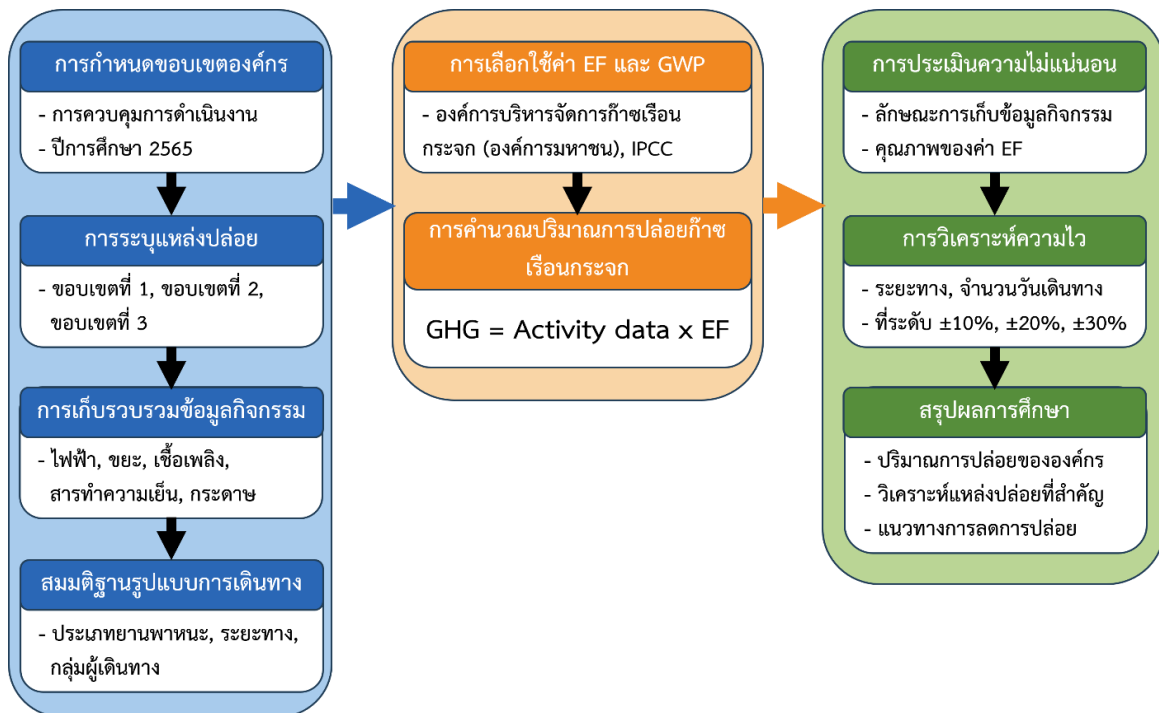
2.2 เพื่อจำแนกและวิเคราะห์แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีนัยสำคัญในแต่ละขอบเขต

2.3 เพื่อจัดทำฐานข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรสำหรับใช้เป็นแนวทางในการวางแผนและกำหนดมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัย

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราชดำเนินการตามมาตรฐานสากล ISO 14064-1 [10] และข้อกำหนดในการคำนวณและรายงานคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) [11] กระบวนการวิจัยครอบคลุมขั้นตอนการกำหนดขอบเขตองค์กร การระบุแหล่ง

ปล่อยก๊าซเรือนกระจก การเก็บรวบรวมข้อมูลกิจกรรม การกำหนดสมมติฐานรูปแบบการเดินทาง การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การประเมินความไม่แน่นอน (Uncertainty assessment) และการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis) ของสมมติฐานรูปแบบการเดินทาง โดยแผนผังกระบวนการวิจัยเชิงเทคนิค แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนผังกระบวนการวิจัยเชิงเทคนิค

3.1 การกำหนดขอบเขตองค์กร การกำหนดขอบเขตองค์กรใช้หลักการควบคุมการดำเนินงาน (Operational control) เพื่อให้ครอบคลุมกิจกรรมทั้งหมดที่มหาวิทยาลัยสามารถกำหนดนโยบายและบริหารจัดการได้โดยตรง โดยปีฐานของการศึกษาคือปีการศึกษา 2565 เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2565 ถึงวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 เพื่อให้สอดคล้องกับวงจรการดำเนินงานจริงของสถาบันอุดมศึกษา

3.2 การระบุแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจก การศึกษานี้จำแนกแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกเป็น 3 ขอบเขต ดังนี้

3.2.1 ขอบเขตที่ 1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงขององค์กร ประกอบด้วยการใช้เชื้อเพลิงในการตัดหญ้า การใช้เชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะของมหาวิทยาลัย การเกิดก๊าซมีเทนจากถังบำบัดสิ่งปฏิกูล (Septic tank) และการรั่วไหลของสารทำความเย็นจากระบบปรับอากาศ

3.2.2 ขอบเขตที่ 2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้พลังงาน ได้แก่ การซื้อพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อใช้ภายในมหาวิทยาลัย

3.2.3 ขอบเขตที่ 3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่น ๆ ได้แก่ การใช้กระดาษ A4 การใช้น้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าสำรองของระบบเครือข่ายมหาวิทยาลัย ที่ซื้อบริการมาจากหน่วยงานภายนอก การได้มาซึ่งเชื้อเพลิงและพลังงาน การกำจัดขยะมูลฝอยที่นำไปฝังกลบภายนอก และการเดินทางไป-กลับระหว่างมหาวิทยาลัยและที่พักของบุคลากรและนักศึกษา (ทั้งภาคปกติและภาคพิเศษ) ด้วยยานพาหนะส่วนตัว ซึ่งการพิจารณากิจกรรมในขอบเขตที่ 3 ของการศึกษานี้ อ้างอิงแนวทางการประเมินขององค์กรบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) [11] ร่วมกับการรอบการบัญชีและการรายงานของ Greenhouse Gas Protocol Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard [12]

กิจกรรมที่นับรวมในการคำนวณเป็นกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานตามปกติของมหาวิทยาลัย ซึ่งอยู่ภายใต้ขอบเขตการควบคุมการดำเนินงาน และมีข้อมูลกิจกรรมเพียงพอสำหรับการประเมินอย่างน่าเชื่อถือ ส่วนกิจกรรมที่ไม่นับรวมเป็นกิจกรรมที่ยังไม่มีข้อมูลเพียงพอ ไม่สามารถกำหนด

ขอบเขตข้อมูลได้ชัดเจนในปฏิฐาน หรืออยู่นอกกรอบการรวบรวมข้อมูลของการศึกษาครั้งนี้ เช่น กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง อาคารหรือการบริโภค และกิจกรรมทางอ้อมบางหมวดในขอบเขตที่ 3 รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การกำหนดขอบเขตการศึกษาและค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor: EF)

รายการ	การนับรวม	ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ค่า EF)		
		หน่วย	kgCO ₂ eq ต่อหน่วย	แหล่งที่มา
ขอบเขตที่ 1				
1. การใช้เชื้อเพลิง สำหรับการตัดหญ้าภายในมหาวิทยาลัย	✓			
1.1. น้ำมันเบนซิน (การเผาไหม้แบบอยู่กับที่)		L	2.1894	CFO (เมษายน 2565), IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE [13]
1.2. น้ำมันหล่อลื่น (การเผาไหม้แบบอยู่กับที่)		L	3.2457*	CFO (เมษายน 2565), IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE ของ Fuel oil C [13]
2. การใช้เชื้อเพลิง สำหรับยานพาหนะของมหาวิทยาลัย	✓			
2.1. น้ำมันดีเซล (การเผาไหม้แบบเคลื่อนที่)		L	2.7406	CFO (เมษายน 2565), IPCC Vol.2 table 3.2.1, 3.2.2, DEDE [13]
2.2. น้ำมันเบนซิน (การเผาไหม้แบบเคลื่อนที่)		L	2.2394	CFO (เมษายน 2565), IPCC Vol.2 table 3.2.1, 3.2.2, DEDE [13]
3. การเกิดก๊าซมีเทนจากถังบำบัดสิ่งปฏิกูล (Septic tank) ของประชากร**	✓	kgBOD	8.4000	คำนวณจาก IPCC Guideline Vol.5, 2006. chapter 6 Wastewater: Equation 6.2 [14]
4. การรั่วไหลของสารทำความเย็นจากเครื่องปรับอากาศ	✓			
4.1. สารทำความเย็น R410a		kg	1,923.5	CFO (เมษายน 2565), IPCC 2013, AR5 [13]
4.2. สารทำความเย็น R-32		kg	677	CFO (เมษายน 2565), IPCC 2013, AR5 [13]
4.3. สารทำความเย็น R-22		kg	1,760	CFO (เมษายน 2565), IPCC 2013, AR5 [13]
5. การบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัย	×	ไม่นับรวม เนื่องจากมหาวิทยาลัยไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย		
6. การใช้สารดับเพลิงของมหาวิทยาลัย	×	ไม่นับรวม เนื่องจากมหาวิทยาลัยไม่มีการเก็บข้อมูล		
7. การใช้ปุ๋ยเคมี เพื่อดูแลต้นไม้ภายในมหาวิทยาลัย	×	ไม่นับรวม เนื่องจากมหาวิทยาลัยไม่มีการใช้ปุ๋ยเคมี		
ขอบเขตที่ 2				
1. ไฟฟ้า	✓	kWh	0.4999	CFO (เมษายน 2565), Thai National LCI Database, TIISMEC-NSTDA, AR5 (with TGO electricity 2016-2018) [13]
ขอบเขตที่ 3				
หมวด 1. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการซื้อวัตถุดิบและบริการ	✓			
1.1. การใช้กระดาษ A4		kg	0.6677	CFP (กรกฎาคม 2565), ลำดับ 590 [15]

รายการ	การนับรวม	ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ค่า EF)		
		หน่วย	kgCO ₂ eq ต่อหน่วย	แหล่งที่มา
1.2. การผลิตกระแสไฟฟ้าสำรองของระบบเครือข่ายมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมาที่ซื้อบริการมาจากหน่วยงานภายนอก				
1.2.1. น้ำมันดีเซล (การได้มา)		kg	0.3522	CFP (กรกฎาคม 2565), ลำดับ 55 [15]
1.2.2. น้ำมันดีเซล (การเผาไหม้แบบอยู่กับที่)		L	2.7078	CFO (เมษายน 2565), IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE [13]
หมวด 2. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากสินค้าประเภททุน	×	ไม่นับรวมภายในขอบเขตที่พิจารณา		
หมวด 3. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงและพลังงาน	✓			
3.1. ไฟฟ้า (การได้มา)		kWh	0.0987	CFO (เมษายน 2565), Thai National LCI Database, TIISMTEC-NSTDA, AR5 (with TGO electricity 2016-2018) [13]
3.2. น้ำมันเบนซิน (การได้มา)		kg	0.4024	CFP (กรกฎาคม 2565), ลำดับ 52 [15]
3.3. น้ำมันหล่อลื่น (การได้มา)		kg	0.8319	CFP (กรกฎาคม 2565), ลำดับ 598: [15]
3.4. น้ำมันดีเซล (การได้มา)		kg	0.3522	CFP (กรกฎาคม 2565), ลำดับ 55 [15]
หมวด 4. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการขนส่ง และกระจายสินค้าต้นน้ำ	✓			
4.1. การขนส่งกระดาด A4 ด้วยรถตู้บรรทุก 4 ล้อ วิ่งแบบปกติ 100% loading		tkm	0.1835	CFP (กรกฎาคม 2565), ลำดับ 77 [15]
4.2. การขนส่งกระดาด A4 ด้วยรถตู้บรรทุก 4 ล้อ วิ่งแบบปกติ 0% loading		km	0.3345	CFP (กรกฎาคม 2565), ลำดับ 74 [15]
หมวด 5. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการกำจัดของเสียที่เกิดจากการดำเนินกิจกรรมขององค์กร	✓			
5.1. การฝังกลบขยะมูลฝอยชุมชนแบบถูกหลักสุขาภิบาล		kg	0.7933	CFP (กรกฎาคม 2565), ลำดับ 575 [15]
5.2. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกองขยะแบบต้น		kg	2.3200	ของเสียอื่นๆ ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนคำนวณจากข้อมูลที่เก็บโดย The Joint Graduate School of Energy and Environment [11]
5.3. การขนส่งขยะ ด้วยรถบรรทุกขยะ 6 ล้อ วิ่งปกติ 100% loading		tkm	0.0475	CFP (กรกฎาคม 2565), ลำดับ 237 [15]
5.4. การขนส่งขยะ ด้วยรถบรรทุกขยะ 6 ล้อ วิ่งปกติ 0% loading (การขนส่ง)		km	0.4923	CFP (กรกฎาคม 2565), ลำดับ 234 [15]
หมวด 6. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการเดินทางเพื่อธุรกิจ	×	ไม่นับรวมภายในขอบเขตที่พิจารณา		

รายการ	การนับรวม	ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ค่า EF)		
		หน่วย	kgCO ₂ eq ต่อหน่วย	แหล่งที่มา
หมวด 7. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการเดินทางของพนักงาน	✓			
7.1 การเดินทางไป-กลับของประชากร**				
7.1.1. น้ำมันดีเซล (การได้มา)		kg	0.3522	CFP (กรกฎาคม 2565), ลำดับ 55 [15]
7.1.2. น้ำมันดีเซล (การเผาไหม้แบบเคลื่อนที่)		L	2.7406	CFO (เมษายน 2565), IPCC Vol.2 table 3.2.1, 3.2.2, DEDE [13]
7.1.3. น้ำมันเบนซิน (การได้มา)		kg	0.4024	CFP (กรกฎาคม 2565), ลำดับ 52 [15]
7.1.4. น้ำมันเบนซิน (การเผาไหม้แบบเคลื่อนที่)		L	2.2394	CFO (เมษายน 2565), IPCC Vol.2 table 3.2.1, 3.2.2, DEDE [13]
หมวด 8. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้สินทรัพย์ที่เช่า	×	ไม่นับรวมภายในขอบเขตที่พิจารณา		
หมวด 9. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการขนส่ง และกระจายสินค้า	×	ไม่นับรวมภายในขอบเขตที่พิจารณา		
หมวด 10. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการแปรรูปสินค้าที่องค์กรจำหน่าย	×	ไม่นับรวมภายในขอบเขตที่พิจารณา		
หมวด 11. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่องค์กรจำหน่าย	×	ไม่นับรวมภายในขอบเขตที่พิจารณา		
หมวด 12. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการกำจัดซากผลิตภัณฑ์ที่องค์กรจำหน่าย	×	ไม่นับรวมภายในขอบเขตที่พิจารณา		
หมวด 13. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการปล่อยเช่าสินทรัพย์ขององค์กร	×	ไม่นับรวมภายในขอบเขตที่พิจารณา		
หมวด 14. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากแฟรนไชส์	×	ไม่นับรวมภายในขอบเขตที่พิจารณา		
หมวด 15. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการลงทุน	×	ไม่นับรวมภายในขอบเขตที่พิจารณา		

หมายเหตุ : *พิจารณาเลือกใช้ค่า EF สูงสุดในหมวดตามหลักความระมัดระวัง (Conservative Principle)

**บุคลากร 723 คน จำนวน 255 วัน/ปี, นักศึกษาภาคปกติ จำนวน 206 วัน/ปี, นักศึกษาภาคพิเศษ จำนวน 85 วัน/ปี โดยจำนวนนักศึกษาทั้งภาคปกติและภาคพิเศษ คิดแยกรายเดือนตามการลงทะเบียนในแต่ละภาคเรียนของปีการศึกษา 2565

3.3 วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลกิจกรรม การเก็บรวบรวมข้อมูลกิจกรรม แบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

3.3.1 ข้อมูลกิจกรรมจริงขององค์กร ผู้วิจัยเก็บรวบรวมข้อมูลกิจกรรมเชิงปริมาณรายเดือนจากหลักฐานการจัดซื้อ ใบเสร็จรับเงิน และบันทึกการเบิกจ่ายต่างๆ

3.3.2 ข้อมูลจากการกำหนดสมมติฐานรูปแบบการเดินทาง การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรม

การเดินทางไป-กลับของบุคลากรและนักศึกษาในขอบเขตที่ 3 ใช้วิธีการกำหนดสมมติฐานรูปแบบการเดินทาง (Commuting pattern assumptions) ของผู้เดินทางแต่ละกลุ่มร่วมกับข้อมูลกิจกรรมจริงของมหาวิทยาลัย เนื่องจากประชากรมีจำนวนมาก และไม่สามารถเก็บข้อมูลรายบุคคลได้ครบทั้งหมด ผู้วิจัยจึงทำการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นด้วยวิธีการเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบตามความสะดวก (Convenience sampling) จำนวน 161 คน

ประกอบด้วย บุคลากร 42 คน นักศึกษาภาคปกติ 106 คน และ นักศึกษาภาคพิเศษ 13 คน เพื่อใช้สะท้อนลักษณะการเดินทาง ประเภทยานพาหนะ และช่วงระยะทางของผู้เดินทางในแต่ละกลุ่ม ข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาพิจารณาพร้อมกับข้อมูลประชากรที่พักอาศัยภายในมหาวิทยาลัย (ทั้งบ้านพักบุคลากรและหอพักนักศึกษา) ตลอดจนการกระจายตัวของที่พักอาศัยภายนอกโดยรอบมหาวิทยาลัย เพื่อกำหนดสมมติฐานรูปแบบการเดินทางของแต่ละกลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2

ทั้งนี้ การเก็บข้อมูลดังกล่าวมิได้เป็นการสุ่มตัวอย่างเชิงสถิติอย่างเคร่งครัด จึงอาจไม่สะท้อนโครงสร้างประชากรทาง

สถิติได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้นำสมมติฐานรูปแบบการเดินทางของแต่ละกลุ่มไปประยุกต์ใช้ร่วมกับฐานข้อมูลประชากรจริงของมหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2565 และหลักความระมัดระวัง (Conservative principle) เพื่อให้การประเมินสอดคล้องกับบริบทของมหาวิทยาลัยและป้องกันการประเมินค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริง นอกจากนี้ เพื่อประเมินผลของความเปลี่ยนแปลงของสมมติฐานหลักในตารางที่ 2 ต่อค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัย ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ความไวของสมมติฐานรูปแบบการเดินทางเพิ่มเติม ดังอธิบายในหัวข้อ 3.6

ตารางที่ 2 สมมติฐานรูปแบบการเดินทางของบุคลากรและนักศึกษาที่ใช้ในการคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

กลุ่มผู้เดินทาง	ประเภทยานพาหนะ	สมมติฐานสัดส่วนระยะทาง (ขาเดียว)	สมมติฐานสัดส่วนตาม กลุ่ม
1. บุคลากร	1. รถยนต์ (80%)		
	1.1. น้ำมันเบนซิน (60%)	- ระยะ 5 km (35%)	21%
		- ระยะ 15 km (35%)	21%
		- ระยะ 25 km (20%)	12%
		- ระยะ 40 km (10%)	6%
	1.2. น้ำมันดีเซล (20%)	- ระยะ 5 km (35%)	7%
		- ระยะ 15 km (35%)	7%
		- ระยะ 25 km (20%)	4%
		- ระยะ 40 km (10%)	2%
	2. รถจักรยานยนต์ -น้ำมันเบนซิน (20%)	- ระยะ 1 km (45%)	9%
2. นักศึกษา (ภาคปกติ)		- ระยะ 5 km (45%)	9%
		- ระยะ 15 km (10%)	2%
	1. รถยนต์ (10%)		
	1.1. น้ำมันเบนซิน (5%)	- ระยะ 5 km (20%)	1%
		- ระยะ 15 km (40%)	2%
		- ระยะ 25 km (40%)	2%
	1.2. น้ำมันดีเซล (5%)	- ระยะ 5 km (20%)	1%
		- ระยะ 15 km (40%)	2%
		- ระยะ 25 km (40%)	2%
	2. รถจักรยานยนต์ -น้ำมันเบนซิน (60%)	- ระยะ 2 km (40%)	24%
		- ระยะ 5 km (40%)	24%
		- ระยะ 15 km (15%)	9%
		- ระยะ 25 km (5%)	3%
3. นักศึกษา	3. เดิน (30%)	- ระยะ 0.5-1 km (30%)	30%
	1. รถยนต์ (80%)		

กลุ่มผู้เดินทาง	ประเภทยานพาหนะ	สมมติฐานสัดส่วนระยะทาง (ขาเดียว)	สมมติฐานสัดส่วนตาม กลุ่ม
(ภาคพิเศษ)	1.1. น้ำมันเบนซิน (60%)	- ระยะ 30 km (35%)	21%
		- ระยะ 40 km (35%)	21%
		- ระยะ 50 km (30%)	18%
	1.2. น้ำมันดีเซล (20%)	- ระยะ 30 km (35%)	7%
		- ระยะ 40 km (35%)	7%
		- ระยะ 50 km (30%)	6%
	2. รถจักรยานยนต์ -น้ำมันเบนซิน (20%)	- ระยะ 20 km (35%)	7%
		- ระยะ 30 km (35%)	7%
		- ระยะ 40 km (30%)	6%

3.4 วิธีการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก
การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของแต่ละกิจกรรมใช้สมการพื้นฐานตามหลักการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ [11] โดยนำข้อมูลกิจกรรม (Activity data) คูณกับค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor (EF)) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$GHG = AD \times EF \dots\dots\dots(1)$$

โดยที่ *GHG* คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas Emissions) มีหน่วยเป็นตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (tCO₂eq)

AD คือ ข้อมูลกิจกรรม (Activity Data) เช่น ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าหรือปริมาณเชื้อเพลิง

EF คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor)

สำหรับการเลือกใช้ค่า EF ผู้วิจัยได้สืบค้นและอ้างอิงจากฐานข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) [13], [15] ซึ่งค่า EF ทั้งหมดที่พิจารณาเลือกใช้ในการศึกษานี้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 ผลการคำนวณจะถูกแปลงค่าให้อยู่ในหน่วยตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (tCO₂eq) โดยใช้ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential (GWP)) ตามรายงานการประเมินฉบับที่ 5 (Fifth Assessment

Report (AR5)) ของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)) ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการคำนวณขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) [11]

3.4.1 การคำนวณการเกิดก๊าซมีเทน (CH₄) จากถังบำบัดสิ่งปฏิกูล (Septic tank) ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนภายในถังบำบัดสิ่งปฏิกูล อ้างอิงแนวทางการคำนวณตาม IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006) [14] โดยปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนคำนวณจากปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำเสีย (Total Organics in Wastewater (TOW)) ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซมีเทนของระบบบำบัด ตามสมการของ IPCC [14] ดังนี้

$$CH_4 \text{ Emission} = [\sum(U_i \times T_{i,j} \times EF_j)] \times (TOW - S - R)(2)$$

โดยที่ *CH₄ Emission* คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทน (kgCH₄ ต่อปี), *U_i* คือ สัดส่วนประชากรในกลุ่ม *i*, *T_{i,j}* คือ ระดับการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียชนิด *j*, *EF_j* คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซมีเทนของระบบบำบัด (kgCH₄ / kgBOD), *TOW* คือ ปริมาณสารอินทรีย์รวมในน้ำเสีย (kgBOD ต่อปี), *S* คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดออกในรูปตะกอน และ *R* คือ ปริมาณก๊าซมีเทนที่กู้คืนกลับมาใช้ประโยชน์

สำหรับการศึกษานี้ มหาวิทยาลัยใช้ระบบบำบัดสิ่งปฏิกูลแบบ Septic tank เพียงระบบเดียว จึงกำหนดค่า $T = 1$ และเนื่องจากประชากรที่ใช้ระบบมีลักษณะเป็นกลุ่มเดียวในแต่ละชุดการคำนวณ จึงกำหนดค่า $U = 1$ นอกจากนี้ ไม่มีปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดออกในรูปตะกอน และไม่พบการกักเก็บก๊าซมีเทนกลับมาใช้ประโยชน์ จึงกำหนด $S = 0$ และ $R = 0$ ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซมีเทนของระบบบำบัด คำนวณจากสมการที่ (3) ดังต่อไปนี้

$$EF = B_0 \times MCF \dots\dots\dots(3)$$

โดยที่ B_0 คือ ค่าความสามารถสูงสุดในการผลิตก๊าซมีเทน (การศึกษานี้ใช้ B_0 เท่ากับ $0.6 \text{ kgCH}_4 / \text{kgBOD}$) และ MCF คือ ค่าตัวประกอบการปรับแก้ก๊าซมีเทน (0.5 สำหรับระบบ Septic tank) ทำให้ได้ค่า EF เท่ากับ $0.3 \text{ kgCH}_4 / \text{kgBOD}$ สำหรับปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำเสีย (TOW) ถูกคำนวณจากสมการที่ (4) ดังต่อไปนี้

$$TOW = \sum (P_i \times BOD \times 0.001 \times I \times D_i) \dots\dots\dots(4)$$

โดยที่ P_i คือ จำนวนประชากรแต่ละกลุ่ม i , BOD คือ ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีต่อคนต่อวัน (การศึกษานี้ใช้ BOD เท่ากับ 40 g/person/day), 0.001 คือ ค่าคงที่สำหรับแปลงหน่วยจากกรัมเป็นกิโลกรัม, I คือ ค่าปรับแก้กรณีมีน้ำเสียจากกิจกรรมอื่นเพิ่มเติมเข้าสู่ระบบ (สำหรับการศึกษานี้เท่ากับ 1), และ D_i คือ จำนวนวันเข้าใช้งานพื้นที่จริงของแต่ละกลุ่มประชากร i ได้แก่ บุคลากร (255 วัน/ปี) นักศึกษาภาคปกติ (206 วัน/ปี) และนักศึกษาภาคพิเศษ (85 วัน/ปี) เพื่อให้สอดคล้องกับตารางการปฏิบัติงานและการเรียนการสอนจริง ท้ายที่สุด ปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทน (kgCH_4 ต่อปี) จะถูกนำไปคูณด้วยค่า GWP เพื่อแปลงค่าการปล่อยก๊าซทั้งหมดให้อยู่ในรูปของ tCO_2eq ก่อนนำไปรวมในบัญชีรายการก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัย

3.4.2 การคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทางของบุคลากรและนักศึกษา การศึกษานี้ใช้จำนวนประชากรจริงของแต่ละกลุ่มร่วมกับสมมติฐานรูปแบบการ

เดินทางตามตารางที่ 2 โดยจำแนกผู้เดินทางเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ บุคลากร นักศึกษาภาคปกติ และนักศึกษาภาคพิเศษ ระยะทางที่กำหนดในตารางที่ 2 เป็นระยะทางขาเดียว ซึ่งในการคำนวณได้แปลงเป็นระยะทางไป-กลับโดยสมมติให้ระยะทางขาไปและขากลับเท่ากัน จากนั้นคูณด้วยจำนวนวันเดินทางต่อปีของแต่ละกลุ่ม เพื่อหาระยะทางเดินทางรวมต่อปี กล่าวคือ ในปีการศึกษา 2565 บุคลากรใช้จำนวนวันทำงาน 255 วันต่อปี นักศึกษาภาคปกติ และนักศึกษาภาคพิเศษ ใช้จำนวนวันที่มีการจัดการเรียนการสอน 206 และ 85 วันต่อปี ตามลำดับ

ระยะทางเดินทางรวมดังกล่าวถูกแปลงเป็นปริมาณการใช้เชื้อเพลิงตามประเภทยานพาหนะและชนิดเชื้อเพลิง โดยใช้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงตามแนวทางขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) [11] ได้แก่ น้ำมันเบนซินของรถยนต์เฉลี่ยทุกขนาด $14.763 \text{ กิโลเมตรต่อลิตร}$ น้ำมันดีเซลของรถกระบะส่วนบุคคลขนาด $1 \text{ ตัน } 11.111 \text{ กิโลเมตรต่อลิตร}$ และน้ำมันเบนซินของรถจักรยานยนต์ $4 \text{ จังหวะเฉลี่ยทุกขนาด } 37.64 \text{ กิโลเมตรต่อลิตร}$ แล้วนำปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ได้ไปคูณกับค่า EF ที่เกี่ยวข้อง ทั้งในส่วนของการได้มาซึ่งเชื้อเพลิงและการเผาไหม้เชื้อเพลิง เพื่อคำนวณเป็นปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูป tCO_2eq

3.5 การประเมินความไม่แน่นอน การศึกษานี้ได้ดำเนินการประเมินความไม่แน่นอนของบัญชีรายการก๊าซเรือนกระจกเชิงคุณภาพตามแนวทางขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) [11] เพื่อบ่งชี้ระดับความน่าเชื่อถือของผลการคำนวณ โดยพิจารณาจาก 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ (1) ระดับคุณภาพของลักษณะการเก็บข้อมูลกิจกรรม และ (2) ระดับคุณภาพของค่า EF ที่เลือกใช้ ซึ่งมีการกำหนดเกณฑ์การให้คะแนนสำหรับแต่ละปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คะแนนระดับคุณภาพของลักษณะการเก็บข้อมูลและการเลือกใช้ค่า EF

รายการ	คะแนนระดับคุณภาพ	
1. ลักษณะการเก็บข้อมูล	X = 6 คะแนน	เก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องด้วยการติดตั้งระบบอัตโนมัติ
	Y = 3 คะแนน	เก็บข้อมูลจากมิเตอร์และใบเสร็จ

รายการ	คะแนนระดับคุณภาพ	
	Z = 1 คะแนน	เก็บข้อมูลจากการประมาณค่า
2. การเลือกใช้ค่า EF	A = 4 คะแนน	EF จากการวัดที่มีคุณภาพ
	B = 3 คะแนน	EF จากผู้ผลิตหรือ EF ระดับประเทศ
	C = 2 คะแนน	EF ระดับภูมิภาค
	D = 1 คะแนน	EF ระดับสากล

ที่มา: (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2565) [11]

การประเมินระดับความไม่แน่นอนโดยรวมของแต่ละแหล่งปล่อย ดำเนินการโดยการนำคะแนนระดับคุณภาพของลักษณะการเก็บข้อมูลมาคูณกับคะแนนการเลือกใช้ค่า EF ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

1) คะแนนประเมินความไม่แน่นอน ใช้สูตรคือ

คะแนนประเมินความไม่แน่นอน = คะแนนลักษณะการเก็บข้อมูลกิจกรรม ×
คะแนนการเลือกใช้ค่า EF.....(5)

2) ผลลัพธ์ของคะแนนที่ได้จะถูกนำมาจัดลำดับคุณภาพเพื่อสะท้อนระดับความไม่แน่นอนของข้อมูล ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 ข้อมูลส่วนนี้จะถูกใช้เป็นแนวทางสำคัญในการพิจารณาวางแผนปรับปรุงคุณภาพการจัดเก็บข้อมูลขององค์กรในอนาคต

ตารางที่ 4 ระดับคะแนนและเกณฑ์ที่ใช้ประเมินความไม่แน่นอน

ระดับ	ระดับคะแนน โดยรวมของข้อมูล	คำอธิบาย
1	1-6	มีความไม่แน่นอนสูง คุณภาพของข้อมูลไม่ดี
2	7-12	มีความไม่แน่นอนเล็กน้อย คุณภาพของข้อมูลปานกลาง
3	13-18	มีความไม่แน่นอนต่ำ คุณภาพของข้อมูลดี
4	19-24	มีความไม่แน่นอนต่ำ คุณภาพของข้อมูลดีเยี่ยม

ที่มา: (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2565) [11]

3.6 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของสมมติฐานรูปแบบการเดินทาง

เพื่อประเมินผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเชิงพฤติกรรมการเดินทางที่ได้จากการสำรวจเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ความไวของสมมติฐานรูปแบบการเดินทางที่ใช้ในการคำนวณจากตารางที่ 2 โดยการใช้การจำลองสถานการณ์ (Scenario analysis) กำหนดให้สมมติฐานหลัก ได้แก่ ระยะทางการเดินทางและจำนวนวันเดินทาง มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงที่ระดับร้อยละ ± 10 , ± 20 และ ± 30 จากค่าฐาน (Baseline scenario)

การวิเคราะห์นี้ใช้แนวทางการวิเคราะห์ความไวแบบทางเดียว (One-way sensitivity analysis) โดยปรับเปลี่ยนสมมติฐานทีละรายการภายใต้ระดับที่กำหนด ขณะที่สมมติฐานอื่นคงเดิม แล้วพิจารณาผลที่เกิดขึ้นต่อค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมการเดินทางและค่าการปล่อยรวมขององค์กร เพื่อใช้ประกอบการตีความความน่าเชื่อถือของผลการศึกษาและประเมินอิทธิพลของสมมติฐานต่อข้อสรุปของงานวิจัย

4. ผลการศึกษาวิจัย

4.1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจำแนกตามขอบเขต จากการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ประจำปีการศึกษา 2565 ภายใต้ขอบเขตการควบคุมการดำเนินงาน พบว่ามหาวิทยาลัยมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิรวมทั้งสิ้น 8,669.85 tCO₂e ต่อปี ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5

เมื่อจำแนกตามขอบเขตการปล่อยก๊าซเรือนกระจกพบว่า ขอบเขตที่ 3 (การปล่อยทางอ้อมอื่น ๆ) มีสัดส่วนสูงที่สุด โดยมีปริมาณ 5,408.65 tCO₂e ต่อปี คิดเป็นร้อยละ 62.38 ของการปล่อยทั้งหมด รองลงมาคือ ขอบเขตที่ 2 (การใช้พลังงานไฟฟ้า) มีปริมาณ 2,401.54 tCO₂e ต่อปี คิดเป็นร้อยละ 27.70 และขอบเขตที่ 1 (การปล่อยทางตรง) มีปริมาณต่ำที่สุด 859.66 tCO₂e ต่อปี คิดเป็นร้อยละ 9.92 ตามลำดับ ข้อสังเกตสำคัญเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารทำความเย็นที่นอกเหนือจากการรายงานในขอบเขตที่ 1 พบการรั่วไหลของ

สารทำความเย็น R-22 311.17 tCO₂eq ต่อปี ซึ่งต้องรายงาน 3,629.61 tCO₂eq ต่อปี (ร้อยละ 67.11 ของขอบเขตที่ 3) แยกตามแนวทางขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก รองลงมาคือ การกำจัดขยะมูลฝอยที่นำไปฝังกลบภายนอก (องค์การมหาชน) โดยไม่นับรวมในปริมาณการปล่อยรวม มหาวิทยาลัย และการได้มาซึ่งเชื้อเพลิงและพลังงาน คิดเป็น เนื่องจาก R-22 เป็นสารควบคุมภายใต้พิธีสารมอนทรีออล ร้อยละ 23.93 และ 8.84 ของขอบเขตที่ 3 ตามลำดับ (Montreal Protocol) ดังนั้น หากพิจารณาการรั่วไหลของ ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของ สารทำความเย็นทั้งหมดจากตารางที่ 5 จะมีปริมาณสูงถึง มหาวิทยาลัยไม่ได้อยู่ที่กิจกรรมการใช้พลังงานภายในองค์กร เพียงอย่างเดียว แต่มีลักษณะเด่นที่การปล่อยทางอ้อมใน

สำหรับขอบเขตที่ 3 แหล่งปล่อยหลักมาจากการ ขอบเขตที่ 3 ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อคาร์บอนฟุตพริ้นท์โดยรวม เดินทางไป-กลับระหว่างมหาวิทยาลัยและที่พักของบุคลากร ของมหาวิทยาลัย และนักศึกษาด้วยยานพาหนะส่วนตัวมีปริมาณสูงถึง

ตารางที่ 5 บัญชีรายการการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ขอบเขต	แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจก	ปริมาณการปล่อย (tCO ₂ eq ต่อปี)	สัดส่วนการปล่อยทั้งหมด (%)
ประเภทที่ 1	1. การเผาไหม้แบบอยู่กับที่จากการใช้เชื้อเพลิง สำหรับการตัดหญ้า ภายในมหาวิทยาลัย	9.16 (1.06%)	0.11
	2. การเผาไหม้แบบเคลื่อนที่จากการใช้เชื้อเพลิง สำหรับยานพาหนะของ มหาวิทยาลัย	24.76 (2.88%)	0.29
	3. การเกิดก๊าซมีเทนจากถังบำบัดสิ่งปฏิกูล	626.16 (72.84%)	7.22
	4. การรั่วไหลของสารทำความเย็นจากเครื่องปรับอากาศ	199.58 (23.22%)	2.30
รวมปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของขอบเขตที่ 1		859.66 (100%)	9.92
รายงานแยก*	1. การรั่วไหลของสารทำความเย็น R-22	311.17 (100%)	-
ประเภทที่ 2	1. การใช้ไฟฟ้าภายในมหาวิทยาลัย	2,401.54 (100%)	27.70
	รวมปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของขอบเขตที่ 2	2,401.54 (100%)	27.70
ประเภทที่ 3	1. การใช้กระดาษ A4	4.38 (0.08%)	0.05
	2. การใช้น้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าสำรองของระบบ เครื่องขั้วมหาวิทยาลัยที่ซื้อบริการมาจากหน่วยงานภายนอก	2.11 (0.04%)	0.02
	3. การได้มาซึ่งเชื้อเพลิงและพลังงาน	478.18 (8.84%)	5.52
	4. การกำจัดขยะมูลฝอยที่นำไปฝังกลบภายนอกมหาวิทยาลัย	1,294.39 (23.93%)	14.93
	5. การเดินทางไป-กลับระหว่างมหาวิทยาลัยและที่พักของบุคลากรและ นักศึกษาด้วยยานพาหนะส่วนตัว	3,629.61 (67.11%)	41.86
รวมปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของขอบเขตที่ 3		5,408.65 (100%)	62.38
ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด (ขอบเขตที่ 1+2+3)		8,669.85	100

หมายเหตุ : *การรั่วไหลของสารทำความเย็น R-22 ซึ่งเป็นสารในกลุ่มไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrochlorofluorocarbons (HCFCs)) ภายใต้ ข้อกำหนดของพิธีสารมอนทรีออลถูกแยกรายงานต่างหากเพื่อความโปร่งใสในการรายงาน แม้ว่าจะเป็นการปล่อยโดยตรงจากกิจกรรม ภายในองค์กร แต่ไม่ได้รวมในปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามแนวทางการรายงานขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือน กระจก (องค์การมหาชน) สำหรับสารทำความเย็นที่เป็นสารทำลายชั้นโอโซน (Ozone-depleting substances (ODS))

4.2 แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ (Hotspots)

จากการวิเคราะห์แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา พบว่า แหล่งปล่อยหลัก 3 อันดับแรก ได้แก่ การเดินทางไป-กลับของบุคลากรและนักศึกษาด้วยยานพาหนะส่วนตัว การใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบอาคารและส่วนกลาง และการกำจัดขยะมูลฝอยที่นำไปฝังกลบภายนอกมหาวิทยาลัย ซึ่งรวมกันคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 84.49 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 5 ผลดังกล่าวสะท้อนว่าโครงสร้างการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยไม่ได้เกิดจากกิจกรรมด้านพลังงานภายในองค์กรเพียงด้านเดียว แต่ยังเกิดจากกิจกรรมทางอ้อมที่สัมพันธ์กับพฤติกรรมการเดินทางและการใช้ทรัพยากรของประชากรภายในมหาวิทยาลัยอย่างชัดเจน

การใช้สมมติฐานรูปแบบการเดินทางร่วมกับข้อมูลประชากรจริงของมหาวิทยาลัย ช่วยให้สามารถประมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมการเดินทางไป-กลับของบุคลากรและนักศึกษาในขอบเขตที่ 3 ได้อย่างเป็นระบบภายใต้ข้อจำกัดของข้อมูลรายบุคคล และนำไปสู่ข้อค้นพบว่ากิจกรรมดังกล่าวเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญที่สุดของมหาวิทยาลัย

4.2.1 การเดินทางของบุคลากรและนักศึกษา กิจกรรมการเดินทางไป-กลับระหว่างมหาวิทยาลัยและที่พักของบุคลากรและนักศึกษาด้วยยานพาหนะส่วนตัวเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด คิดเป็น 3,629.61 tCO₂eq ต่อปี หรือร้อยละ 41.86 ของการปล่อยทั้งหมด ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่ากิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการเดินทางของประชากรภายในมหาวิทยาลัยมีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร และบ่งชี้ถึงลักษณะเฉพาะของมหาวิทยาลัยในพื้นที่ภูมิภาคที่มีข้อจำกัดด้านระบบขนส่งสาธารณะ ส่งผลให้การพึ่งพายานพาหนะส่วนบุคคลกลายเป็นปัจจัยสำคัญของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กร

4.2.2 การใช้พลังงานไฟฟ้า การใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบอาคารและส่วนกลางของมหาวิทยาลัยเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงเป็นอันดับที่สอง คิดเป็น 2,401.54 tCO₂eq ต่อปี หรือร้อยละ 27.70 ของการปล่อยทั้งหมด

ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการดำเนินกิจกรรมหลักของมหาวิทยาลัย ทั้งด้านการเรียนการสอน การวิจัย การบริหารจัดการ และการใช้พื้นที่ส่วนกลาง ยังคงพึ่งพาการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง จึงเป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบสำคัญของโครงสร้างการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัย

4.2.3 การกำจัดขยะมูลฝอย การกำจัดขยะมูลฝอยที่นำไปฝังกลบภายนอกมหาวิทยาลัยเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงเป็นอันดับที่สาม คิดเป็น 1,294.39 tCO₂eq ต่อปี หรือร้อยละ 14.93 ของการปล่อยทั้งหมด โดยการปล่อยหลักเกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศในหลุมฝังกลบ ซึ่งก่อให้เกิดก๊าซมีเทน ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการจัดการของเสียยังเป็นประเด็นสำคัญที่มีผลต่อคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของมหาวิทยาลัยอย่างมีนัยสำคัญ และควรได้รับความสำคัญควบคู่กับการจัดการด้านพลังงานและการเดินทาง

4.2.4 แหล่งปล่อยสำคัญในขอบเขตที่ 1 แม้ขอบเขตที่ 1 จะมีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยรวมต่ำกว่าขอบเขตที่ 2 และขอบเขตที่ 3 แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะกิจกรรมที่องค์กรสามารถควบคุมได้โดยตรง พบว่า การเกิดก๊าซมีเทนจากถังบำบัดสิ่งปฏิกูลเป็นแหล่งปล่อยที่ควรได้รับความสนใจ เนื่องจากเกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนภายในระบบสุขาภิบาลขององค์กร กิจกรรมดังกล่าวมีความสำคัญในเชิงการบริหารจัดการ เนื่องจากเป็นการปล่อยทางตรงที่องค์กรสามารถกำหนดมาตรการควบคุมและลดการปล่อยได้ในระดับหนึ่ง ทั้งนี้ การศึกษาครั้งนี้พิจารณาเฉพาะการปล่อยจากถังบำบัดสิ่งปฏิกูล และไม่รวมระบบบำบัดน้ำเสียรวมขององค์กร เนื่องจากมหาวิทยาลัยไม่มีระบบดังกล่าวภายในขอบเขตการศึกษา

โดยสรุป แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญของมหาวิทยาลัยในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยกิจกรรมการเดินทาง การใช้พลังงานไฟฟ้า การกำจัดขยะมูลฝอย และแหล่งปล่อยทางตรงบางส่วนในขอบเขตที่ 1 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าโครงสร้างการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยเกิดจากทั้งกิจกรรมภายในองค์กรและกิจกรรมทางอ้อมของประชากรภายในมหาวิทยาลัยร่วมกันอย่างชัดเจน โดยเฉพาะบทบาท

เด่นของการปล่อยในขอบเขตที่ 3 และกิจกรรมการเดินทางในบริบทของมหาวิทยาลัยภูมิภา

4.3 อัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เมื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเทียบกับจำนวนประชากรทั้งบุคลากรและนักศึกษา (ภาคปกติและภาคพิเศษ) รวม 9,189 คน พบว่า อัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.94 tCO₂eq ต่อคนต่อปี

ค่าเฉลี่ยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อคนดังกล่าวสามารถใช้เป็นค่าฐานของมหาวิทยาลัยสำหรับการติดตามแนวโน้มการปล่อยในอนาคต และใช้เปรียบเทียบประสิทธิผลของมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกในปัดต่อไปได้อย่างเป็นระบบ

4.4 การประเมินความไม่แน่นอน ผลการประเมินความไม่แน่นอนของข้อมูลตามเกณฑ์ขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) แสดงดังตารางที่ 6 ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 2 ระดับหลัก ดังนี้

4.4.1 ระดับความไม่แน่นอนสูง คุณภาพ ข้อมูลไม่ดี (ระดับที่ 1) ครอบคลุมกิจกรรมในขอบเขตที่ 1 ทั้งหมด รวมถึงกิจกรรมการเดินทางของบุคลากรและนักศึกษา และการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตไฟฟ้าสำรองในขอบเขตที่ 3 สาเหตุหลักเกิดจากการใช้ข้อมูลกิจกรรมที่ได้จากการ

ประมาณค่า การกำหนดสมมติฐาน และการใช้ค่า EF จากแหล่งอ้างอิงที่ไม่ใช่ข้อมูลเฉพาะระดับประเทศ จึงทำให้ผลการประเมินของกิจกรรมในกลุ่มนี้ควรได้รับการตีความด้วยความระมัดระวังมากกว่ากิจกรรมที่ใช้ข้อมูลกิจกรรมจริงจากมิเตอร์หรือใบเสร็จโดยตรง

4.4.2 ระดับความไม่แน่นอนเล็กน้อย คุณภาพข้อมูลปานกลาง (ระดับที่ 2) ครอบคลุมกิจกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้า การใช้กระดาษ A4 การได้มาซึ่งเชื้อเพลิงและพลังงาน และการกำจัดขยะมูลฝอย เนื่องจากกิจกรรมเหล่านี้เลือกใช้ค่า EF ของประเทศไทย และมีการเก็บรวบรวมข้อมูลกิจกรรมจากมิเตอร์และใบเสร็จเป็นรายเดือน จึงมีความน่าเชื่อถือของข้อมูลในระดับที่สูงกว่ากิจกรรมที่ต้องอาศัยการประมาณค่า

ผลการประเมินดังกล่าวสะท้อนว่า แม้ข้อมูลกิจกรรมบางส่วนของมหาวิทยาลัยมีความน่าเชื่อถือในระดับปานกลาง แต่กิจกรรมที่อาศัยการประมาณค่าและสมมติฐาน โดยเฉพาะกิจกรรมการเดินทางในขอบเขตที่ 3 ยังคงเป็นส่วนที่ควรได้รับการพัฒนาระบบการจัดเก็บข้อมูลให้มีความละเอียดและเป็นระบบมากขึ้นในอนาคต ทั้งนี้ สำหรับกิจกรรมการเดินทางซึ่งมีความไม่แน่นอนในระดับสูง ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ความไวของสมมติฐานเพิ่มเติมในหัวข้อ 4.5 เพื่อประเมินผลกระทบต่อค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6 การประเมินความไม่แน่นอนจากการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร

ขอบเขต	แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจก	การประเมินความไม่แน่นอน			
		ระดับคุณภาพของลักษณะการเก็บข้อมูล	ระดับคุณภาพของค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (B)	ผลการประเมิน (AxB)	ระดับความไม่แน่นอนและคุณภาพของข้อมูล
		(A)			ข้อมูล
ประเภทที่ 1	1. การเผาไหม้แบบอยู่กับที่จากการใช้เชื้อเพลิงสำหรับการตัดหญ้าภายในมหาวิทยาลัย	3	1	3	1
	2. การเผาไหม้แบบเคลื่อนที่จากการใช้เชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะของมหาวิทยาลัย	3	1	3	1
	3. การเกิดก๊าซมีเทนจากถังบำบัดสิ่งปฏิกูล	1	1	1	1
	4. การรั่วไหลของสารทำความเย็นจากเครื่องปรับอากาศ	3	1	3	1
รายงานแยก*	1. การรั่วไหลของสารทำความเย็น R-22	3	1	3	1
ประเภทที่ 2	1. การใช้ไฟฟ้าภายในมหาวิทยาลัย	3	3	9	2

ขอบเขต	แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจก	การประเมินความไม่แน่นอน			
		ระดับคุณภาพ ของลักษณะ การเก็บข้อมูล (A)	ระดับคุณภาพ ของค่าการ ปล่อยก๊าซเรือน กระจก (B)	ผลการ ประเมิน (AxB)	ระดับความไม่ แน่นอนและ คุณภาพของ ข้อมูล
ประเภทที่ 3	1. การใช้กระดาษ A4	3	3	9	2
	2. การใช้น้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับการผลิต กระแสไฟฟ้าสำรองของระบบเครือข่าย มหาวิทยาลัยที่ซื้อบริการมาจากหน่วยงาน ภายนอก	3	1	3	1
	3. การได้มาซึ่งเชื้อเพลิงและพลังงาน	3	3	9	2
	4. การกำจัดขยะมูลฝอยที่นำไปฝังกลบภายนอก มหาวิทยาลัย	3	3	9	2
	5. การเดินทางไป-กลับระหว่างมหาวิทยาลัยและ ที่พักของบุคลากรและนักศึกษาด้วยยานพาหนะ ส่วนตัว	1	1	1	1

4.5 ผลการวิเคราะห์ความไวของสมมติฐานรูปแบบการเดินทาง ผลการวิเคราะห์ความไวของสมมติฐานรูปแบบการเดินทางแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรหลักได้แก่ ระยะทางการเดินทางและจำนวนวันเดินทาง ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมการเดินทาง เมื่อปรับสมมติฐานที่ระดับร้อยละ ± 10 , ± 20 และ ± 30 จากค่าฐาน พบว่าค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมของมหาวิทยาลัยเปลี่ยนแปลงประมาณร้อยละ ± 4.19 , ± 8.37 และ ± 12.56 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 7

ผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของระยะทางการเดินทางและจำนวนวันเดินทางให้ผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมในลักษณะเดียวกัน เนื่องจากทั้งสองตัวแปรเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นของข้อมูลกิจกรรมที่ใช้ในการคำนวณ อย่างไรก็ตาม แม้ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมของมหาวิทยาลัยจะเปลี่ยนแปลงตามระดับของสมมติฐาน แต่ข้อสรุปหลักของงานวิจัยยังไม่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ กิจกรรมการเดินทางไป-กลับของบุคลากรและนักศึกษา ยังคงเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญที่สุดของมหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความไวของสมมติฐานรูปแบบการเดินทางต่อค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัย

สถานการณ์ จำลอง	การปล่อยจากการ เดินทาง (tCO ₂ eq ต่อปี)	การปล่อยรวม ขององค์กร (tCO ₂ eq ต่อปี)	การ เปลี่ยนแปลง ของการปล่อย รวม (%)
-30%	2,540.73	7,580.97	-12.56
-20%	2,903.69	7,943.93	-8.37
-10%	3,266.65	8,306.89	-4.19
ค่าฐาน	3,629.61	8,669.85	-
10%	3,992.57	9,032.81	4.19
20%	4,355.53	9,395.77	8.37
30%	4,718.49	9,758.73	12.56

5. การอภิปรายผลและสรุป

คณะผู้วิจัยสามารถสรุปและอภิปรายผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผล การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราชตามมาตรฐาน ISO 14064-1 และแนวทางขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) พร้อมทั้งวิเคราะห์แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีนัยสำคัญขององค์กร และจัดทำฐานข้อมูลเพื่อใช้สนับสนุนการกำหนดมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัย ผลการศึกษาพบว่า มหาวิทยาลัยมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิรวมทั้งสิ้น 8,669.85 tCO₂eq ต่อปี หรือคิดเป็นอัตราการปล่อยเฉลี่ย 0.94 tCO₂eq ต่อคนต่อปี

เมื่อจำแนกตามขอบเขตการปล่อยก๊าซเรือนกระจกพบว่า ขอบเขตที่ 3 มีสัดส่วนสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 62.38 ของการปล่อยทั้งหมด รองลงมาคือ ขอบเขตที่ 2 ร้อยละ 27.70 และขอบเขตที่ 1 ร้อยละ 9.92 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า แหล่งปล่อยทางอ้อมอื่น ๆ มีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยมากกว่าการปล่อยทางตรงและการใช้พลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

เมื่อวิเคราะห์แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญพบว่า การเดินทางไป-กลับระหว่างมหาวิทยาลัยและที่พักของบุคลากรและนักศึกษาด้วยยานพาหนะส่วนตัวเป็นแหล่งปล่อยสูงสุด คิดเป็น 3,629.61 tCO₂eq ต่อปี รองลงมาคือ การใช้พลังงานไฟฟ้าภายในมหาวิทยาลัย 2,401.54 tCO₂eq ต่อปี และการกำจัดขยะมูลฝอยที่นำไปฝังกลบภายนอกมหาวิทยาลัย 1,294.39 tCO₂eq ต่อปี ผลการศึกษาดังนี้ชี้ให้เห็นว่า ประเด็นสำคัญของการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยควรมุ่งเน้นที่การจัดการการเดินทาง การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า และการจัดการของเสียควบคู่กัน

นอกจากนี้ ฐานข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรที่ได้จากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการกำหนดนโยบายและแผนปฏิบัติการด้านสิ่งแวดล้อมของมหาวิทยาลัยในอนาคต รวมถึงใช้เป็นแนวทางสำหรับการขับเคลื่อนมหาวิทยาลัยสู่การเป็นองค์กรคาร์บอนต่ำอย่างยั่งยืน

5.2 อภิปรายผล การศึกษานี้ สามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

5.2.1 ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างการปล่อยก๊าซ

เรือนกระจก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สัดส่วนหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราชเกิดขึ้นในขอบเขตที่ 3 (ร้อยละ 62.38) ซึ่งแตกต่างจากสถาบันอุดมศึกษาอื่นๆ ที่มีแหล่งปล่อยหลักอยู่ในขอบเขตที่ 2 [5], [6], [9] ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษานี้ให้ความสำคัญกับการประเมินขอบเขตที่ 3 อย่างครอบคลุม นอกจากนี้ ผลการศึกษายังสะท้อนถึงลักษณะเฉพาะของสถาบันอุดมศึกษาที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ภูมิภาค ซึ่งระบบขนส่งสาธารณะยังไม่สามารถเข้าถึงพื้นที่พักอาศัยได้อย่างทั่วถึงและเพียงพอ ส่งผลให้การเดินทางไป-กลับของนักศึกษาและบุคลากรด้วยยานพาหนะส่วนบุคคลกลายเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลัก (ร้อยละ 41.86 ของการปล่อยทั้งหมด)

ผลดังกล่าวยังช่วยยืนยันว่าการวิเคราะห์การปล่อยทางอ้อมอย่างเป็นระบบมีความจำเป็นอย่างยิ่งในบริบทของมหาวิทยาลัย ซึ่งมีลักษณะการดำเนินงานแตกต่างจากองค์กรทั่วไป เนื่องจากมีประชากรจำนวนมากใช้พื้นที่ร่วมกัน และมีกิจกรรมที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมของบุคลากรและนักศึกษา เป็นองค์ประกอบสำคัญของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยรวม ดังนั้น บทบาทของขอบเขตที่ 3 ในการศึกษาจึงไม่ใช่เพียงผลเชิงปริมาณเท่านั้น แต่ยังเป็นข้อค้นพบที่สะท้อนลักษณะเฉพาะของระบบการดำเนินงานของมหาวิทยาลัยในฐานะองค์กรสาธารณะขนาดใหญ่ในพื้นที่ภูมิภาค

แม้ การเดินทางจะเป็นแหล่งปล่อยหลักของมหาวิทยาลัย แต่การใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบอาคารและส่วนกลางยังคงเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีความสำคัญมาก (ร้อยละ 27.70) รองลงมาจากกิจกรรมการเดินทาง ซึ่งสะท้อนลักษณะของสถาบันอุดมศึกษาที่ต้องใช้อาคารเรียน อาคารสำนักงาน พื้นที่ส่วนกลาง และระบบสนับสนุนการเรียนการสอนอย่างต่อเนื่องตลอดปีการศึกษา ดังนั้น ผลการศึกษานี้จึงแสดงให้เห็นว่าการบริหารจัดการพลังงานยังคงเป็นองค์ประกอบหลักของการลดก๊าซเรือนกระจกในระดับองค์กร และไม่ควรถูกลดความสำคัญลงแม้ขอบเขตที่ 3 จะมีสัดส่วนการปล่อยสูงกว่า

ขณะที่การกำจัดขยะมูลฝอย (ร้อยละ 14.93) ซึ่งให้เห็ถึงความเป็นในการนำนโยบายเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และโครงการขยะเหลือศูนย์ (Zero Waste) มาปรับใช้ โดยเฉพาะการจัดการขยะอินทรีย์ที่เกิดขึ้นภายในองค์กร

แม้ขอบเขตที่ 1 จะมีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยรวมต่ำกว่าขอบเขตที่ 2 และขอบเขตที่ 3 แต่ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า แหล่งปล่อยทางตรงบางกิจกรรมยังมีความสำคัญในเชิงการบริหารจัดการ โดยเฉพาะการเกิดก๊าซมีเทนจากถังบำบัดสิ่งปฏิกูล ซึ่งเป็นการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในระบบสุขาภิบาลของมหาวิทยาลัย กิจกรรมลักษณะนี้มีความสำคัญเนื่องจากเป็นแหล่งปล่อยที่องค์กรสามารถควบคุม ดูแล และวางมาตรการลดการปล่อยได้โดยตรงมากกว่ากิจกรรมหลายประเภทในขอบเขตที่ 3 เช่น การปรับปรุงการบำรุงรักษาระบบสุขาภิบาล การควบคุมการสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ และการติดตามข้อมูลการใช้งานอย่างเป็นระบบเพื่อประเมินประสิทธิภาพในระยะยาว

5.2.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราการปล่อยก๊าซ

เรือนกระจก มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช มีอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ย 0.94 tCO₂eq ต่อคนต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับสถาบันอุดมศึกษาอื่นในประเทศไทย พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับคณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่มีอัตรา 0.93 และ 1.08 tCO₂eq ต่อคนต่อปี ในปี 2566 และ 2567 ตามลำดับ [3] และต่ำกว่ามหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิตที่มีอัตรา 1.62 tCO₂eq ต่อนักศึกษาหนึ่งคนต่อปี [4] และมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซียที่มีอัตรา 1.61 tCO₂eq ต่อคนต่อปี [7] แต่สูงกว่ามหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิที่มีอัตรา 0.569 tCO₂eq ต่อนักศึกษาหนึ่งคนต่อปี [8] และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (วิทยาเขตบางเขน) ที่มีอัตรา 0.64 และ 0.71 tCO₂eq ต่อนักศึกษาหนึ่งคนต่อปี ในปี 2555 และ 2556 ตามลำดับ [16]

อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ระหว่างสถาบันการศึกษาต่างๆ นั้น ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้โดยตรงอย่างเต็มที่ เนื่องจากมีปัจจัยหลายประการที่แตกต่างกัน ได้แก่ ขอบเขตการศึกษา วิธีการเก็บ

ข้อมูล (ข้อมูลจริงหรือการประมาณค่า) ความทันสมัยของค่า EF ที่ใช้ (ฐานข้อมูลประเทศไทยหรือสากล) ตลอดจนลักษณะทางกายภาพและรูปแบบการดำเนินงานของแต่ละสถาบัน ดังนั้น การเปรียบเทียบที่มีความหมายควรคำนึงถึงบริบทและข้อจำกัดของแต่ละการศึกษา และมุ่งเน้นที่การเรียนรู้แนวทางการจัดการที่เหมาะสมมากกว่าการเปรียบเทียบตัวเลขเพียงอย่างเดียว

5.2.3 ความไม่แน่นอนของข้อมูล การประเมินพบความไม่แน่นอนสูงในแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากขอบเขตที่ 1 การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตไฟฟ้าสำรอง และการเดินทางของบุคลากรและนักศึกษาในขอบเขตที่ 3 เนื่องจากข้อจำกัดด้านฐานข้อมูลค่า EF ที่พัฒนาเฉพาะสำหรับบริบทของประเทศไทยในบางกิจกรรม การศึกษาจึงใช้ค่า EF จากฐานข้อมูลระดับสากลเป็นตัวแทนในการคำนวณ โดยค่า EF ดังกล่าวแม้จะได้รับการยอมรับในระดับสากล แต่ยังไม่สามารถสะท้อนลักษณะเฉพาะของกิจกรรม เทคโนโลยี และรูปแบบการใช้พลังงานในบริบทของประเทศไทยได้อย่างเหมาะสม ซึ่งเป็นแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนในผลการประเมิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของสถาบันอุดมศึกษาอื่น เช่น มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต [4] มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย [7] และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (วิทยาเขตบางเขน) [16]

นอกจากนี้ข้อมูลกิจกรรมที่ใช้ในการประเมินการเกิดก๊าซมีเทนจากถังบำบัดสิ่งปฏิกูล และการเดินทางไป-กลับระหว่างมหาวิทยาลัยและที่พักของบุคลากรและนักศึกษาด้วยยานพาหนะส่วนตัวเป็นเพียงข้อมูลที่ได้มาจากแบบจำลองเท่านั้น ขณะที่การใช้ไฟฟ้า กระดาษ และการกำจัดขยะ มีความไม่แน่นอนต่ำกว่าเนื่องจากใช้ค่า EF ของประเทศไทย และอ้างอิงข้อมูลจากใบเสร็จจริง ความโปร่งใสในการรายงานข้อจำกัดนี้แสดงถึงความรับผิดชอบทางวิชาการที่จะนำไปสู่การพัฒนากระบวนการจัดเก็บข้อมูลที่ดีขึ้นและการพัฒนาฐานข้อมูล EF ระดับประเทศที่จำเป็นต่อไป

5.2.4 ความน่าเชื่อถือของข้อค้นพบ จุดเด่นสำคัญของงานวิจัยนี้อยู่ที่การประยุกต์ใช้สมมติฐานรูปแบบการเดินทางร่วมกับข้อมูลประชากรจริงของมหาวิทยาลัย เพื่อ

ประมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมการเดินทางในขอบเขตที่ 3 ภายใต้ข้อจำกัดของข้อมูลรายบุคคล วิธีการดังกล่าวช่วยให้สามารถสะท้อนลักษณะการเดินทางของบุคลากรและนักศึกษาในบริบทของมหาวิทยาลัยได้ดีกว่าการละเว้นกิจกรรมนี้ออกจากการประเมิน หรือการใช้ค่าประมาณแบบกว้างที่ไม่สอดคล้องกับพื้นที่ศึกษา แม้ว่าวิธีดังกล่าวจะไม่ได้เป็นการสุ่มตัวอย่างเชิงสถิติอย่างเคร่งครัด แต่การเชื่อมโยงข้อมูลสำรวจเบื้องต้นเข้ากับข้อมูลประชากรจริงจำนวนวันเดินทาง และหลักความระมัดระวัง ช่วยให้ผลการประเมินมีความสอดคล้องกับบริบทขององค์กรในระดับที่เหมาะสม

นอกจากนี้ การประเมินความไม่แน่นอนและการวิเคราะห์ความไวของสมมติฐานรูปแบบการเดินทางยังช่วยสนับสนุนความน่าเชื่อถือของผลการศึกษา โดยแม้ว่าค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจะเปลี่ยนแปลงตามระดับของสมมติฐาน แต่ข้อสรุปหลักของงานวิจัยยังคงเดิม กล่าวคือกิจกรรมการเดินทางยังคงเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญที่สุดของมหาวิทยาลัย ผลดังกล่าวสะท้อนว่า ข้อค้นพบหลักของงานวิจัยมีเสถียรภาพในเชิงทิศทาง และสนับสนุนว่า การใช้สมมติฐานรูปแบบการเดินทางเป็นแนวทางที่มีประโยชน์สำหรับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของมหาวิทยาลัยในกรณีที่ข้อมูลรายบุคคลยังไม่สมบูรณ์

5.2.5 แนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กร จำเป็นต้องใช้แนวทางแบบผสมผสาน ดังนี้

1) มาตรการที่องค์กรสามารถควบคุมได้โดยตรง เช่น (1) การทดแทนสารทำความเย็น R-22 ในระบบปรับอากาศด้วยสารทดแทนที่มีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) ต่ำกว่า (2) การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งหากสามารถผลิตไฟฟ้าทดแทนการใช้ไฟฟ้าเดิมได้ร้อยละ 20-30 จะลดการปล่อยจากขอบเขตที่ 2 ได้ประมาณ 480-720 tCO₂eq ต่อปี และ (3) นโยบายสำนักงานไร้กระดาษ หากสามารถลดปริมาณการใช้กระดาษลงได้ร้อยละ 80 จะสามารถลดการปล่อยได้ 3.50 tCO₂eq ต่อปี เป็นต้น

2) มาตรการที่องค์กรสามารถส่งเสริมหรือจูงใจได้ เช่น นโยบายการจัดการขยะเชิงรุก หากส่งเสริมการคัดแยกขยะตั้งแต่ต้นทางแทนการส่งไปฝังกลบได้ร้อยละ 50 จะสามารถลดการปล่อยได้ 647.20 tCO₂eq ต่อปี การพัฒนาระบบขนส่งมวลชนภายในมหาวิทยาลัย นโยบายการทำงานที่ยืดหยุ่น และส่งเสริมการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการเดินทางของบุคลากรและนักศึกษา

ความท้าทายสำคัญอยู่ที่การจัดการแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขอบเขตที่ 3 แม้จะมีสัดส่วนสูงสุด แต่อยู่นอกเหนือการควบคุมโดยตรงขององค์กร อย่างไรก็ตามสถาบันอุดมศึกษามีบทบาทหลักในฐานะแหล่งสร้างความรู้และพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ จึงสามารถใช้กลไกทางการศึกษาและการสร้างจิตสำนึกในการส่งเสริมพฤติกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตลอดจนเป็นต้นแบบในการดำเนินงานที่ยั่งยืนให้แก่สังคมและชุมชนโดยรอบได้

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาค้างต่อไป การการศึกษาครั้งต่อไป ควรพัฒนาระบบเก็บข้อมูลกิจกรรมที่มีความละเอียดมากขึ้น โดยเฉพาะข้อมูลด้านการเดินทางของบุคลากรและนักศึกษา เช่น ระยะทางจริง ความถี่ในการเดินทาง ประเภทยานพาหนะ และชนิดเชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขอบเขตที่ 3 และลดความไม่แน่นอนของผลการศึกษา

นอกจากนี้ ควรมีการขยายขอบเขตการศึกษาไปสู่กิจกรรมทางอ้อมอื่น ๆ ที่ยังไม่ถูกรวมในการประเมินครั้งนี้ เพื่อให้การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรมีความครบถ้วนมากยิ่งขึ้น

อีกทั้ง ควรมีการศึกษาติดตามผลในปีถัดไปเพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยในระยะยาว และประเมินประสิทธิผลของมาตรการลดการปล่อยที่นำไปใช้จริง ทั้งนี้ ข้อมูลดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาฐานข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรของมหาวิทยาลัยให้มีความต่อเนื่อง และใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการกำหนดนโยบายด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช สำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Climate Change and Environment. 2024. *NDC Action Plan on Mitigation 2021–2030*. [Online]. Available: <https://www.dcce.go.th/datacenter/653/> (in Thai)
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change. [Online]. Available: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- [3] Suksatit, P. and et al. 2025. "Assessing carbon footprint for organization (CFO): Case study of the Faculty of Environment, Kasetsart University," *EnvironmentAsia*, 18(Special Issue): pp. 143-154. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14456/ea.2025.30>
- [4] Usubharatana, P. and Phungrussami, H. 2014. "Carbon footprint of organization: Case study for Thammasat University," *Thai Science and Technology Journal*, 22(1): pp. 1-12. [Online]. Available: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj/article/view/15101/13845> (in Thai)
- [5] Choenthanomwong, F. and Sumpuntamas, T. 2024. "Carbon footprint assessment of Walailak University," *Science, Technology, and*

- Social Sciences Procedia*, 2024(1): p. NCR2R19.
[Online]. Available: <https://wjst.wu.ac.th/index.php/stssp/article/view/25831> (in Thai)
- [6] Thanatrakolsri, P. and Sirithian, D. 2024. "Evaluation of greenhouse gas emissions and mitigation measures at Thammasat University's Lampang campus in Thailand," *Environmental Health Insights*, 18: pp. 1-9.
[Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/11786302241253589>
- [7] Maimun, T. and et al. 2018. "Organization carbon footprint assessment of Eastern Asia University," *EAU Heritage Journal: Science and Technology*, 12(2): pp. 195-209. [Online]. Available: <https://he01.tci-thaijo.org/index.php/EAUHJSci/article/view/134724/105650> (in Thai)
- [8] Sudha, S. and Hirun, D. 2019. "Carbon footprint of an organization: Case study of Chaiyaphum Rajabhat University," *Engineering Journal Chiang Mai University*, 26(1): pp. 227-233.
[Online]. Available: <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/EJCM/10990888.pdf> (in Thai)
- [9] Samara, F. and et al. 2022. "Carbon footprint at a United Arab Emirates university: GHG protocol," *Sustainability*, 14(5): p. 2522.
[Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su14052522>
- [10] International Organization for Standardization. 2018. *Greenhouse gases—Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals* (ISO 14064-1:2018). Geneva, Switzerland: ISO.
- [11] Thailand Greenhouse Gas Management Organization. 2022. *Requirements for the calculation and reporting of carbon footprint for organization*, 8th ed. [Online]. Available: <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/tools/files.php?mod=YjNkblXNXBlbUYwYVc5dVgyUnZkMjVzYjJGaw&type=WDBaSlRFVlQ&files=TkRFPQ> (in Thai)
- [12] Greenhouse Gas Protocol. 2011. *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard*. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. [Online]. Available: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613_2.pdf
- [13] Thailand Greenhouse Gas Management Organization. 2022. *Carbon footprint for organization: Emission factor (CFO)*. [Online]. Available: <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=YjNkblXNXBlbUYwYVc5dVgyVnRhWE56YVc5dQ> (in Thai)
- [14] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. "Chapter 6: Wastewater treatment and discharge," in *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5: Waste*. [Online]. Available: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_6_Ch6_Wastewater.pdf
- [15] Thailand Greenhouse Gas Management Organization. 2022. *Carbon footprint of product: Emission factor (CFP)*. [Online]. Available: <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/>

index.php?lang=TH&mod=Y0hKdlpIVmpkSE5
mWlcxcGMzTnBiMjQ9 (in Thai)

- [16] Mangkang, R. 2013. "Organizational carbon footprint of Kasetsart University to promote a green university," Research report. Bangkok, Thailand: Kasetsart University. (in Thai)

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 และนำมาถ้อยแถลง เรียบเรียงขึ้นโดยผู้เขียน

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 เพื่อเรื่องที่จะลงตีพิมพ์ จะได้รับการดำเนินการตามขั้นตอนการวินิจฉัย และพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารต่อไป

2.4 ต้นฉบับที่ส่งมาเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ ต้องเป็นไปตามข้อกำหนด คำแนะนำในการตีพิมพ์ต้นฉบับ

2.5 เรื่องที่ได้รับพิจารณาตีพิมพ์ 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 หากมีหัวข้อรอง หัวข้อย่อย และหัวข้อย่อย ๆ ให้ใช้เลขระบบทศนิยมกำกับหัวข้อดังกล่าว เช่น หัวข้อรอง 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 แผนผังผังมโนทัศน์ 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 และตาราง แทรกในเนื้อหา 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 มื้อองค์ประกอบ 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) **สาระสังเขป (Summary)** เป็นการย่อเนื้อความของบทความทั้งเรื่องให้สั้นได้เนื้อหาสาระครบถ้วน

4) **คำสำคัญ (Keywords)** (ถ้ามี) ให้ใช้คำที่ปรากฏอยู่ในเนื้อเรื่องซึ่งเป็นตัวแทนบอกรหัสการ สิ่งที่ศึกษา ผลการศึกษา สาขา การใช้ประโยชน์และสถานที่ คำสำคัญให้เขียนทั้งคำสำคัญภาษาไทย และภาษาอังกฤษแต่ละชุดไม่เกิน 5 คำ

4.2.2 เนื้อหา (Main texts) ในบทความทางวิชาการ มื้อองค์ประกอบดังนี้

1) **บทนำ (Introduction)** กล่าวถึงความน่าสนใจของเรื่องที่น่าสนใจก่อนเข้าสู่เนื้อหา

2) **เนื้อหา (Content)** ควรนำเสนอพัฒนาการของเรื่องได้อย่างน่าสนใจ และเนื้อเรื่องมีเนื้อหาใหม่เหมาะสมกับสภาพปัจจุบัน

3) **สรุป (Conclusion)** เป็นการย่อเฉพาะข้อมูลจากเนื้อหาให้สั้นได้เนื้อหาสาระของเนื้อหาครบถ้วน

4) **เอกสารอ้างอิง (References)** ให้ระบุเฉพาะเอกสารที่ผู้เขียนบทความได้นำมาอ้างอิงในบทความวิชาการอย่างครบถ้วนรูปแบบของการเขียนเอกสารอ้างอิงให้จัดทำตามที่ระบุไว้ในข้อ 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 (,) คนสุดท้ายให้ เชื่อมด้วย “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 ควรใช้ตัวย่อเป็นภาษาอังกฤษที่ถูกต้อง และเป็นสากลการใช้ศัพท์วิทยาศาสตร์ให้ยึดคำบัญญัติของราชบัณฑิตยสถาน ชื่อสถานที่ต่าง ๆ ให้ใช้ตามประกาศของสำนักนายกรัฐมนตรี การเขียนคำที่มาจากภาษาต่างประเทศ หากต้องการทับศัพท์เป็นภาษาไทยหรือต้องการแปลเป็นภาษาไทย 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 1 (มกราคม - เมษายน) ปี พ.ศ. 2569**

- | | |
|---|--|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เขียวมั่ง | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.วีระชัย แสงฉาย | มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.เสาวนิตย์ กาญจนรัตน์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 4. รองศาสตราจารย์เรวัตติ์ สุขสีกาญจน์ | มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย แก้ววดี | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร.สรารัฐ จริตงาม | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| 7. รองศาสตราจารย์จรูญ เจริญเนตรกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.อรุณ ลูกจันทร์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย |
| 9. รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แก้วเกื้อกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 10. รองศาสตราจารย์ ดร.ธนศ ธนิตยธีรพันธ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 11. รองศาสตราจารย์ ดร.กฤติธฤต ทองสิน | มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา |
| 12. รองศาสตราจารย์ ดร.ชาตรี หอมเขียว | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย |
| 13. รองศาสตราจารย์ ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 14. รองศาสตราจารย์ ดร.ลักษณะนารา ขวัญชุม | มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ |
| 15. รองศาสตราจารย์ ดร.วรางคณา จุติดำรงพันธ์ | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |

**รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาภาษาอังกฤษวารสารวิชาการนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ประจำปี 4 ฉบับที่ 1 (มกราคม - เมษายน) ปี พ.ศ. 2569**

- | | |
|---|--------------------------------|
| 1. ดร.ธานี จินตสุทธิศักดิ์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไผ่ฟ้า 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
ในวารสารวิชาการนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี 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 และคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

พิมพ์ที่ สำนักงานหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏ
นครศรีธรรมราช 1812 อาคาร 18
เลขที่ 1 หมู่ที่ 4 ตำบลท่าจี่ว อำเภอเมืองนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280
โทรศัพท์: 075-377-439 e-mail: technstru.editorjournal@gmail.com