



JOURNAL OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND
ENGINEERING
PIBULSONGKRAM RAJABHAT UNIVERSITY



วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

ปีที่ 8 ฉบับที่ 2

มกราคม - เมษายน ปี 2569



ISSN 3057 - 0093 (Print) ISSN 3057 - 0107 (Online)



ข้อกำหนดมาตรฐาน วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

เพื่อให้วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เป็นวารสารที่มีคุณภาพได้มาตรฐานทางกองบรรณาธิการจึงมีข้อกำหนดของวารสารดังต่อไปนี้

1. วัตถุประสงค์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เป็นวารสารที่มีวัตถุประสงค์เพื่อ ตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการ และบทความปริทรรศน์ที่มีคุณภาพโดยผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ โดยมีเนื้อหาครอบคลุมเกี่ยวข้องกับงานวิจัยในสาขา เทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ สหวิทยาการ วิทยาศาสตร์ นวัตกรรมและการออกแบบ รวมถึงงานวิจัยที่มีการบูรณาการศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรมในสาขาที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามบทความที่ส่งเข้ามาเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารฯ จะต้องเป็นบทความที่ไม่เคยเผยแพร่ในวารสารหรือสิ่งพิมพ์ใดมาก่อน และจะต้องไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของวารสารหรือสิ่งพิมพ์อื่นๆ การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้ส่งบทความโดยตรง

2. ครอบคลุมสาขาที่เกี่ยวข้อง

2.1 สาขาวิชาเทคโนโลยี เน้น เทคโนโลยีอุตสาหกรรมและนวัตกรรม ได้แก่ เทคโนโลยีไฟฟ้า เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ เทคโนโลยีพลังงาน / พลังงานทดแทน เทคโนโลยีก่อสร้าง /โยธา เทคโนโลยีการผลิต มาตรฐาน วิศวกรรมซอฟต์แวร์ เทคโนโลยีเซรามิก การบริหารจัดการอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

2.2 สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ประยุกต์

2.3 สาขาวิชาที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และวิศวกรรม

3. การพิจารณาบทความ (Peer Review Process)

บทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารฯ จะต้องผ่านการพิจารณาให้ความเห็น ทบทวน และตรวจสอบวิพากษ์ วิจารณ์ ความถูกต้อง เหมาะสมทางวิชาการ จากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง จำนวนอย่างน้อย 3 ท่าน ตอบบทความในรูปแบบพิชญพิจารณา (Peer-Reviewed) ก่อนลงตีพิมพ์ และเป็นการประเมินแบบการปกปิดสองทาง (Double blinded)

ขั้นตอนการประเมินบทความมีกระบวนการดังต่อไปนี้

1. ผู้เขียนส่งไฟล์บทความไปยังระบบวารสารอิเล็กทรอนิกส์ของวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
2. กองบรรณาธิการดำเนินการแจ้งให้ผู้เขียนทราบ เมื่อกองบรรณาธิการได้รับไฟล์บทความเรียบร้อยแล้ว
3. กองบรรณาธิการดำเนินการตรวจสอบหัวข้อ บทความย่อ และเนื้อหาของบทความ รูปแบบการจัดพิมพ์บทความ ประเด็นทางจริยธรรม ตรวจสอบการคัดลอกบทความ (Plagiarism Checker) และความเหมาะสมและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของวารสาร รวมถึงประโยชน์ในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ ในเบื้องต้น
4. ในกรณีที่กองบรรณาธิการพิจารณาเห็นควรรับไว้พิจารณาตีพิมพ์ กองบรรณาธิการจะดำเนินการจัดส่งบทความเพื่อทำการกลั่นกรองต่อไปโดย ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง เพื่อตรวจสอบคุณภาพของบทความ ว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมที่จะลงตีพิมพ์หรือไม่ กระบวนการพิจารณากลั่นกรองนี้เป็นการประเมินแบบปกปิดสองทาง (Double blind review) กล่าวคือ จะไม่เปิดเผยชื่อผู้ส่งบทความให้ผู้ทรงคุณวุฒิทราบ และจะไม่เปิดเผยชื่อผู้ทรงคุณวุฒิให้ผู้เขียนทราบ และกองบรรณาธิการจะไม่เปิดเผยทั้งชื่อผู้เขียนและชื่อผู้ทรงคุณวุฒิให้บุคคลอื่น ทราบด้วยเช่นกัน
5. เมื่อบทความได้รับการทบทวน ประเมิน วิจัยจากผู้ทรงคุณวุฒิ และมีความเห็นอย่างไร กองบรรณาธิการจะ ดำเนินการดังต่อไปนี้

- กรณีมีความเห็นให้ ผู้เขียนแก้ไขบทความ (Revision Require) กองบรรณาธิการ จะจัดส่งผลการประเมิน รวมถึงคำแนะนำจากบรรณาธิการให้ผู้เขียน แก้ไขบทความ และเมื่อแก้ไขเสร็จแล้วให้ ส่งกลับคืนมายังบรรณาธิการ และพิจารณาใหม่อีกครั้งโดยอาจส่งให้ ผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบผลการแก้ไข หรือ บรรณาธิการตรวจสอบ ด้วยตนเอง ซึ่งหากต้องมีการแก้ไขในรอบที่ สอง (round 2) ก็จะมีการดำเนินการส่งกลับไปยังผู้เขียนให้แก้ไข และตรวจสอบผลการแก้ไข จนกว่าจะมีเนื้อหาบทความสมบูรณ์

- กรณีมีความเห็นให้ ปฏิเสธการรับตีพิมพ์ (Decline Submission) กองบรรณาธิการ จะส่งจดหมายแจ้งผลดังกล่าวให้ผู้เขียนรับทราบ พร้อมทั้งเหตุผลของการปฏิเสธการรับ

- กรณีมีความเห็นให้ ตอรับการตีพิมพ์ (Accept Submission) กองบรรณาธิการ จะแจ้งผู้เขียนให้ทราบ และดำเนินการส่งไฟล์บทความเข้าสู่ขั้นตอนการปรับแก้ไขต้นฉบับ การพิสูจน์อักษร และการจัดรูปแบบเอกสารตามเทมเพลตบทความของวารสาร ก่อนนำไปเผยแพร่ โดยฝ่ายจัดการวารสาร

ทั้งนี้ กิจกรรมการพิจารณาบทความทั้งหมด ต้องดำเนินการผ่านทางระบบวารสารอิเล็กทรอนิกส์ของวารสาร ภายในระบบเว็บไซต์ Thai Journal Online (ThaiJO) URL: <https://www.tci-thaijo.org> ซึ่งรับผิดชอบดูแลระบบโดยศูนย์ TCI และ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (National Electronics and Computer Technology Center; NECTEC) เพื่อให้การทำงานเป็นระบบวารสารของวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเป็นไปตามมาตรฐานสากล

4. กำหนดออกเล่มวารสาร

กำหนดออกวารสาร: ปีละ 3 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 ระหว่างเดือน มกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ระหว่างเดือน พฤษภาคม – สิงหาคม และ ฉบับที่ 3 ระหว่างเดือน กันยายน-ธันวาคม

5. คำแนะนำสำหรับผู้ส่งบทความเพื่อตีพิมพ์

5.1 วิธีส่งบทความ เจ้าของบทความสามารถศึกษาข้อมูลเพิ่มเติม และส่งต้นฉบับบทความ ในรูปแบบไฟล์ word และรูปแบบไฟล์ PDF ได้ที่ระบบออนไลน์ของวารสารวิชาการ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/psru-jite>

5.2 รูปแบบบทความที่ส่งกองบรรณาธิการเพื่อตีพิมพ์

6. จริยธรรมในการตีพิมพ์ผลงาน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เป็นวารสารที่มีวัตถุประสงค์เพื่อ ตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการ และบทความปริทรรศน์ที่มีคุณภาพโดยผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ เพื่อนำเสนอแนวคิด นวัตกรรม และผลงานวิจัยใหม่ทางด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีเนื้อหาครอบคลุมเกี่ยวข้องกับงานวิจัยในสาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์สาขาต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ โลจิสติกส์ ไฟฟ้ากำลัง เครื่องกล โยธา อิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหการ การผลิต การจัดการและโลจิสติกส์ เป็นต้น วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นวัตกรรมเชรามีิกส์ ออกแบบผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และครุศาสตร์อุตสาหกรรม อีกทั้งยังรวมถึงงานวิจัยที่มีการบูรณาการศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรมในสาขาอื่นๆ มี 3 กลุ่ม คือ ผู้นิพนธ์ (Author) บรรณาธิการ (Editor) และผู้ประเมินบทความ (Reviewer) ซึ่งได้ปฏิบัติตามข้อกำหนดในบทบาทและหน้าที่อย่างเคร่งครัด โดยมีรายละเอียดดังนี้



7. บทบาทและหน้าที่ของผู้นิพนธ์ (Duties of Authors)

1. ผู้นิพนธ์ต้องได้รับความเห็นชอบในการส่งบทความจากผู้ร่วมนิพนธ์ (ถ้ามี)
2. ผู้นิพนธ์ต้องรับผิดชอบเกี่ยวกับลิขสิทธิ์ของต้นฉบับในทุกกรณี
3. ผู้นิพนธ์ที่มีชื่อปรากฏในบทความทุกคน ต้องเป็นผู้ที่มีส่วนในการดำเนินการวิจัยจริง
4. ผู้นิพนธ์ ต้องรับรองว่าผลงานที่ส่งมานั้นเป็นผลงานใหม่ และไม่เคยตีพิมพ์ที่ไหนมาก่อน
5. ผู้นิพนธ์ต้องรายงานข้อเท็จจริงที่เกิดขึ้นจากการทำวิจัย ไม่บิดเบือนข้อมูล หรือให้ข้อมูลที่เป็นเท็จ
6. ผู้นิพนธ์ต้องตรวจสอบจนมั่นใจว่ารายละเอียดทุกส่วนในบทความวิจัยที่จะตีพิมพ์ในวารสาร ถูกต้องและต้องเป็นไปตามหลักจริยธรรมสากลที่ได้รับการยอมรับ
7. ผู้นิพนธ์ต้องยอมรับคำวิจารณ์ และสามารถชี้แจงตอบกลับได้โดยมีข้อมูลสนับสนุนการวิจัยอย่างครบถ้วนสมบูรณ์
8. ผู้นิพนธ์ต้องอ้างอิงผลงานวิจัยของผู้อื่น หากมีการนำผลงานเหล่านั้นมาใช้ในผลงานของตัวเองจะต้องจัดทำรายการอ้างอิงท้ายบทความตามรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงใน “การเตรียมบทความ”
9. ผู้นิพนธ์ต้องเขียนบทความวิจัยให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดใน “การเตรียมบทความ”

8. บทบาทและหน้าที่ของบรรณาธิการวารสาร (Duties of Editors)

1. บรรณาธิการวารสารมีหน้าที่พิจารณาคุณภาพของบทความ เพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร
2. บรรณาธิการวารสารต้องดำเนินการทุกอย่างเพื่อให้มั่นใจในคุณภาพของบทความที่ตีพิมพ์ เพื่อรับรองคุณภาพของงานวิจัยที่ตีพิมพ์ และตระหนักว่าวารสารมีวัตถุประสงค์และมาตรฐานที่ชัดเจน
3. บรรณาธิการวารสารต้องชี้แจง หรือให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการตรวจสอบประเมินบทความ (Peer review) อีกทั้งมีความพร้อมในการชี้แจงความเบี่ยงเบนต่าง ๆ จากกระบวนการตรวจสอบ
4. บรรณาธิการวารสารต้องดำเนินการเกี่ยวกับวารสารให้ได้ตามกำหนดการตีพิมพ์วารสารที่ระบุไว้
5. บรรณาธิการวารสารต้องตัดสินใจในการยอมรับหรือปฏิเสธบทความวิจัยเพื่อการตีพิมพ์
6. บรรณาธิการวารสารต้องมีช่องทางให้ผู้นิพนธ์อุทธรณ์ได้หากผู้นิพนธ์มีความคิดเห็นแตกต่างจากการตัดสินใจของบรรณาธิการ
7. บรรณาธิการวารสารต้องไม่เปิดเผยข้อมูลของผู้นิพนธ์ และผู้ประเมินบทความแก่บุคคลอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความ

8. บรรณาธิการวารสารต้องไม่ปฏิเสธการตีพิมพ์บทความเพราะความสงสัยหรือไม่แน่ใจ โดยจะต้องหาหลักฐานมาพิสูจน์ข้อสงสัยนั้น ๆ ก่อน
9. บรรณาธิการวารสารต้องไม่เปลี่ยนแปลงการตัดสินใจในการตอบรับบทความที่ได้ปฏิเสธการตีพิมพ์ไปแล้ว
10. บรรณาธิการวารสารต้องพิจารณาตรวจสอบบทความในด้านการคัดลอกผลงานผู้อื่น
11. กรณีที่มีการปรับเปลี่ยนบรรณาธิการวารสาร ผู้ที่เข้ามารับตำแหน่งใหม่ต้องไม่กลับคำตัดสินใจเกี่ยวกับบทความที่บรรณาธิการวารสารคนก่อนตอบปฏิเสธไปแล้ว ยกเว้นมีการพิสูจน์ได้อย่างเหมาะสมและชัดเจน
12. หากบรรณาธิการวารสารตรวจพบการคัดลอกผลงานของผู้อื่นในกระบวนการประเมินบทความ บรรณาธิการวารสารต้องหยุดกระบวนการประเมิน และติดต่อผู้พิมพ์หลักทันทีเพื่อขอคำชี้แจง เพื่อประกอบการ ตอบรับ หรือ ปฏิเสธ การตีพิมพ์บทความนั้น ๆ
13. บรรณาธิการวารสารต้องไม่ตีพิมพ์บทความที่เคยตีพิมพ์ที่อื่นมาแล้ว
14. บรรณาธิการวารสารต้องมีระบบในการจัดการที่ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้พิมพ์และผู้ประเมินบทความรวมทั้งกองบรรณาธิการ
15. บรรณาธิการวารสารต้องสนับสนุนเสรีภาพในการแสดงความคิดเห็น และคงไว้ซึ่งความถูกต้องของผลงานทางวิชาการ อีกทั้งปกป้องมาตรฐานของทรัพย์สินทางปัญญา

9. บทบาทและหน้าที่ของผู้ประเมินบทความ (Duties of Reviewers)

1. ผู้ประเมินบทความต้องได้รับระบบปกป้องข้อมูลส่วนตัวของผู้ประเมินบทความ ยกเว้นกรณีที่มีการประเมินบทความแบบเปิด ซึ่งได้แจ้งให้ผู้พิมพ์และผู้ประเมินบทความรับทราบล่วงหน้า
2. ผู้ประเมินบทความต้องได้รับระบบที่ทำให้เกิดความมั่นใจได้ว่าบทความที่ส่งเข้ามาทำการประเมิน ได้รับการปกปิดความลับในระหว่างขั้นตอนการพิจารณาประเมิน
3. ผู้ประเมินบทความ ต้องรักษาความลับและไม่เปิดเผยข้อมูลของบทความที่ส่งมาเพื่อพิจารณาแก่บุคคลอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง ในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความ
4. หลังจากได้รับบทความจากบรรณาธิการวารสาร และผู้ประเมินบทความตระหนักว่าตัวเองอาจมีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้พิมพ์ เช่น เป็นผู้ร่วมโครงการ หรือรู้จักผู้พิมพ์เป็นการส่วนตัว หรือเหตุผลอื่น ๆ ที่ทำให้ไม่สามารถให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะอย่างอิสระได้ ผู้ประเมินบทความควรแจ้งให้บรรณาธิการวารสารทราบ และปฏิเสธการประเมินบทความนั้น ๆ
5. ผู้ประเมินบทความต้องรับทราบคำแนะนำในทุกประเด็นที่บรรณาธิการวารสารคาดหวัง และต้องรับทราบการปรับปรุงคำแนะนำที่ทันสมัยอยู่เสมอ ซึ่งสามารถอ้างอิง หรือเชื่อมโยงกับระเบียบดังกล่าว

6. ผู้ประเมินบทความ ควรประเมินบทความในสาขาวิชาที่ตนมีความเชี่ยวชาญ โดยพิจารณาความสำคัญของเนื้อหาในบทความที่จะมีต่อสาขาวิชานั้น ๆ คุณภาพของการวิเคราะห์ และความเข้มข้นของผลงาน

7. ผู้ประเมินบทความไม่ควรใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่มีข้อมูลรองรับมาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินบทความวิจัย

8. หากผู้ประเมินบทความทราบว่ามีส่วนใดของบทความที่มีความเหมือน หรือซ้ำซ้อนกับผลงานชิ้นอื่น ๆ ผู้ประเมินบทความต้องแจ้งให้บรรณาธิการวารสารทราบด้วย

10. ลิขสิทธิ์และสิทธิ (Copyright and Right)

- วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เป็นวารสารในรูปแบบเปิด (Open Access) ผู้ใช้ทั่วไปหรือระบบสารสนเทศของหน่วยงาน ฐานข้อมูลอัตโนมัติ ระบบห้องสมุดอัตโนมัติ สามารถเข้าถึง ดาวน์โหลด เอกสารไฟล์บทความบนเว็บไซต์วารสาร โดยไม่มีค่าใช้จ่ายแต่อย่างใด

- ข้อความภายในบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ทั้งหมด รวมถึงรูปภาพประกอบ ตาราง เป็นลิขสิทธิ์ของวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม การนำเนื้อหา ข้อความหรือข้อคิดเห็น รูปภาพ ตาราง ของบทความไปจัดพิมพ์เผยแพร่ในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ ต้องได้รับอนุญาตจากกองบรรณาธิการวารสารอย่างเป็นลายลักษณ์อักษร

- มหาวิทยาลัยฯ อนุญาตให้สามารถนำไฟล์บทความไปใช้ประโยชน์และเผยแพร่ต่อได้ โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไข สัญญาอนุญาตครีเอทีฟคอมมอน (Creative Commons License: CC) โดย ต้องแสดงที่มาจากวารสาร – ไม่ใช่เพื่อการค้า – ห้ามแก้ไขดัดแปลง, Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

- ข้อความที่ปรากฏในบทความในวารสารเป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียนแต่ละท่านไม่เกี่ยวข้องกับมหาวิทยาลัย และบุคลากร คณาจารย์ท่านอื่น ๆ ในมหาวิทยาลัยฯแต่อย่างใด ความรับผิดชอบองค์ประกอบทั้งหมดของบทความแต่ละเรื่องเป็นของผู้เขียนแต่ละท่าน หากมีความผิดพลาดใด ๆ ผู้เขียนแต่ละท่านจะรับผิดชอบบทความของตนเอง ตลอดจนความรับผิดชอบด้านเนื้อหาและการตรวจร่างบทความเป็นของผู้เขียน ไม่เกี่ยวข้องกับกองบรรณาธิการ

11. นโยบายจริยธรรมการทดลอง (Research Integrity Policy) ในงานวิจัย

บทความจากงานวิจัยที่ส่งเข้ารับการตีพิมพ์และเกี่ยวข้องกับการทำวิจัยในมนุษย์ ต้องได้รับการอนุมัติจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคนจากสถาบันที่ผ่านการรับรองจากสำนักงานมาตรฐานการวิจัยในคน สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และเป็นไปตามมาตรฐานจริยธรรมและกฎหมายสากล สำหรับการทดลองในสัตว์ทดลองต้องผ่านการรับรองจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ เช่นกัน และอยู่ภายใต้หลักพระราชบัญญัติสัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ พ.ศ. 2558

นอกจากนี้วารสารคาดหวังให้ผู้เขียนเคารพสิทธิความเป็นส่วนตัว (privacy) ของผู้เข้าร่วมการวิจัย และได้รับความยินยอมที่จะนำข้อมูลมาเผยแพร่ก่อนที่จะส่งบทความมายังวารสาร สำหรับข้อมูลและเอกสารต่าง ๆ ผู้เขียนจะต้องส่งหลักฐาน แนบมาพร้อมกับบทความ หรือส่งมาภายหลังเมื่อบทความได้รับการรับพิจารณาตีพิมพ์และกองบรรณาธิการร้องขอไป โดยจัดส่งเป็นไฟล์หลักฐานผ่านระบบวารสารออนไลน์

12. นโยบายการจัดการผลประโยชน์ทับซ้อน (Conflict of Interest/Competing Interest Policy)

วารสารมีนโยบายที่จะหลีกเลี่ยงต่อการขัดกันของผลประโยชน์ ในกลุ่มกองบรรณาธิการ ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ ผู้เขียนทุกท่าน เพื่อให้การตีพิมพ์บทความมีความโปร่งใสทางวิชาการ ดังนั้นในกรณีที่ ฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งมีความเกี่ยวข้องทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อบทความ ผู้เขียนหลัก (Corresponding Author) ต้องแจ้งให้กับบรรณาธิการทราบถึงเหตุความสัมพันธ์ดังกล่าว อย่างเป็นทางการลายลักษณ์อักษร หรือผ่านทาง การส่งข้อความผ่านระบบเว็บไซต์วารสาร

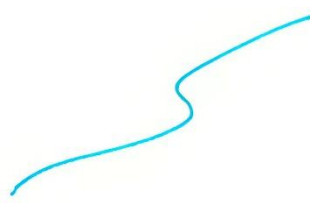
สำหรับผู้เขียน ต้องมีการใช้ข้อมูลในการเขียนงานวิจัยโดยไม่มีส่วนเกี่ยวข้องที่อาจทำให้เกิดความโน้มเอียงในงานวิจัย ในผลการศึกษา สรุปผล หรือ การอภิปรายผล โดยเฉพาะผลประโยชน์ทางตรงหรือทางอ้อมต่อการทำงานวิจัย

สำหรับผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ควรให้ข้อมูลต่อบรรณาธิการผู้รับผิดชอบบทความ หากมีผลประโยชน์เกี่ยวข้องกับงานวิจัยหรือมีความเกี่ยวข้องอย่างใดอย่างหนึ่ง ให้แจ้งบรรณาธิการ เพื่อยืนยันความโปร่งใสต่อการประเมินบทความ ทั้งนี้การเกี่ยวข้องย่อมมีโอกาสเกิดขึ้นได้เสมอ บรรณาธิการจะเป็นผู้พิจารณาให้ความเห็นในการยอมรับต่อการประเมินบทความอีกครั้ง

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม (Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University) Print ISSN : 2697-5062, E-ISSN : 2697-5629 ฉบับนี้เป็นปีที่ 8 ฉบับที่ 1 มีเนื้อหาที่เน้นด้านทางด้านเทคโนโลยี อุตสาหกรรมและวิศวกรรม วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีเนื้อหาครอบคลุมเกี่ยวข้องกับงานวิจัย ในสาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์สาขาต่างๆ โดยบทความทั้งหมดได้ผ่านการประเมิน โดยผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Review) ในสาขานั้นๆ เพื่อให้ได้ผลงานที่มีคุณภาพก่อน การตีพิมพ์และสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/psru-jite/issue/view/16508> ภายใต้ระบบ ThaiJo ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย

กองบรรณาธิการและคณะกรรมการจัดทำวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและ วิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาคุณภาพบทความ และ ผู้สนใจที่กรุณาช่วยกัน สนับสนุนและให้ความไว้วางใจผลงานของวารสารฉบับนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จากนักวิจัยที่ได้กรุณาเผยแพร่ผลงานใน วารสารนี้ กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับเกียรติ และความอนุเคราะห์จากท่านในโอกาสต่อไป



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริเดช กุลหิรัญบวร
บรรณาธิการ



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
การจัดทำข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยโปรแกรม SAP2000ชนเนษฐา จรัสศรีมี, ณวพล ทองมาก, ณัฐพล สุจริต	118-126
การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงานของบุคลากร ในมหาวิทยาลัยพิษณุโลกพรธิรา ไชยสวัสดิ์, ปริศนา สุขศิริ, วิชิระ วีระพลิน, สุรางค์ คงหมื่นรักษ์	127-143
การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษาใน มหาวิทยาลัยพิษณุโลกกิตติพงศ์ อุ่นแก้ว, มาริสา กัญหาทรัพย์, ชมนวรรณ บุญไทย, ฤทธิรงค์ แสงสร้อย, ปรกฤษฎ์ สายหัสดี	144-161
การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนในการ แก้ปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งนิติกร หลีชัย, สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ, กล้า วาริพิทักษ์	162-182
การออกแบบและประเมินสมรรถนะเครื่องสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำเพื่อลดการเกิด สีน้ำตาลของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภค ณัฐพงษ์ แกมทับทิม, ภควัต หนูฉัตร, เอกรัฐ ชะอุ่มเอียด, เตือนแรม แพ่งเกี้ยว, สุวรรณ เอกรัมย์, นิติกร หลีชัย	183-201
การวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการยศาสตร์ของแรงงานก่อสร้างโดยวิธี PATH กรณีศึกษา บริษัท จัวนแข็ง มิลเลียนแนร์ กรุ๊ป จำกัดฤดี นิยมรัตน์, ปริญวัฒน์ ชนศิริชัย, ไสว ศิริทองถาวร, วรทยา ชูมนาค	202-220
การปรับปรุงสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยขยะพลาสติกชนิด HDPE, PP และ PET โดยวิธีการของมาร์แชลล์บนพื้นฐานการออกแบบงานทางประเทศไทยพิษยศ มารศรี, ปรีวัฒน์ มั่นทอง, ภาณุวัตร ตุ่นแก้ว, ศศิประภา วัชรูฒ, วรรณิกา ชันค้ำนันตะ	221-235



IDENTIFICATION OF FACTORS INFLUENCING VEGETABLE GROWING-AREA 236-256
SITE SELECTION: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW AND FRAMEWORK
FOR TONGHAI COUNTY, CHINA

..... Xinyu Zhou, Jessada Pochan, Boonsub Panichakarn,
Sareeyapon Prasertsri

การลดของเสียในกระบวนการป้อนขึ้นรูปฝาคอबरจุณท์ทินเนอร์โดยประยุกต์ใช้ 257-267
เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 ประการ

.....อิทธิพล เนคมานุรักษ์, ณัฐวุฒิ ศรีดี, จีรศักดิ์ แย้มอ่วม, ดาราวรรณ วีรานันต์

การจัดทำข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรม SAP2000

PREPARATION OF PRELIMINARY INPUT DATA FOR STRUCTURAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS USING SAP2000

ชเนษฎา จรัสศรีศรี, ณวพล ทองมาก, ณัฐพล สุจริต*

Chanesda Jaratrassamee, Nawaphon Thongmak, Nattapon Sutjarit*

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: nattaapon_ce@hotmail.com

วันที่เข้ารับ 2 เมษายน 2569

วันที่แก้ไขบทความ 18 พฤษภาคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ 19 พฤษภาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาและวิเคราะห์กระบวนการจัดทำข้อมูลเบื้องต้น (Input data) ที่มีความสำคัญต่อความถูกต้องในการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรม SAP2000 โดยทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองโครงสร้างอาคารกรณีศึกษาภายใต้เงื่อนไขการกำหนดค่าที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า การกำหนดคุณสมบัติวัสดุและเงื่อนไขจุดรองรับ (Boundary conditions) ตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) อย่างเคร่งครัด ช่วยลดความคลาดเคลื่อนของค่าการเสียรูป (Displacement) ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการพิจารณาจุดรองรับแบบยึดแน่น (Fixed support) แทนจุดรองรับแบบจุดหมุน (Pinned support) ในโครงสร้างฐานราก นอกจากนี้ งานวิจัยได้ระบุข้อค้นพบสำคัญในการตั้งค่า Load combinations ตามมาตรฐาน ASCE/วสท. ซึ่งหากผู้ใช้งานขาดความเข้าใจในหลักการถ่ายน้ำหนัก (Load path) อาจทำให้ผลการวิเคราะห์แรงภายใน (Internal forces) ผิดพลาดได้ โดยองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่ช่วยลดข้อผิดพลาดเชิงเทคนิคในการใช้ซอฟต์แวร์ แต่ยังเป็นแนวทางมาตรฐานในการเตรียมข้อมูลนำเข้าเพื่อความปลอดภัยและความประหยัดในการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา

คำสำคัญ: การจัดทำข้อมูลเบื้องต้น, การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การวิเคราะห์โครงสร้าง, เงื่อนไขขอบเขต, ซอฟต์แวร์ SAP2000

Abstract

This research investigates and analyzes the process of preparing preliminary input data, which is essential for ensuring the accuracy of structural analysis of reinforced concrete buildings using SAP2000 software. The study compares the analytical results obtained from simulations of a case-study building structure under different configuration conditions. The findings reveal that strict adherence to material properties and boundary conditions in accordance with the standards of the Engineering Institute of Thailand (EIT) significantly reduces displacement errors. In particular, the consideration of fixed supports instead of pinned supports in foundation structures was found to improve the accuracy of structural behavior predictions. Furthermore, the research identified important findings regarding the establishment of load combinations based on ASCE and EIT standards. A lack of understanding of load path principles may lead to inaccurate internal force analysis results. The knowledge obtained from this research not only helps reduce technical errors in software application, but also provides a standardized guideline for preparing input data to enhance safety and cost-effectiveness in civil engineering structural design.

Keywords: Input data preparation, Finite element method, Structural analysis, Boundary conditions, SAP2000 software

1. บทนำ

ในปัจจุบันการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างอาคารมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามวิวัฒนาการทางสถาปัตยกรรม วิศวกรโยธาจึงหันมาใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ในการคำนวณเพื่อเพิ่มความรวดเร็วและแม่นยำ โดยเฉพาะโปรแกรม SAP2000 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) ที่ได้รับความนิยมในระดับสากล อย่างไรก็ตามงานวิจัยในอดีตพบว่าความเชื่อถือได้ของผลลัพธ์ (Output) นั้นขึ้นอยู่กับความถูกต้องของคุณภาพข้อมูลนำเข้า (Quality of input data) เป็นสำคัญ ดังที่มักเรียกกันในทางคอมพิวเตอร์ว่า "Garbage In, Garbage Out"

อย่างไรก็ตาม ความถูกต้องของผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ (Output) ขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลเบื้องต้น (Input data) ที่วิศวกรป้อนเข้าสู่ระบบเป็นสำคัญ หากกระบวนการจัดเตรียมข้อมูล เช่น การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ การจำลองจุดรองรับ หรือการถ่ายน้ำหนักบรรทุกลงบนองค์อาคารมีความคลาดเคลื่อน ย่อมส่งผลให้ผลการวิเคราะห์แรงภายใน (Internal forces) และการเสียรูป

(Displacement) ผิดพลาด ซึ่งอาจนำไปสู่ความไม่ประหยัดในการก่อสร้าง หรือความไม่ปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สิน

จากประเด็นปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นวิเคราะห์อิทธิพลของกระบวนการจัดทำข้อมูลเบื้องต้นที่มีต่อพฤติกรรมโครงสร้าง ที่รวบรวมขั้นตอนอย่างเป็นระบบ ตั้งแต่การป้อนข้อมูลลงในโปรแกรมจนไปถึงการนำข้อมูลออกไปใช้ จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อสร้างมาตรฐานการทำงาน ลดความเสี่ยงจากความผิดพลาดของมนุษย์ ช่วยให้กระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างเป็นไปอย่างถูกต้องและรวดเร็ว และองค์ความรู้จะเป็นรากฐานสำคัญในการยกระดับมาตรฐานการวิเคราะห์โครงสร้างให้มีความถูกต้อง แม่นยำ และประหยัด ตามหลักวิศวกรรมโยธา

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อจัดทำ คู่มือมาตรฐาน (Standard manual) ในการป้อนข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรม SAP2000

2.2 เพื่อถ่ายทอดขั้นตอนการจำลองโมเดล (Modeling) และการกำหนดน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน วสท. ให้เข้าใจง่ายในรูปแบบ Step-by-Step

2.3 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของคู่มือโดยการนำไปใช้กับอาคารกรณีศึกษาและตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์

3. วิธีดำเนินงานวิจัย (Research methodology)

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์อิทธิพลของข้อมูลนำเข้าที่มีต่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์โครงสร้าง คณะผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยไว้ดังนี้ :

3.1 การรวบรวมข้อมูลและเกณฑ์มาตรฐาน

ศึกษาและรวบรวมทฤษฎีรวมถึงข้อกำหนดทางวิศวกรรมเพื่อใช้เป็นบรรทัดฐาน (Benchmark) ในการเปรียบเทียบผลลัพธ์ ประกอบด้วย:

- **ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM):** ศึกษาพฤติกรรมการส่งถ่ายแรงและการคำนวณความแข็งแรง (Stiffness matrix) ในซอฟต์แวร์ SAP2000
- **มาตรฐานการออกแบบ:** อ้างอิงมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) และ ASCE 7-22 ในการกำหนดน้ำหนักบรรทุกและการรวมแรง (Load combinations)

3.2 การกำหนดตัวแปรและอาคารกรณีศึกษา (Case study specification)

ผู้วิจัยคัดเลือกอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กพักอาศัยสูง [ระบุจำนวนชั้น เช่น 2 ชั้น] เป็นกรณีศึกษา โดยมีการกำหนดตัวแปรเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ ดังนี้:



- **ตัวแปรต้น (Independent variables):** การแปรผันเงื่อนไขการจำลองโครงสร้าง ได้แก่:
 1. **ประเภทจุดรองรับ (Boundary conditions):** เปรียบเทียบระหว่างแบบยึดแน่น (Fixed Support) และแบบจุดหมุน (Pinned Support)
 2. **ความละเอียดของโมเดล (Meshing):** การแบ่งชิ้นส่วนองค์อาคารในระดับความละเอียดที่ต่างกัน
 3. **การรวมน้ำหนักบรรทุก (Load combinations):** เปรียบเทียบผลระหว่างการให้น้ำหนักตามกฎกระทรวงและมาตรฐาน ASCE
- **ตัวแปรตาม (Dependent variables):** ค่าที่บันทึกจากการประมวลผล ได้แก่ แรงเฉือนสูงสุด (Max shear), โมเมนต์ดัด (Bending moment) ที่รอยต่อ และค่าการเคลื่อนตัวทางข้าง (Lateral displacement)

3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์และตรวจสอบความถูกต้อง (Verification process)

ดำเนินการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์จากซอฟต์แวร์กับเกณฑ์ทางทฤษฎี โดยมีขั้นตอนดังนี้:

1. **Modeling phase:** สร้างแบบจำลองโครงสร้างตามแบบแปลนสถาปัตยกรรม โดยกำหนดหน่วย (Units) และพิกัดโครงข่ายให้ถูกต้องตามจริง
2. **Verification phase:** ตรวจสอบความสมบูรณ์ของโมเดลผ่านฟังก์ชัน "Check Model" ใน SAP2000 เพื่อป้องกันปัญหาทางเรขาคณิต (Geometric error) และตรวจสอบสมดุลของแรงแรงปฏิกิริยา (Global force balance) ว่ารวมแรงปฏิกิริยามีค่าเท่ากับน้ำหนักบรรทุกที่ป้อนเข้าสู่ระบบหรือไม่
3. **Comparative analysis:** ดำเนินการวิเคราะห์ผล (Run analysis) ภายใต้อัตตาแปรต้นที่กำหนดไว้ในข้อ 3.2 และนำค่าตัวแปรตามมาลงตารางเปรียบเทียบ (Sensitivity analysis) เพื่อชี้ให้เห็นร้อยละของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเมื่อมีการตั้งค่า Input data ที่แตกต่างกัน

4. ผลการวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยเรื่องการจัดทำข้อมูลเบื้องต้นในการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารด้วยโปรแกรม SAP2000 ผู้วิจัยสามารถสรุปผลการดำเนินงานได้ดังนี้:

4.1 ผลการสังเคราะห์แนวทางมาตรฐานการจัดการข้อมูลเบื้องต้น (Standardized input data framework)

จากการดำเนินงานวิจัย ได้สังเคราะห์และจัดลำดับขั้นตอนการจัดการข้อมูลเบื้องต้นเพื่อเป็นบรรทัดฐานในการวิเคราะห์โครงสร้างอย่างเป็นระบบ โดยแบ่งโครงสร้างข้อมูลออกเป็น 5 หมวดหมู่หลักที่มีอิทธิพลต่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ ดังนี้:

1) การกำหนดระบบหน่วยและพิกัดเรขาคณิต (Units & Grid systems)

ผู้วิจัยพบว่าจุดเริ่มต้นที่สำคัญที่สุดคือการเลือกใช้หน่วยวัดที่สอดคล้องกันทั่วทั้งแบบจำลองแนวทางนี้กำหนดให้ใช้หน่วย SI Units (kN-m) เป็นมาตรฐานหลัก เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณค่าพารามิเตอร์เชิงกลอื่นๆ เช่น ค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit weight) และค่าความเค้น (Stress) ซึ่งมักเป็นจุดที่ทำให้ผลลัพธ์คลาดเคลื่อนหากมีการสลับหน่วยไปมา

2) การนิยามคุณสมบัติวัสดุและคุณลักษณะหน้าตัด (Material & Section definitions)

ผลการศึกษาเน้นความสำคัญของการระบุค่า Modulus of elasticity (E) ให้สัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน วสท. ซึ่งพารามิเตอร์นี้ส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรงแรง (Stiffness) ขององค์อาคาร การกำหนดหน้าตัด (Frame sections) ที่ถูกต้องจะช่วยให้การส่งถ่ายแรงระหว่างสมาชิกเป็นไปอย่างสมบูรณ์ตามทฤษฎี

3) การจำลองพฤติกรรมเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

ผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์การเลือกจุดรองรับให้สอดคล้องกับพฤติกรรมทางกายภาพจริงของโครงสร้าง ได้แก่:

- Fixed support: สำหรับจุดเชื่อมต่อฐานรากที่ต้องการการยึดรั้งทั้งการเคลื่อนที่และการหมุน
- Pinned/Roller support: สำหรับจุดต่อที่ยอมให้มีการหมุนตัวได้อิสระ

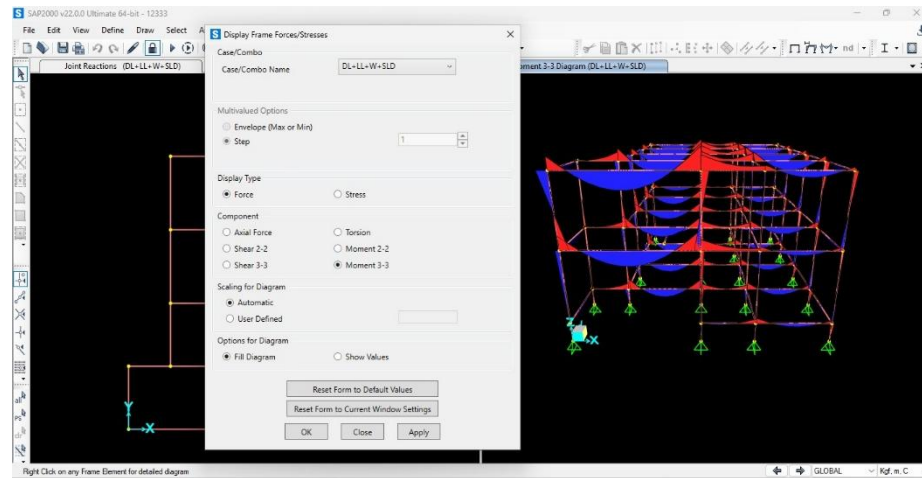
การกำหนดในหมวดนี้มีผลอย่างมากต่อรูปร่างของแผนภาพแรงดัด (Bending moment diagram) ของโครงสร้างส่วนล่าง

4) การจัดกลุ่มและกรณีน้ำหนักบรรทุก (Load patterns & Combinations)

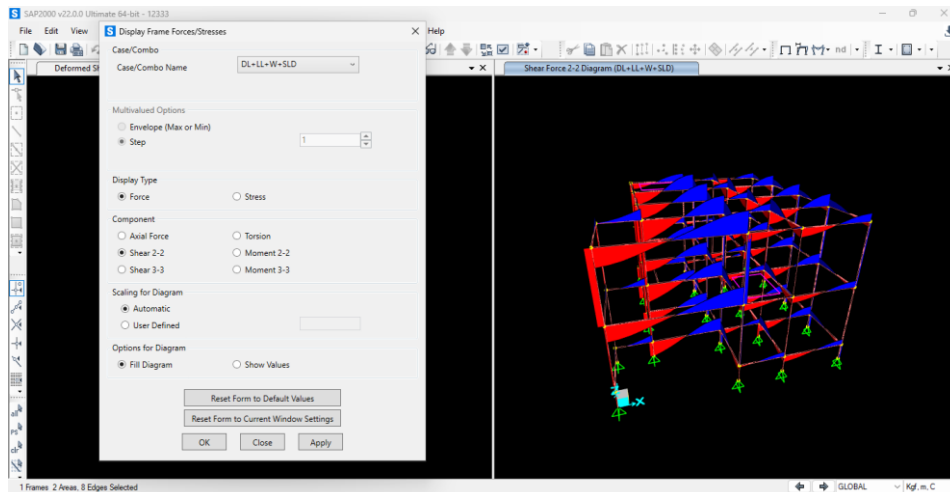
ผู้วิจัยได้รวบรวมและจำแนกประเภทน้ำหนักบรรทุกพื้นฐาน (Dead load และ Live load) พร้อมทั้งกำหนดรูปแบบการรวมแรง (Load combinations) ตามมาตรฐาน มยผ. และ ASCE เพื่อให้ครอบคลุมกรณีวิกฤตที่สุด (Critical case) ที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้าง

5) กระบวนการตรวจสอบความสมบูรณ์ของแบบจำลอง (Model check)

ส่วนสุดท้ายของแนวทางมาตรฐานคือขั้นตอนการตรวจสอบความต่อเนื่อง (Connectivity) ของจุดต่อและสมาชิก เพื่อยืนยันว่าน้ำหนักบรรทุกทุกสามารถถ่ายเทลงสู่จุดรองรับได้ครบถ้วน (Load path continuity) ก่อนดำเนินการประมวลผลจริง ซึ่งช่วยลดโอกาสเกิดปัญหา Error ในเชิงคณิตศาสตร์ขณะรันซอฟต์แวร์



ภาพที่ 1 ตัวอย่างการวิเคราะห์โมเมนต์โดยโปรแกรม SAP2000



ภาพที่ 2 ตัวอย่างการวิเคราะห์แรงเฉือนโดยโปรแกรม SAP2000

Element Forces - Frames											
File View Edit Format-Filter-Sort Select Options											
Units: As Noted											
Filter:											
Frame Text	Station m	OutputCase	CaseType Text	P Kgf	V2 Kgf	V3 Kgf	T Kgf-m	M2 Kgf-m	M3 Kgf-m	FrameElem Text	ElemStation
100	0	DL+LL+W+S...	Combination	-15490.88	-96.81	-20.34	-0.44	-35.68	-178.64	100-1	0
100	0.45	DL+LL+W+S...	Combination	-15442.28	-96.81	-20.34	-0.44	-26.51	-135.07	100-1	0.45
100	0.9	DL+LL+W+S...	Combination	-15393.63	-96.81	-20.34	-0.44	-17.36	-91.51	100-1	0.9
100	1.35	DL+LL+W+S...	Combination	-15345.03	-96.81	-20.34	-0.44	-8.2	-47.94	100-1	1.35
100	1.8	DL+LL+W+S...	Combination	-15296.48	-96.81	-20.34	-0.44	0.93	-4.38	100-1	1.8
100	2.25	DL+LL+W+S...	Combination	-15247.88	-96.81	-20.34	-0.44	10.11	39.19	100-1	2.25
100	2.7	DL+LL+W+S...	Combination	-15199.28	-96.81	-20.34	-0.44	19.28	82.75	100-1	2.7
100	3.15	DL+LL+W+S...	Combination	-15150.63	-96.81	-20.34	-0.44	28.42	126.31	100-1	3.15
100	3.6	DL+LL+W+S...	Combination	-15102.03	-96.81	-20.34	-0.44	37.57	169.88	100-1	3.6

ภาพที่ 3 ตัวอย่างตารางที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารโดยโปรแกรม SAP2000

#V2 = ค่าแรงเฉือนที่นำไปใช้

#M3 = ค่าแรงโมเมนต์ที่นำไปใช้

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 สรุปผล

จากการวิจัยและจัดทำคู่มือการจัดเตรียมข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารด้วยโปรแกรม SAP2000 สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้:

1. **การสร้างกระบวนการมาตรฐาน:** ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการจัดทำขั้นตอนการทำงานที่เป็นระบบ (Systematic workflow) ตั้งแต่การกำหนดพิกัด (Grids), คุณสมบัติวัสดุ (Materials), องค์อาคาร (Frame sections), ไปจนถึงการรวมน้ำหนักบรรทุก (Load combinations) ตามมาตรฐานวิศวกรรม
2. **การวิเคราะห์ความสมเหตุสมผลทางวิศวกรรม (Engineering Check):** นอกจากการตรวจสอบความถูกต้องของตัวเลข (Numerical accuracy) ผลการวิจัยยังพบว่าคู่มือนี้ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถสร้างแบบจำลองที่มี "พฤติกรรมโครงสร้าง" สอดคล้องกับทฤษฎีการออกแบบมากขึ้น เช่น การตรวจสอบแผนภาพแรงดัด (Bending moment Diagram) และแรงเฉือน (Shear force diagram) ที่มีความต่อเนื่อง ณ จุดต่อ (Nodes) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าการกำหนดความสัมพันธ์ของชิ้นส่วน (Connectivity) และการถ่ายน้ำหนักบรรทุก (Load path) ถูกต้องตามหลักวิชาการ
3. **ประสิทธิภาพการเรียนรู้:** การมีคู่มือลำดับขั้นตอนที่ชัดเจน ไม่เพียงแต่ช่วยลดความผิดพลาด แต่ยังช่วยลดระยะเวลาในการตรวจสอบโมเดล (Model verification) ลงอย่างมีนัยสำคัญ เหมาะสำหรับนิสิตนักศึกษาและวิศวกรจบใหม่ที่ยังขาดประสบการณ์ในการตรวจสอบความสมเหตุสมผลของผลลัพธ์ (Engineering sense)

5.2 การอภิปรายผล

จากการวิจัยพบว่า "ความเข้าใจในพฤติกรรมโครงสร้าง" มีความสำคัญมากกว่าการป้อนข้อมูลตามคำสั่งเพียงอย่างเดียว การอภิปรายผลสามารถสรุปได้ดังนี้:

- **ความสมเหตุสมผลทางวิศวกรรม (Engineering sense):** การใช้แนวทางมาตรฐานช่วยให้ผู้ใช้งานไม่มองโปรแกรมเป็นเพียง "Black box" แต่สามารถอธิบายได้ว่าเหตุใด Moment diagram ถึงมีรูปร่างเช่นนั้น ซึ่งเป็นการตรวจสอบความถูกต้องด้วยความเข้าใจทางทฤษฎี แทนการพึ่งพาตัวเลขจากโปรแกรมเพียงอย่างเดียว
- **การลดความผิดพลาด:** งานวิจัยนี้ยืนยันว่าการมีขั้นตอนตรวจสอบจุดต่อ (Connectivity check) และการตรวจสอบหน่วย เป็นจุดวิกฤตที่ช่วยป้องกันความเสียหายเชิงโครงสร้างที่อาจเกิดขึ้นจากการออกแบบที่ผิดพลาด

6. ข้อเสนอแนะ

1. การขยายผลสู่โครงสร้างซับซ้อน : ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในโครงสร้างที่มีความไม่สม่ำเสมอ (Irregular structures) หรือโครงสร้างสูงที่ต้องพิจารณาแรงลม (Wind load) และแรงแผ่นดินไหว (Seismic load)
2. การตรวจสอบด้วยโปรแกรมอื่น : ควรมีการทำ Cross-Verification ร่วมกับซอฟต์แวร์อื่นๆ เช่น ETABS หรือ Robot structural analysis เพื่อยืนยันความแม่นยำของกระบวนการ Input data ในระดับสากล
3. การวิเคราะห์พฤติกรรมไม่เชิงเส้น: ในอนาคตควรศึกษาการจัดทำข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์แบบ Nonlinear (P-Delta analysis) เพื่อความปลอดภัยในโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกสูง

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ณัฐพล สุจริต อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ ตลอดจนช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องรูปเล่ม ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสมบูรณ์โครงงาน ขอขอบคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่านนำโดย อาจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ วรรณภา อาจารย์จิรา ธรรมนิยม และอาจารย์วรรณิกา ชันคำ นันตะ สำหรับวิชาความรู้และการอบรมสั่งสอน

ขอขอบคุณผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ของสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่อำนวยความสะดวกต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาในการเรียนและการทำวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2550). **กฎกระทรวงกำหนดแรงลมและแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่ออาคาร**. กรุงเทพฯ: กระทรวงมหาดไทย.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2565). **กฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน และความคงทนของอาคาร**. กรุงเทพฯ: กระทรวงมหาดไทย.
- กระทรวงมหาดไทย. (2522). **พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522**. กรุงเทพฯ: ราชกิจจานุเบกษา.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2561ก). **มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก**. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2561ข). **มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็ก (มยผ. 1227-51)**. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2561ค). **มาตรฐานการออกแบบอาคาร
ต้านทานแรงลม (มยพ. 1311-50)**. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

American Society of Civil Engineers. (2022). **Minimum Design Loads and Associated
Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE 7-22)**. Reston: ASCE.

Computers and Structures, Inc. (2023). **SAP2000 Integrated Software for Structural
Analysis and Design: User Manual**. Berkeley: CSI.

Hibbeler, R. C. (2017). **Structural Analysis** (10th ed.). New York: Pearson Education.

Kassimali, A. (2015). **Structural Analysis** (5th ed.). Stamford: Cengage Learning.

SAP2000 Documentation. (2023). **CSI Analysis Reference Manual**. Retrieved
from <https://www.csiamerica.com>

Segui, W. T. (2018). **Steel Design** (6th ed.). Boston: Cengage Learning.

การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงาน
ของบุคลากรในมหาวิทยาลัยพิษณุโลก
DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM FOR MANAGING
WORK ATTENDANCE OF PERSONNEL AT
PHITSANULOK UNIVERSITY

พรธิรา ไชยสวัสดิ์, ปริศนา สุขศิริ*, วิชิระ วีระพลิน, สุรงค์ คงหมื่นรักษ์

Pornthira Chaisawat, Prissana Sooksiri*, Wichira Veeraplin, Surang Kongmuenruk

คณะบริหารธุรกิจและการบัญชี มหาวิทยาลัยพิษณุโลก อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

Faculty of Business Administration and Accountancy, Phitsanulok University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: prissana@plu.ac.th

วันที่เข้าระบบ 4 มิถุนายน 2569

วันที่แก้ไขบทความ 3 สิงหาคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ 4 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ออกแบบและพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงานของบุคลากรในมหาวิทยาลัยพิษณุโลก และ (2) ประเมินประสิทธิภาพของระบบในด้านความถูกต้อง ความรวดเร็ว ความปลอดภัยของข้อมูล การรายงานผล และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน โดยจุดเด่นของระบบคือการพัฒนาแบบบันทึกเวลาเข้าปฏิบัติงานบนเทคโนโลยีเว็บ ร่วมกับการยืนยันตัวตนด้วยรหัสบุคลากร การบันทึกภาพประกอบการลงเวลา และการจัดเก็บข้อมูลผ่านฐานข้อมูลที่สามารถแสดงผลแบบเรียลไทม์ กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ บุคลากรมหาวิทยาลัยพิษณุโลก จำนวน 65 คน ได้มาโดยการเลือกแบบเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วยระบบสารสนเทศที่พัฒนาขึ้น แบบประเมินประสิทธิภาพของระบบ และแบบสอบถามความพึงพอใจของผู้ใช้งาน วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า ระบบสามารถทำงานได้ครบถ้วนตามข้อกำหนดที่ออกแบบไว้และมีการตอบสนองอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบโดยรวมอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 4.42$, S.D. = 0.57) โดยด้านความรวดเร็วของระบบมีค่าเฉลี่ยสูงสุด รองลงมา ได้แก่ ด้านความถูกต้อง ด้านการรายงานผล และด้านความปลอดภัยของข้อมูล ขณะที่ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานโดยรวมอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 4.37$, S.D. = 0.60) สรุปได้ว่าระบบสารสนเทศที่พัฒนาขึ้นสามารถรองรับการบันทึกเวลา การจัดเก็บและค้นหาข้อมูล การรายงานผลแบบเรียลไทม์ และสนับสนุนการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงานของบุคลากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบสารสนเทศ, การบริหารจัดการเวลา, การยืนยันตัวตน, เทคโนโลยีการถ่ายภาพ

Abstract

This research aimed to (1) design and develop an information system for managing personnel attendance at Phitsanulok University and (2) evaluate the system's performance and user satisfaction. The system was developed as a web-based application with key functions including authentication using personnel identification codes, photographic verification of attendance records, data storage and retrieval, and real-time reporting. The sample comprised 65 personnel from Phitsanulok University selected through purposive sampling. The research instruments consisted of the developed information system, a system performance evaluation form, and a user satisfaction questionnaire. The data were analyzed using the mean and standard deviation. The results showed that the system fulfilled the specified functional requirements and was suitable for practical use. Overall system performance was rated at a high level ($\bar{x} = 4.42$, S.D. = 0.57). Response speed received the highest mean score, followed by accuracy, reporting capability, and data security, respectively. Overall user satisfaction was also rated at a high level ($\bar{x} = 4.37$, S.D. = 0.60). These findings demonstrate that the developed information system can support attendance recording, data storage and retrieval, and real-time reporting, thereby improving the efficiency of personnel attendance management at Phitsanulok University.

Keywords: Information system, Attendance management, Identity verification, Photographic technology

1. บทนำ

ในยุคของการขับเคลื่อนองค์กรด้วยเทคโนโลยีสารสนเทศ การบริหารจัดการทรัพยากรมนุษย์ให้มีประสิทธิภาพถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสำเร็จขององค์กร โดยเฉพาะการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงานของบุคลากร ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการประเมินผลการปฏิบัติงาน การคำนวณค่าตอบแทน และการวางแผนเชิงกลยุทธ์ขององค์กร การจัดเก็บข้อมูลการลงเวลาที่ถูกต้องและสามารถตรวจสอบได้จึงเป็นองค์ประกอบสำคัญของการบริหารงานบุคคล อย่างไรก็ตาม องค์กรจำนวนมากในประเทศไทยยังคงใช้ระบบบันทึกเวลาแบบดั้งเดิม เช่น การลงเวลาด้วยลายมือ หรือการใช้บัตรประจำตัว ซึ่งมีข้อจำกัดด้านความถูกต้อง ความสะดวก และความน่าเชื่อถือของข้อมูล รวมถึงเกิดปัญหาความผิดพลาดจากมนุษย์ (Human error) เช่น การบันทึกข้อมูลคลาดเคลื่อน การลืมลง

เวลา และการตรวจสอบข้อมูลที่ใช้เวลานาน ส่งผลให้การสรุปรายงานและการบริหารจัดการข้อมูล บุคลากรขาดประสิทธิภาพ ทั้งนี้ การนำระบบสารสนเทศมาใช้ในการบริหารงานบุคคลยังคงเป็นความท้าทายของหลายองค์กร เนื่องจากการจัดเก็บข้อมูลที่ไม่เป็นระบบส่งผลต่อประสิทธิภาพการบริหารจัดการและการสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหาร (ณิญาพัฒน์ และสัจจวรรณ, 2562) อีกทั้งการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อการบริหารทรัพยากรมนุษย์ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของบุคลากรในองค์กร (พิมพ์พร, 2567)

จากการศึกษางานวิจัยในบริบทประเทศไทย พบว่าระบบบันทึกและการจัดการข้อมูลแบบดั้งเดิมส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการประมวลผลข้อมูล ข้อมูลมีความซ้ำซ้อน ขาดความเชื่อมโยง และไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้สนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ (อนิวัตร และมัทนา, 2567) นอกจากนี้ ระบบเดิมส่วนใหญ่ยังไม่สามารถแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ ทำให้การติดตามสถานะการปฏิบัติงานและการจัดทำรายงานใช้เวลานาน ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการบริหารจัดการทรัพยากรบุคคล จึงมีความจำเป็นในการพัฒนาระบบสารสนเทศที่สามารถเพิ่มความถูกต้อง ความรวดเร็ว ความปลอดภัย และรองรับการจัดการข้อมูลได้อย่างเป็นระบบ (วิทยา และคณะ, 2567)

ปัจจุบัน หน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชนของประเทศไทยได้ให้ความสำคัญกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการองค์กร โดยเฉพาะการพัฒนาระบบสารสนเทศที่สามารถจัดเก็บข้อมูลในฐานข้อมูลส่วนกลาง เชื่อมโยงข้อมูลระหว่างหน่วยงาน และแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ เพื่อสนับสนุนการบริหารงานและการตัดสินใจของผู้บริหาร (สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ [องค์การมหาชน], 2565) อีกทั้งการพัฒนาระบบสารสนเทศที่มีการกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูลและมีมาตรการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูล ยังเป็นแนวทางสำคัญในการยกระดับประสิทธิภาพการบริหารจัดการข้อมูลบุคลากร (สำนักงานพัฒนาธุรกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ [องค์การมหาชน], 2566)

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าหลายองค์กรจะมีการนำระบบสารสนเทศมาใช้ในการบริหารงานบุคคล แต่ยังพบข้อจำกัดในด้านการออกแบบระบบที่ไม่สอดคล้องกับกระบวนการปฏิบัติงานจริง การจัดเก็บข้อมูลที่ยังไม่เป็นระบบ การแสดงผลข้อมูลที่ไม่สามารถติดตามได้แบบเรียลไทม์ รวมถึงการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูล ซึ่งส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของข้อมูลและประสิทธิภาพในการบริหารจัดการ (สำนักงานพัฒนารัฐบาลดิจิทัล [องค์การมหาชน], 2565) นอกจากนี้ การพัฒนาระบบสารสนเทศในยุคดิจิทัลยังต้องคำนึงถึงการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้การจัดเก็บและการใช้งานข้อมูลเป็นไปอย่างปลอดภัยและเหมาะสม (สำนักงานคณะกรรมการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล, 2566)

จากการศึกษาสภาพการดำเนินงานของมหาวิทยาลัยพิษณุโลก พบว่าระบบการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงานของบุคลากรยังมีข้อจำกัดด้านการจัดเก็บข้อมูล การสืบค้นข้อมูล และการจัดทำ

รายงาน ซึ่งส่งผลให้การตรวจสอบข้อมูลและการติดตามผลการปฏิบัติงานทำได้ไม่สะดวก อีกทั้งข้อมูล ยังไม่สามารถนำเสนอในรูปแบบที่สนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงานของบุคลากร โดย ออกแบบระบบฐานข้อมูลที่เป็นศูนย์กลาง มีการกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูล สามารถบันทึก สืบค้น และแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ พร้อมทั้งสนับสนุนการจัดทำรายงานเพื่อใช้ในการบริหารจัดการ และการตัดสินใจของผู้บริหาร

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบสารสนเทศที่บูรณาการการจัดเก็บข้อมูล การบริหารจัดการ ข้อมูลบุคลากร การบันทึกเวลาเข้าปฏิบัติงาน การแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ และการสรุปรายงาน เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจไว้ภายในระบบเดียว โดยมุ่งเน้นการออกแบบให้สอดคล้องกับกระบวนการ ปฏิบัติงานจริงของมหาวิทยาลัยพิษณุโลก ซึ่งแตกต่างจากระบบเดิมที่มีการจัดเก็บข้อมูลแยกส่วน ขาด ความเชื่อมโยง และไม่สามารถสนับสนุนการบริหารจัดการได้อย่างครบถ้วน

ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของระบบ สารสนเทศเพื่อการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงานของบุคลากร โดยประเมินประสิทธิภาพของ ระบบในด้านความถูกต้อง ความรวดเร็ว ความปลอดภัยของข้อมูล และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน เพื่อเป็นแนวทางในการยกระดับการบริหารจัดการข้อมูลบุคลากรขององค์กรให้มีประสิทธิภาพมาก ยิ่งขึ้น

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบสารสนเทศสำหรับการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงานของ บุคลากรในมหาวิทยาลัย

2.2 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบสารสนเทศที่พัฒนาขึ้น ในด้านความถูกต้อง ความ รวดเร็ว ความปลอดภัยของข้อมูล และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาปัญหาและความต้องการ

ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาสภาพการทำงานของระบบบันทึกเวลาเข้างานที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ของมหาวิทยาลัยพิษณุโลก โดยใช้วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงคุณภาพ ประกอบด้วยการสังเกต (Observation) และการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth interview) กับบุคลากรที่เกี่ยวข้องใน กระบวนการบันทึกเวลาและการบริหารจัดการข้อมูล

ผู้ให้ข้อมูลในการศึกษาสภาพปัญหา ประกอบด้วย บุคลากรสายวิชาการ บุคลากรสาย สนับสนุน และผู้รับผิดชอบด้านการบริหารงานบุคคล ซึ่งเป็นผู้ที่มีประสบการณ์ในการใช้งานระบบ

บันทึกเวลาไม่น้อยกว่า 1 ปี และมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการบันทึก ตรวจสอบ หรือบริหารจัดการ ข้อมูลเวลาเข้าปฏิบัติงาน โดยใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive sampling) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย

ผลการศึกษาพบว่า ระบบบันทึกเวลาในปัจจุบันยังคงมีข้อจำกัดหลายประการ ซึ่งส่งผลกระทบต่อ ประสิทธิภาพในการบริหารจัดการและความน่าเชื่อถือของข้อมูล โดยสามารถสรุปประเด็นปัญหาที่ สำคัญได้ดังนี้

1. การบันทึกข้อมูลด้วยวิธีการแบบใช้เอกสาร (Manual system) มีแนวโน้มก่อให้เกิด ความคลาดเคลื่อนของข้อมูล อันเนื่องมาจากความผิดพลาดของมนุษย์ (Human error) เช่น การ เขียนข้อมูลผิดพลาดหรือไม่ครบถ้วน
2. บุคลากรบางส่วนมีพฤติกรรมการลืมลงเวลาการเข้า-ออกงาน ส่งผลให้ข้อมูลไม่ สมบูรณ์และกระทบต่อความถูกต้องของการประเมินเวลาปฏิบัติงาน
3. กระบวนการตรวจสอบข้อมูลย้อนหลังมีความยุ่งยากและใช้ระยะเวลานาน เนื่องจาก ข้อมูลถูกจัดเก็บในรูปแบบเอกสาร ทำให้การค้นหาและการวิเคราะห์ข้อมูลขาดความคล่องตัว
4. ระบบปัจจุบันไม่สามารถแสดงผลข้อมูลในลักษณะเรียลไทม์ (Real-time) ได้ ส่งผล ให้ผู้บริหารไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการตัดสินใจได้อย่างทันท่วงที
5. มีความเสี่ยงต่อการทุจริตในการลงเวลาแทนกัน (Buddy punching) ซึ่งส่งผล กระทบต่อความโปร่งใสและความยุติธรรมในองค์กร

จากปัญหาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นในการพัฒนาระบบบันทึกเวลาเข้างานที่มี ประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยควรเป็นระบบที่สามารถลดข้อผิดพลาด เพิ่มความถูกต้องของข้อมูล รองรับการตรวจสอบย้อนหลังได้อย่างสะดวก และสนับสนุนการบริหารจัดการข้อมูลในรูปแบบดิจิทัล อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งาน (User requirements)

ผู้วิจัยดำเนินการวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งานตามลำดับขั้นตอน ดังนี้

- 1) ศึกษาปัญหาและกระบวนการทำงานของระบบเดิม
- 2) เก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามและการสัมภาษณ์
- 3) วิเคราะห์และจัดกลุ่มความต้องการของผู้ใช้งาน
- 4) นำผลการวิเคราะห์ไปใช้กำหนดความสามารถ (Functional requirements)

และข้อกำหนดของระบบ (System requirements) เพื่อใช้ในการออกแบบและพัฒนาระบบ สารสนเทศ

โดยผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลความต้องการของผู้ใช้งานระบบ โดยใช้แบบสอบถาม (Questionnaire) และการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth interview) กับกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ บุคลากร

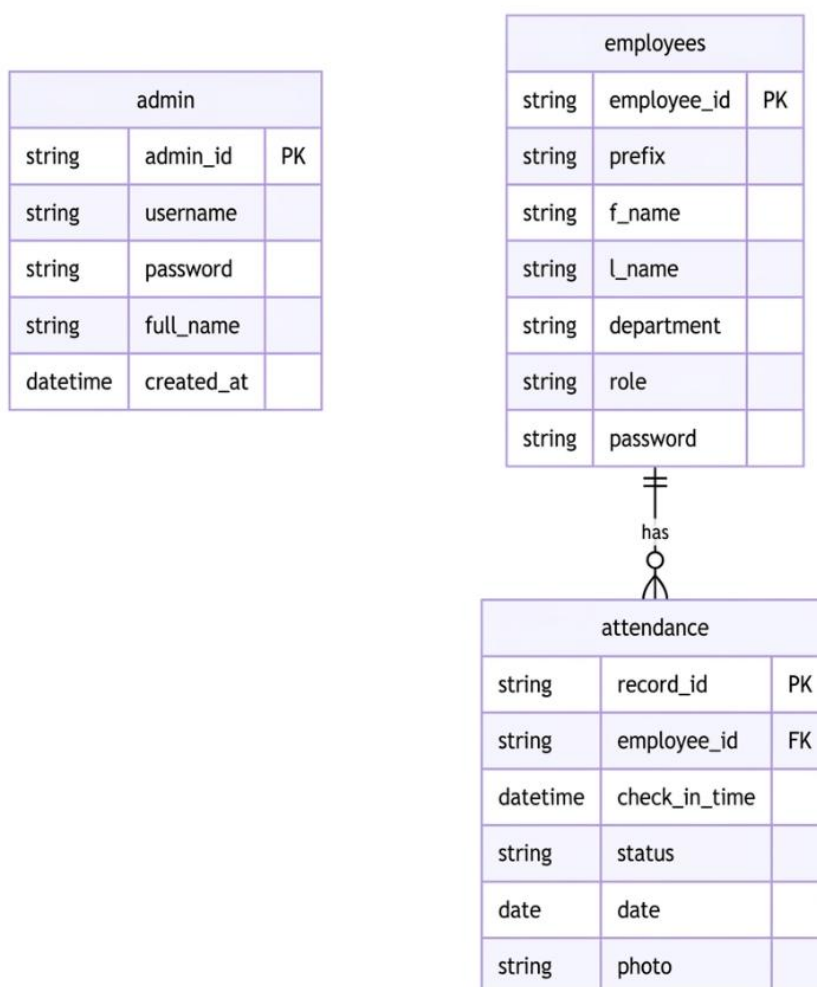
สายวิชาการและสายสนับสนุน รวมถึงผู้ดูแลระบบ ผลการวิเคราะห์พบว่าผู้ใช้งานมีความต้องการหลักได้แก่

- ระบบที่สามารถบันทึกเวลาได้อย่างรวดเร็วและสะดวก
- ระบบที่มีความถูกต้องและลดข้อผิดพลาด
- ระบบที่สามารถตรวจสอบข้อมูลย้อนหลังได้
- ระบบรายงานผลในรูปแบบเรียลไทม์
- ระบบที่มีความปลอดภัยของข้อมูล

3.2 วิเคราะห์และออกแบบระบบ

3.2.1 โครงสร้างฐานข้อมูล

ในการออกแบบฐานข้อมูลของระบบบันทึกเวลาทำงานของบุคลากร มีการกำหนดตารางหลักดังต่อไปนี้

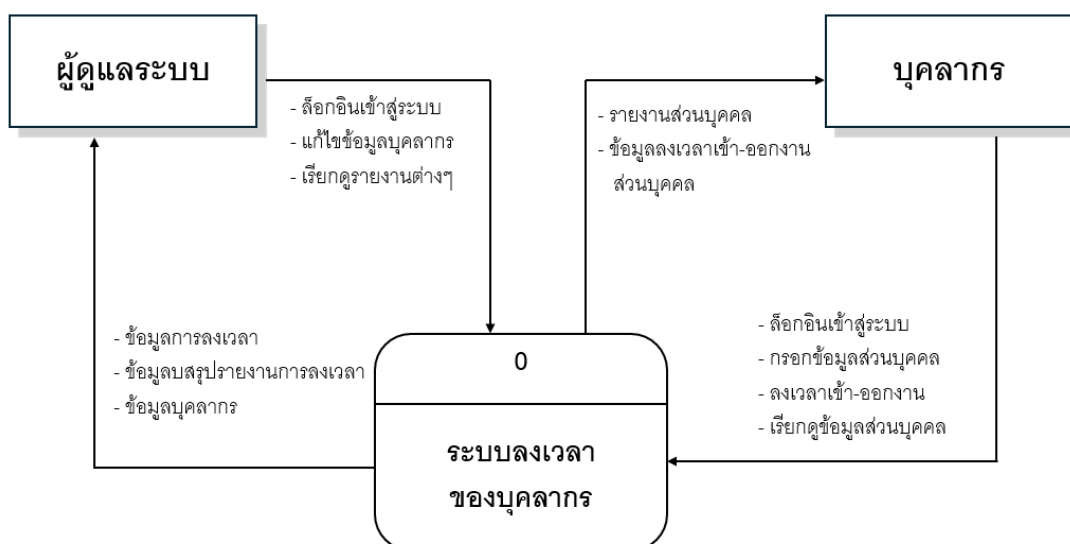


ภาพที่ 1 การออกแบบฐานข้อมูลของระบบบันทึกเวลาทำงานของบุคลากร

ตารางที่ 1 คำอธิบายรายละเอียดแอตทริบิวต์ของฐานข้อมูลของระบบบันทึกเวลาเข้างานของบุคลากร

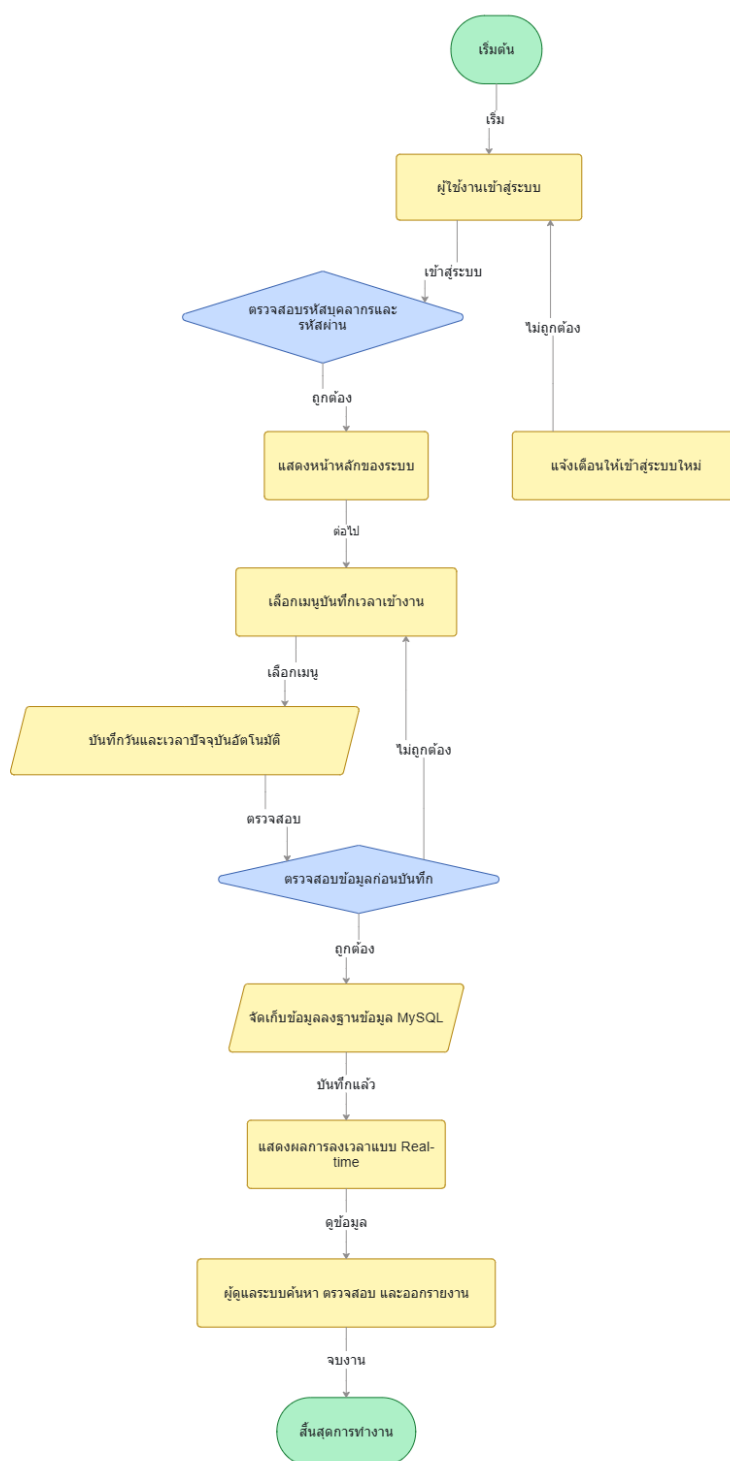
ตารางผู้ดูแลระบบ (Admin)	ตารางพนักงาน (Employees)	ตารางบันทึกเวลาเข้างาน (Attendance)
- admin_id : รหัสผู้ดูแลระบบ - username : ชื่อผู้ใช้งาน - password : รหัสผ่าน - full_name : ชื่อ-นามสกุล - created_at : วันที่และเวลาที่สร้างข้อมูลผู้ดูแลระบบ	- employee_id : รหัสบุคลากร - prefix : คำนำหน้าชื่อ - f_name : ชื่อ - l_name : นามสกุล - department : ตำแหน่งงาน - role : แผนกที่สังกัด - password : รหัสผ่านของ	- record_id : ลำดับข้อมูลการบันทึกเวลา - employee_id : รหัสพนักงานที่ใช้ในการอ้างอิงข้อมูลบุคลากร - check_in_time : วันและเวลาที่พนักงานบันทึกเวลาเข้างาน - status : สถานะการเข้างาน เช่น ตรงเวลา หรือ มาสาย - date : วันที่บันทึกข้อมูลการเข้างาน - photo : ภาพถ่ายที่ใช้ประกอบการบันทึกเวลาเข้างาน

3.2.2 Context diagram สำหรับระบบบันทึกเวลาเข้าออกของบุคลากร



ภาพที่ 2 Context diagram ระบบบันทึกเวลาเข้าออกของบุคลากร

3.2.3 Workflow การทำงานของระบบ



ภาพที่ 3 Workflow การทำงานของระบบ

3.3 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ บุคลากรของมหาวิทยาลัยพิษณุโลก

กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ บุคลากรที่ใช้งานระบบ โดยใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive sampling) จำนวน 65 คน

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.4.1 Hardware 1) คอมพิวเตอร์แบบพกพา (Laptop) ความเร็ว 2.80 GHz 2) หน่วยความจำหลัก (RAM) 16 GB 3) หน่วยความจำสำรอง (SSD) 250 GB

3.4.2 Software 1) Python ใช้ในการพัฒนาระบบเนื่องจากรองรับการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน มีไลบรารีที่หลากหลาย และสามารถเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ 2) JavaScript ใช้พัฒนาส่วนติดต่อผู้ใช้งานให้สามารถโต้ตอบกับระบบได้แบบทันที (Interactive) 3) MySQL ใช้เป็นระบบจัดการฐานข้อมูล เนื่องจากมีเสถียรภาพ รองรับข้อมูลจำนวนมาก และสามารถจัดการสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูลได้ 4) HTML และ CSS ใช้ในการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งานให้ใช้งานง่ายและเหมาะสมกับการใช้งานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ 5) ER diagram เครื่องมือวิเคราะห์และออกแบบระบบ

3.4.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบระบบ การทดสอบระบบสารสนเทศที่พัฒนาขึ้น ดำเนินการเพื่อประเมินความถูกต้องและประสิทธิภาพของระบบก่อนนำไปทดลองใช้งานจริง โดยใช้วิธีการทดสอบเชิงเทคนิค (Technical testing) ประกอบด้วย Black-box testing เพื่อตรวจสอบการทำงานของแต่ละฟังก์ชัน Input validation testing เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลนำเข้า Authentication and Authorization testing เพื่อตรวจสอบการยืนยันตัวตนและสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูล และ Response time testing เพื่อประเมินระยะเวลาการตอบสนองของระบบ ผลการทดสอบถูกนำมาใช้ประกอบการประเมินประสิทธิภาพของระบบก่อนการประเมินโดยผู้ใช้งาน

3.4.4 แบบประเมินประสิทธิภาพของระบบสารสนเทศที่พัฒนาขึ้น เป็นแบบสอบถามมาตรฐานประมาณค่า 5 ระดับ (5-point Likert scale) ใช้สำหรับประเมินความคิดเห็นของผู้ใช้งานภายหลังการทดลองใช้ระบบ โดยครอบคลุมองค์ประกอบด้านประสิทธิภาพของระบบ 4 ด้าน ได้แก่ (1) ความถูกต้องของระบบ (2) ความรวดเร็วของระบบ (3) ความปลอดภัยของข้อมูล และ (4) การรายงานผล

3.4.5 แบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน เป็นแบบสอบถามมาตรฐานประมาณค่า 5 ระดับ (5-point Likert scale) ครอบคลุมประเด็นด้านความสะดวกในการใช้งาน ความรวดเร็ว ความถูกต้อง ความปลอดภัยของข้อมูล และความพึงพอใจโดยรวมต่อระบบ

3.5 สถิติที่ใช้ในการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยประกอบด้วยผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบสารสนเทศและผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ซึ่งเก็บรวบรวมโดยใช้แบบสอบถามมาตรฐานค่า 5 ระดับ (5-point Likert scale)

ผู้วิจัยดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) เพื่ออธิบายลักษณะของข้อมูลและสรุประดับความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่าง ประกอบด้วย

1. ค่าเฉลี่ย (Mean: $\bar{x}$) ใช้สำหรับวิเคราะห์ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับประสิทธิภาพของระบบและความพึงพอใจของผู้ใช้งานในแต่ละด้าน รวมทั้งภาพรวมของระบบ

2. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: S.D.) ใช้สำหรับวิเคราะห์การกระจายตัวของความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่าง เพื่อพิจารณาความสอดคล้องของข้อมูลที่ได้จากการประเมิน

การแปลผลค่าเฉลี่ยของแบบประเมินใช้เกณฑ์การแปลผลตามมาตรฐานค่า 5 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 2

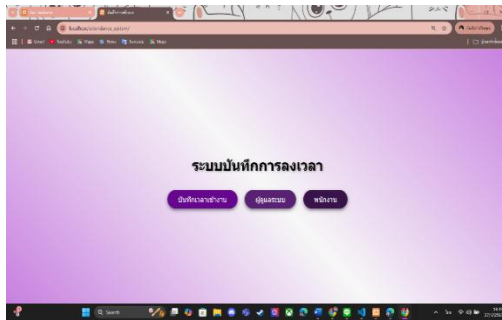
ตารางที่ 2 เกณฑ์ค่าเฉลี่ยคะแนนตามเกณฑ์ประสิทธิภาพของระบบและผลความพึงพอใจ

ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$)	ระดับ
4.51 - 5.00	มากที่สุด
3.51 - 4.50	มาก
2.51 - 3.50	ปานกลาง
1.51 - 2.50	น้อย
1.00 - 1.50	น้อยที่สุด

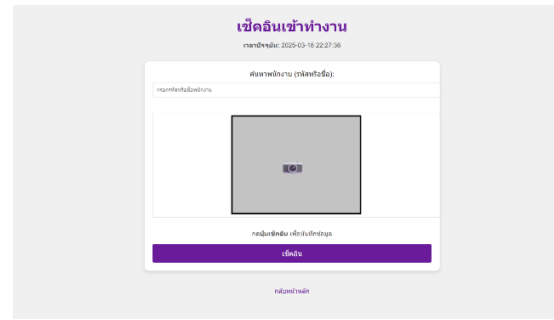
ผลการทดสอบเชิงเทคนิคของระบบ ได้แก่ การทดสอบแบบ Black-box testing การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Input validation testing) การทดสอบการยืนยันตัวตนและการกำหนดสิทธิ์การใช้งาน (Authentication and Authorization testing) และการทดสอบระยะเวลาการตอบสนองของระบบ (Response time testing) นำเสนอในลักษณะการวิเคราะห์เชิงพรรณนา (Descriptive analysis) โดยรายงานผลการทดสอบในรูปแบบผ่าน/ไม่ผ่าน (Pass/Fail) และผลการตอบสนองของระบบตามเกณฑ์ที่กำหนด เพื่ออธิบายระดับประสิทธิภาพของระบบและระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

4. ผลการวิจัย

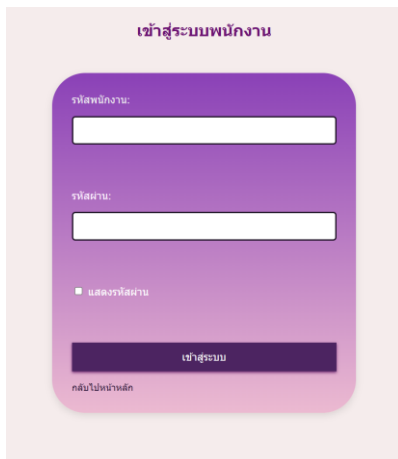
4.1 ผลการพัฒนาสารสนเทศสำหรับการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงานของบุคลากรในมหาวิทยาลัย



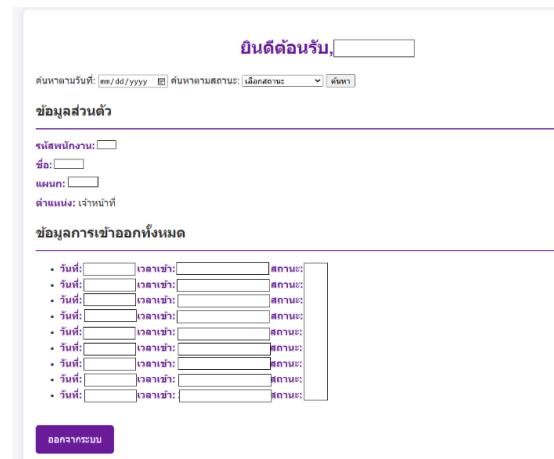
ภาพที่ 4 ภาพระบบบันทึก



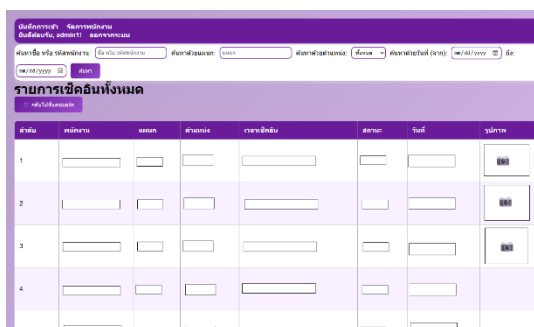
ภาพที่ 5 ภาพหน้าจอเช็คอินเข้างาน



ภาพที่ 6 ภาพหน้าเข้าสู่ระบบพนักงาน



ภาพที่ 7 ภาพเมื่อทำการล็อกอินเสร็จแล้ว



ภาพที่ 8 ภาพแสดงหน้าต่างของผู้ดูแลระบบ



ภาพที่ 9 ภาพหน้าจัดการข้อมูลพนักงาน

จากภาพที่ 4 ภาพระบบบันทึก แสดงหัวข้อการในเนื้อหาต่างๆ ประกอบด้วย บันทึกเวลาเข้างาน ผู้ดูแลระบบ และ พนักงาน ภาพที่ 5 ภาพหน้าจอเช็คอินเข้างาน สามารถบันทึกเวลาเข้าออก

แสดงกล่องเพื่อทำการลงเวลาเข้างานของพนักงาน (บุคลากร) ทั้งหมด ภาพที่ 6 ภาพหน้าเข้าสู่ระบบพนักงาน (บุคลากร) เพื่อดูข้อมูลการลงเวลา ภาพที่ 7 ภาพเมื่อทำการล็อกอินเสร็จแล้ว ระบบจะแสดงข้อมูลส่วนตัว และ ข้อมูลการลงเวลา ภาพที่ 8 ภาพแสดงหน้าต่างของผู้ดูแลระบบ จะแสดงหน้ารายการล็อกอินทั้งหมด สามารถค้นหาข้อมูลที่ทำกรลงเวลาทั้งหมดได้ตามชื่อรหัสพนักงาน แผนก ตำแหน่ง และวันที่ สามารถดูรายงานตามสถานะที่ได้ ประกอบด้วย รายงานรายสัปดาห์ รายงานรายเดือน และ รายงานรายปี ภาพที่ 9 ภาพหน้าจัดการข้อมูลพนักงาน สามารถเพิ่ม ลบ แก้ไขข้อมูลของพนักงานได้

4.2 ผลการทดสอบเชิงเทคนิคของระบบ

ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบระบบสารสนเทศที่พัฒนาขึ้นตามวิธีการทดสอบเชิงเทคนิคที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการวิจัย ประกอบด้วย การทดสอบการทำงานของระบบ (Black-box testing) การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Input validation testing) การทดสอบการยืนยันตัวตนและการกำหนดสิทธิ์การใช้งาน (Authentication and Authorization testing) และการทดสอบระยะเวลาการตอบสนองของระบบ (Response time testing) โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบเชิงเทคนิคของระบบ

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ
Black-box testing	ทุกฟังก์ชันสามารถทำงานได้ถูกต้องตามที่ออกแบบไว้
Input validation testing	ระบบสามารถตรวจสอบข้อมูลที่ไม่ถูกต้องและแจ้งเตือนผู้ใช้งานได้
Authentication and Authorization	ระบบสามารถตรวจสอบผู้ใช้งานและกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูลได้ถูกต้อง
Response time testing	ระบบตอบสนองต่อการบันทึกข้อมูลและการแสดงผลเฉลี่ยไม่เกิน 2 วินาที

จากผลการทดสอบเชิงเทคนิคพบว่า ระบบสามารถทำงานได้ครบถ้วนตามข้อกำหนดที่ออกแบบไว้ โดยทุกฟังก์ชันทำงานได้ถูกต้อง สามารถตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล กำหนดสิทธิ์การเข้าใช้งาน และตอบสนองต่อการใช้งานได้อย่างเหมาะสม

4.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

ภายหลังการทดสอบเชิงเทคนิค ผู้วิจัยได้ดำเนินการประเมินประสิทธิภาพของระบบจากความคิดเห็นของผู้ใช้งานใน 4 ด้าน ได้แก่ ความถูกต้องของระบบ ความรวดเร็วของระบบ ความปลอดภัยของข้อมูล และการรายงานผล โดยผลการประเมินแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

ด้านการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับประสิทธิภาพ
1. ด้านความถูกต้องของระบบ	4.45	0.55	มาก
2. ด้านความรวดเร็วของระบบ	4.48	0.52	มาก
3. ด้านความปลอดภัยของข้อมูล	4.33	0.61	มาก
4. ด้านการรายงานผล	4.41	0.58	มาก
รวม	4.42	0.57	มาก

จากตารางที่ 4 พบว่า ระบบสารสนเทศที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ในระดับ มาก ($\bar{x} = 4.42$, S.D. = 0.57) โดยด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด คือ ด้านความรวดเร็วของระบบ ($\bar{x} = 4.48$) รองลงมา คือ ด้านความถูกต้องของระบบ ($\bar{x} = 4.45$) และ ด้านการรายงานผล ($\bar{x} = 4.41$) ผลการประเมินสะท้อนให้เห็นว่าผู้ใช้งานมีความคิดเห็นว่าระบบสามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว และสนับสนุนการบริหารจัดการข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบเชิงเทคนิคที่แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้ครบถ้วนตามข้อกำหนดที่ออกแบบไว้

4.4 ผลการเปรียบเทียบระบบเดิมกับระบบที่พัฒนาขึ้น

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบระบบเดิมกับระบบที่พัฒนาขึ้น

ประเด็น	ระบบเดิม	ระบบที่พัฒนา
การบันทึกข้อมูล	บันทึกด้วยเอกสาร	บันทึกผ่านระบบสารสนเทศ
การค้นหาข้อมูล	ค้นหายาก ใช้เวลานาน	ค้นหาได้ทันที
การรายงานผล	จัดทำด้วยมือ	รายงานอัตโนมัติ
การแสดงผล	ไม่เป็น Real-time	Real-time
ความปลอดภัย	จำกัด	มีการเข้าสู่ระบบและกำหนดสิทธิ์

จากการเปรียบเทียบพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถลดขั้นตอนการทำงาน เพิ่มความสะดวกในการค้นหาข้อมูล และสนับสนุนการจัดทำรายงานแบบเรียลไทม์ได้ดีกว่าระบบเดิม ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย

4.5 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ

การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบสารสนเทศเพื่อการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงานของบุคลากรในมหาวิทยาลัยพิษณุโลก ดำเนินการโดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า (Likert scale) 5 ระดับ จากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 65 คน โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ระดับความคิดเห็น
1. ความสะดวกในการใช้งานระบบ	4.35	0.62	มาก
2. ความรวดเร็วในการบันทึกเวลา	4.42	0.58	มาก
3. ความถูกต้องของข้อมูล	4.38	0.60	มาก
4. ความปลอดภัยของข้อมูล	4.30	0.65	มาก
5. ความพึงพอใจโดยรวมต่อระบบ	4.40	0.57	มาก
รวม	4.37	0.60	มาก

จากตารางที่ 6 พบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบโดยรวมอยู่ในระดับ มาก ($\bar{x} = 4.37$, S.D. = 0.60) โดยรายการที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด คือ ความรวดเร็วในการบันทึกเวลา ($\bar{x} = 4.42$) รองลงมา คือ ความพึงพอใจโดยรวมต่อระบบ ($\bar{x} = 4.40$) และ ความถูกต้องของข้อมูล ($\bar{x} = 4.38$) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะในด้านความรวดเร็วและความถูกต้อง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการใช้งานระบบบันทึกเวลาเข้างาน

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยเรื่อง “การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงานของบุคลากรในมหาวิทยาลัยพิษณุโลก” มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ออกแบบและพัฒนาระบบสารสนเทศสำหรับการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงานของบุคลากร และ (2) ประเมินประสิทธิภาพของระบบในด้านความถูกต้อง ความรวดเร็ว ความปลอดภัยของข้อมูล การรายงานผล และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

ผลการวิจัยพบว่า ระบบสารสนเทศที่พัฒนาขึ้นสามารถรองรับการบันทึกเวลาเข้าปฏิบัติงาน การจัดเก็บข้อมูล การค้นหาข้อมูล และการออกรายงานผ่านระบบฐานข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ และสนับสนุนการบริหารจัดการข้อมูลบุคลากรได้สะดวกยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการดำเนินงานแบบเดิม

ผลการทดสอบเชิงเทคนิคแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้ครบถ้วนตามข้อกำหนดที่ออกแบบไว้ ทั้งด้านการทำงานของฟังก์ชัน การตรวจสอบข้อมูล การยืนยันตัวตนและกำหนดสิทธิ์การใช้งาน รวมถึงการตอบสนองของระบบอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบจากผู้ใช้งาน พบว่า ประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 4.42$, S.D. = 0.57) และผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 4.37$, S.D. = 0.60) สะท้อนให้เห็นว่าระบบสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน และสนับสนุนการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงานของบุคลากรได้อย่างเหมาะสม

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิจัยสามารถอภิปรายตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยได้ดังนี้

วัตถุประสงค์ข้อที่ 1 การออกแบบและพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงานของบุคลากร

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถรองรับการบันทึกเวลา การจัดเก็บข้อมูล การค้นหา และการออกรายงานผ่านระบบฐานข้อมูลได้อย่างครบถ้วน อีกทั้งสามารถแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ ซึ่งช่วยให้การติดตามข้อมูลและการบริหารจัดการทำได้สะดวกยิ่งขึ้น ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของ วิทยา และคณะ (2567) ที่ระบุว่า ระบบสารสนเทศที่มีประสิทธิภาพควรช่วยลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล เพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการข้อมูล และสนับสนุนการบริหารทรัพยากรมนุษย์ได้อย่างเหมาะสม

นอกจากนี้ ระบบยังได้รับการออกแบบให้มีการยืนยันตัวตนด้วยรหัสบุคลากร พร้อมบันทึกภาพประกอบการลงเวลา เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการตรวจสอบย้อนหลัง ซึ่งเป็นแนวทางที่เหมาะสมกับบริบทการใช้งานของมหาวิทยาลัย และช่วยสนับสนุนการบริหารจัดการข้อมูลให้มีความเป็นระบบมากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์ข้อที่ 2 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ

ผลการประเมินจากผู้ใช้งานพบว่า ระบบมีประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ในระดับมาก ทั้งด้านความถูกต้อง ความรวดเร็ว ความปลอดภัยของข้อมูล และการรายงานผล ขณะเดียวกัน ผลการทดสอบเชิงเทคนิคยังแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้ครบถ้วนตามข้อกำหนดที่ออกแบบไว้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการประเมินของผู้ใช้งาน แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรองรับการใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการวิจัยดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของ อนิวัตร์ และมัทนา (2567) ที่ระบุว่า ระบบสารสนเทศที่ดีควรสามารถเชื่อมโยงข้อมูล ลดความซ้ำซ้อน และสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหารได้อย่างทันท่วงที รวมทั้งสอดคล้องกับการศึกษาของ ยลดา และคณะ (2565) ที่พบว่า ระบบสารสนเทศที่ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานและสนับสนุนการปฏิบัติงานได้จริง จะส่งผลต่อการยอมรับและความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

อย่างไรก็ตาม ระบบที่พัฒนาขึ้นยังมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ การใช้งานยังอยู่ในขอบเขตของมหาวิทยาลัยพิษณุโลก และยังไม่ได้ทดสอบประสิทธิภาพกับองค์กรที่มีจำนวนผู้ใช้งานขนาดใหญ่หรือหลายหน่วยงานร่วมกัน ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตควรขยายการทดสอบไปยังองค์กรที่มีบริบทแตกต่างกัน รวมถึงพัฒนาความสามารถของระบบให้รองรับการเชื่อมโยงข้อมูลกับระบบสารสนเทศอื่นภายในองค์กร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการในระยะยาว

โดยสรุป ระบบสารสนเทศที่พัฒนาขึ้นสามารถสนับสนุนการบริหารจัดการเวลาเข้าปฏิบัติงานของบุคลากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการจัดเก็บข้อมูล การค้นหา การรายงานผล และการแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ อีกทั้งยังได้รับการประเมินจากผู้ใช้งานว่าอยู่ในระดับมาก จึงสามารถเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาระบบสารสนเทศด้านการบริหารทรัพยากรมนุษย์ขององค์กรต่อไป

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 ควรนำระบบสารสนเทศที่พัฒนาขึ้นไปทดลองใช้งานกับหน่วยงานหรือองค์กรที่มีบริบทแตกต่างกัน เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบและปรับปรุงให้เหมาะสมกับการใช้งานในวงกว้าง

6.2 ในการพัฒนาระบบในอนาคต ควรเพิ่มการเชื่อมโยงกับระบบสารสนเทศอื่นขององค์กร เช่น ระบบบริหารทรัพยากรบุคคล (HR) หรือระบบเงินเดือน รวมทั้งพัฒนาการใช้งานผ่านอุปกรณ์เคลื่อนที่และระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสะดวกในการใช้งาน

7. เอกสารอ้างอิง

- ณิญาพัฒน์ สิริเบญจศักดิ์, และสจิวรรณ ทรรพสุ. (2562). การจัดการระบบสารสนเทศในการบริหารงานบุคลากรในโรงเรียนขนาดใหญ่ สังกัดกรุงเทพมหานคร กลุ่มกรุงเทพเหนือ. **วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา**, 11(2), 125–138.
- พิมพร เทพปิตา. (2567). การจัดการทรัพยากรมนุษย์ในยุคดิจิทัลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานของพนักงานจ้างของเทศบาลในเขตอำเภอเมืองลำปาง จังหวัดลำปาง. **วารสารวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม**, 6(1), 31–45.

- ยลดา สี่วงศ์สุวรรณ, อุทัย อร่ามเรือง, และภาวิณี อร่ามเรือง. (2565). ระบบข้อมูลสารสนเทศ
ทรัพยากรมนุษย์และความพึงพอใจของพนักงานในองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น.
วารสาร มจร อุบลปริทรรศน์, 7(3), 1855–1868. สืบค้นจาก <https://so06.tci-thaijo.org/index.php/mcjou/article/view/261246>
- วิทยา ธาตุบุรณย์, ตระกูล จิตวัฒนากร, และเกียรติ บุญโย. (2567). แนวทางการพัฒนาระบบ
สารสนเทศในการบริหารทรัพยากรมนุษย์. **วารสารวิทยาลัยสงฆ์นครลำปาง**, 13(1),
255–270. สืบค้นจาก <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/NBJ/article/view/270188>
- สำนักงานคณะกรรมการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล. (2566). **แนวปฏิบัติการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลสำหรับหน่วยงานภาครัฐและเอกชน**. กรุงเทพฯ: กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม.
- สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน). (2565). **ยุทธศาสตร์ปัญญาประดิษฐ์ประเทศไทย พ.ศ. 2565–2570**. กรุงเทพฯ: ผู้แต่ง.
- สำนักงานพัฒนาธุรกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ (องค์การมหาชน). (2566). **รายงานสถานภาพการพัฒนาดิจิทัลของประเทศไทย ประจำปี 2566**. กรุงเทพฯ: ผู้แต่ง.
- สำนักงานพัฒนารัฐบาลดิจิทัล (องค์การมหาชน). (2565). **รายงานผลการพัฒนารัฐบาลดิจิทัลของประเทศไทย ประจำปี 2565**. กรุงเทพฯ: ผู้แต่ง. สืบค้นจาก <https://www.dga.or.th/policy-standard/policy-regulation/dg-readiness-survey/readinesssurvey65/>
- อนิวัठी กาญจน์วราธร, และมัทนา วังนอมศักดิ์. (2567). ระบบสารสนเทศทรัพยากรมนุษย์สำหรับ
สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษาประถมศึกษา. **วารสาร มจร พุทธปัญญาปริทรรศน์**, 9(1),
155-169. สืบค้นจาก <https://so03.tci-thaijo.org/index.php/jmbr/article/view/278349>

การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษา
ในมหาวิทยาลัยพิษณุโลก
DEVELOPMENT OF A WEB APPLICATION TO SUPPORT STUDENT
ACTIVITY MANAGEMENT AT PHITSANULOK UNIVERSITY

กิตติพงษ์ อุ่นแก้ว, มาริส กัญหาทรัพย์*, ธมนวรรณ บุญไทย,

ฤทธิรงค์ แสงสร้อย, ปกรักษ์ สหายหัสดี

Kittipong Unkaew, Marisa Kuntasup*, Thamnawan Boonthai,

Rittirong Saengsoi, Porakrit Saihasdee

คณะบริหารธุรกิจและการบัญชี มหาวิทยาลัยพิษณุโลก อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

Faculty of Business Administration and Accountancy, Phitsanulok University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: marisak@plu.ac.th

วันที่เข้ารับ 4 มิถุนายน 2569

วันที่แก้ไขบทความ 3 สิงหาคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ 5 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยเรื่อง “การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษาในมหาวิทยาลัยพิษณุโลก” มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษา และ (2) ประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ต่อประสิทธิภาพของระบบ การวิจัยนี้เป็น การวิจัยเชิงพัฒนา (Research and development: R&D) โดยดำเนินการตามกระบวนการพัฒนาระบบสารสนเทศ จุดเด่นของงานวิจัยคือการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่สามารถบริหารจัดการข้อมูลกิจกรรมนักศึกษาแบบเรียลไทม์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดความซ้ำซ้อน และสนับสนุนการติดตามข้อมูลของผู้ใช้งาน กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ นักศึกษามหาวิทยาลัยพิษณุโลก จำนวน 104 คน ซึ่งได้มาจากการเลือกแบบเจาะจง (Purposive sampling) เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล คือ แบบสอบถามความพึงพอใจของผู้ใช้งาน วิเคราะห์ข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า เว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นสามารถสนับสนุนการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล เพิ่มความถูกต้อง และอำนวยความสะดวกในการบันทึก ตรวจสอบ และติดตามข้อมูลกิจกรรมของนักศึกษาและผู้ดูแลระบบ ระบบสามารถทำงานได้ถูกต้องตามฟังก์ชันหลัก และสนับสนุนการแสดงผลข้อมูลเพื่อการบริหารจัดการได้อย่างรวดเร็ว ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน พบว่า โดยรวมอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 4.20$, S.D. = 0.58) โดยด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด คือ ด้านความถูกต้องของข้อมูล ($\bar{x} = 4.25$) รองลงมาคือ ด้านความพึงพอใจโดยรวม ($\bar{x} = 4.22$) และด้านความง่ายในการใช้งาน ($\bar{x} = 4.20$) ตามลำดับ ผลการประเมินสะท้อนให้เห็นว่าระบบมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริง สามารถ

ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการกิจกรรม
นักศึกษาได้อย่างเป็นระบบ

คำสำคัญ: เว็บแอปพลิเคชัน, การบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษา, ระบบสารสนเทศ, ความพึงพอใจ
ของผู้ใช้, Google apps script

Abstract

This research, entitled “Development of a Web Application to Support Student Activity Management at Phitsanulok University,” aimed to (1) develop a web application for managing student activities and (2) evaluate users’ satisfaction with the system’s performance. This study employed a research and development (R&D) approach based on an information system development process. A key feature of the research was the development of a web application capable of managing student activity data in real time to enhance efficiency, reduce data redundancy, and facilitate data monitoring by users. The sample consisted of 104 students from Phitsanulok University who were selected through purposive sampling. The research instrument was a user satisfaction questionnaire. The data were analyzed using the mean and standard deviation. The results showed that the developed web application effectively supported student activity management. It reduced data redundancy, improved data accuracy, and facilitated the recording, verification, and monitoring of activity data by students and system administrators. The system performed its core functions correctly and enabled the rapid display of information for management purposes. The overall level of user satisfaction was high ($\bar{x} = 4.20$, $SD = 0.58$). Data accuracy received the highest mean score ($\bar{x} = 4.25$), followed by overall satisfaction ($\bar{x} = 4.22$) and ease of use ($\bar{x} = 4.20$), respectively. These findings indicate that the developed system is suitable for practical use, meets users’ needs, and systematically enhances the efficiency of student activity management.

Keywords: Web application, Student activity management, Information system, User satisfaction, Google apps script

1. บทนำ

ในยุคดิจิทัล เทคโนโลยีสารสนเทศได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการบริหารจัดการขององค์กร โดยเฉพาะสถาบันอุดมศึกษาซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีภารกิจด้านการผลิตบัณฑิต การบริหารจัดการองค์ความรู้ และการให้บริการทางวิชาการแก่สังคม การนำระบบสารสนเทศเพื่อการบริหาร (Management information system: MIS) และเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันมาใช้จึงเป็นกลไกสำคัญที่ช่วยสนับสนุนการจัดเก็บ การประมวลผล การวิเคราะห์ และการนำเสนอข้อมูลสารสนเทศให้มีความถูกต้อง รวดเร็ว และสามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจเชิงบริหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ (อุราเพ็ญ และรพีพร, 2558) นอกจากนี้ ระบบสารสนเทศที่ได้รับการออกแบบให้สอดคล้องกับกระบวนการทำงานของผู้ใช้ยังช่วยลดขั้นตอนการดำเนินงาน ลดภาระงานของบุคลากร และเพิ่มระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของการนำระบบสารสนเทศไปประยุกต์ใช้ในองค์กร (กิตติยา และสุณิสสา, 2559)

การจัดกิจกรรมนักศึกษาเป็นภารกิจสำคัญของสถาบันอุดมศึกษาในการส่งเสริมและพัฒนาผู้เรียนให้มีคุณลักษณะที่พึงประสงค์ตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา โดยมุ่งเน้นการพัฒนาทั้งด้านความรู้ ทักษะทางสังคม คุณธรรมจริยธรรม ความรับผิดชอบ และความสามารถในการทำงานร่วมกับผู้อื่น กิจกรรมนักศึกษาจึงมิได้เป็นเพียงกิจกรรมเสริมหลักสูตร แต่เป็นกระบวนการเรียนรู้ที่ช่วยพัฒนาศักยภาพของนักศึกษาให้มีความพร้อมต่อการดำรงชีวิตและการประกอบอาชีพในศตวรรษที่ 21

อย่างไรก็ตาม การบริหารจัดการข้อมูลกิจกรรมนักศึกษาในหลายสถาบันยังคงประสบปัญหาเกี่ยวกับกระบวนการจัดเก็บและบริหารข้อมูล โดยเฉพาะ การใช้เอกสารหรือไฟล์ตารางคำนวณเป็นเครื่องมือหลักในการบันทึกข้อมูล ซึ่งส่งผลให้ข้อมูลขาดความเป็นเอกภาพ มีความซ้ำซ้อน และยากต่อการตรวจสอบย้อนหลัง สอดคล้องกับแนวคิดของ อุทิศ (2559) ที่ระบุว่า ระบบสารสนเทศที่ไม่มีโครงสร้างการจัดการข้อมูลที่เหมาะสม อาจส่งผลต่อคุณภาพของข้อมูล ความถูกต้องของสารสนเทศ และประสิทธิภาพของกระบวนการบริหารจัดการ

จากการศึกษาสภาพการดำเนินงานของมหาวิทยาลัยพิษณุโลก พบว่า การบันทึกข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรมนักศึกษายังคงใช้วิธีการแบบดั้งเดิม ได้แก่ การลงลายมือชื่อในเอกสาร และการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบไฟล์ตารางคำนวณ ส่งผลให้เกิดข้อจำกัด ได้แก่ (1) ข้อมูลมีการจัดเก็บแยกส่วนและกระจัดกระจาย (2) เกิดความเสี่ยงต่อการสูญหายหรือแก้ไขข้อมูลโดยไม่ได้รับอนุญาต (3) ใช้ระยะเวลาในการรวบรวม ตรวจสอบ และจัดทำรายงาน และ (4) นักศึกษาไม่สามารถเข้าถึงข้อมูลประวัติการเข้าร่วมกิจกรรมของตนเองได้อย่างสะดวกและทันเวลา ปัญหาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นในการพัฒนาระบบสารสนเทศที่สามารถสนับสนุนการบริหารจัดการข้อมูลกิจกรรมนักศึกษาอย่างเป็นระบบ

งานวิจัยของ พรทิพย์ (2563) พบว่า การพัฒนาระบบสารสนเทศบนเว็บช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเก็บและค้นคืนข้อมูล ลดความผิดพลาดจากการปฏิบัติงานด้วยมือ และช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลได้สะดวกมากขึ้น เช่นเดียวกับ อัญชลี และผณิกา (2569) ที่ได้พัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการกิจกรรมพัฒนานักศึกษา พบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นช่วยสนับสนุนการบริหารจัดการกิจกรรม ลดขั้นตอนการดำเนินงาน เพิ่มความสะดวกและรวดเร็วในการตรวจสอบข้อมูล การติดตามการเข้าร่วมกิจกรรม และการจัดทำรายงานสรุปผลสำหรับผู้บริหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษาจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการแก้ไขปัญหาดังกล่าว เนื่องจากสามารถนำเทคโนโลยีสารสนเทศมาประยุกต์ใช้ในการจัดเก็บข้อมูล การตรวจสอบ การประมวลผล และการรายงานผลได้อย่างเป็นระบบ ช่วยสร้างฐานข้อมูลกลางสำหรับการบริหารกิจกรรมนักศึกษา ลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล เพิ่มความถูกต้องของสารสนเทศ และช่วยให้ผู้บริหารสามารถใช้ข้อมูลประกอบการวางแผนและกำหนดนโยบายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบถือเป็นองค์ประกอบสำคัญในการประเมินคุณภาพของระบบสารสนเทศ เนื่องจากสะท้อนถึงความสามารถของระบบในการตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ โดยพิจารณาจากด้านความง่ายในการใช้งาน ความถูกต้องของระบบ ความรวดเร็วในการประมวลผล และประโยชน์ที่ได้รับจากระบบ (เนตรนภา, 2564)

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษาในมหาวิทยาลัยพิษณุโลก

2.2 ประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ต่อประสิทธิภาพของระบบ

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษาปัญหาและความต้องการของระบบ

การศึกษาปัญหาและความต้องการของระบบเป็นขั้นตอนสำคัญในการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษาในมหาวิทยาลัยพิษณุโลก โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาจากการวิเคราะห์เอกสาร การสังเกตกระบวนการทำงาน และการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เจ้าหน้าที่และนักศึกษา

การเก็บรวบรวมข้อมูลใช้การสัมภาษณ์แบบกึ่งโครงสร้าง (Semi-structured interview) โดยผู้ให้ข้อมูลประกอบด้วย เจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบงานกิจกรรมนักศึกษา จำนวน 2 คน และนักศึกษาที่เคยเข้าร่วมกิจกรรม จำนวน 10 คน ซึ่งคัดเลือกแบบเฉพาะเจาะจง (Purposive sampling)

เนื่องจากเป็นผู้มีประสบการณ์เกี่ยวกับกระบวนการดำเนินงานและการเข้าร่วมกิจกรรมของมหาวิทยาลัย ประเด็นคำถามในการสัมภาษณ์ประกอบด้วย ปัญหาของระบบเดิม ขั้นตอนการดำเนินงาน ความต้องการของระบบ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงระบบ

ผลการศึกษาพบว่า ระบบเดิมยังใช้วิธีการบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิม เช่น การลงลายมือชื่อในเอกสารและการจัดเก็บข้อมูลในไฟล์ตารางคำนวณ ส่งผลให้เกิดปัญหาหลัก ได้แก่ การจัดเก็บข้อมูลที่ไม่เป็นระบบ ความซ้ำซ้อนและความผิดพลาดของข้อมูล ความล่าช้าในการสืบค้นข้อมูล และไม่สามารถติดตามสถานะการเข้าร่วมกิจกรรมได้แบบเรียลไทม์ นอกจากนี้ ยังเพิ่มภาระงานให้แก่เจ้าหน้าที่ และทำให้นักศึกษาไม่สามารถตรวจสอบข้อมูลของตนเองได้อย่างสะดวก

จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ความต้องการของระบบ โดยแบ่งเป็น 2 ด้าน ได้แก่

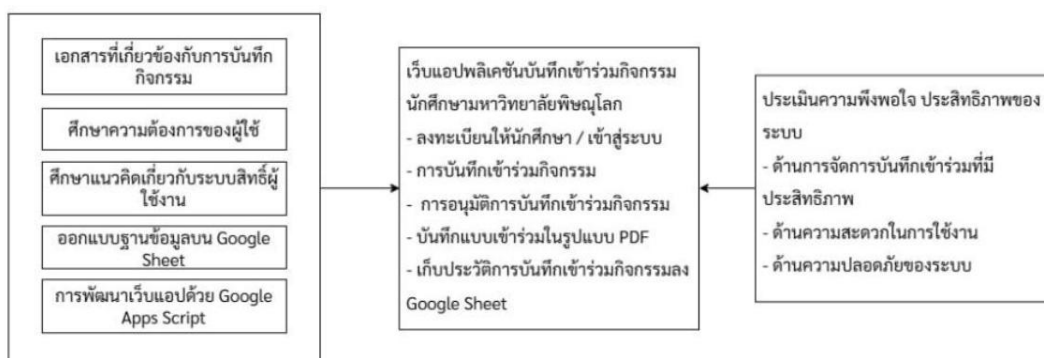
(1) ความต้องการเชิงหน้าที่ ระบบต้องสามารถบันทึกและจัดการข้อมูลกิจกรรม แสดงสถานะการเข้าร่วม ตรวจสอบประวัติ และออกรายงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(2) ความต้องการเชิงไม่ใช้หน้าที่ ระบบควรมีความง่ายในการใช้งาน มีความรวดเร็ว ถูกต้อง และมีความปลอดภัยของข้อมูล รวมถึงรองรับการเข้าถึงผ่านอุปกรณ์ที่หลากหลาย

ทั้งนี้ ระบบถูกออกแบบให้รองรับผู้ใช้งาน 2 กลุ่ม ได้แก่ ผู้ดูแลระบบ (Admin) และนักศึกษา (User) โดยกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูลตามบทบาท เพื่อให้การใช้งานมีความเหมาะสม

จากการวิเคราะห์ดังกล่าว นำไปสู่แนวทางการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่สามารถบันทึกและจัดการข้อมูลกิจกรรมแบบออนไลน์ รองรับการทำงานแบบเรียลไทม์ ลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล และสนับสนุนการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 กรอบแนวคิดในการทำวิจัย



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการทำวิจัย

3.3 วิเคราะห์และออกแบบระบบ

3.3.1 ระบบงานเดิม (As-is system)

ระบบเดิมในการบันทึกการเข้าร่วมกิจกรรมนักศึกษามหาวิทยาลัยพิษณุโลกใช้รูปแบบสมุดบันทึกกิจกรรม โดยนักศึกษาต้องกรอกข้อมูลและขอรับรองจากอาจารย์ผู้รับผิดชอบในแต่ละกิจกรรม หากไม่นำสมุดมา จะต้องใช้หลักฐานภาพถ่ายและดำเนินการลงนามย้อนหลัง ส่งผลให้กระบวนการมีความยุ่งยากและเสี่ยงต่อความผิดพลาด

นอกจากนี้ การตรวจสอบผลการเข้าร่วมกิจกรรมต้องดำเนินการแบบเอกสาร ทำให้เกิดข้อจำกัดด้านความถูกต้อง ความสะดวกในการติดตามข้อมูล และการสืบค้นข้อมูลย้อนหลัง รวมถึงเพิ่มภาระงานให้แก่ผู้สอนในการตรวจสอบและสรุปผลกิจกรรม

3.3.2 ระบบงานใหม่ (To-be system)

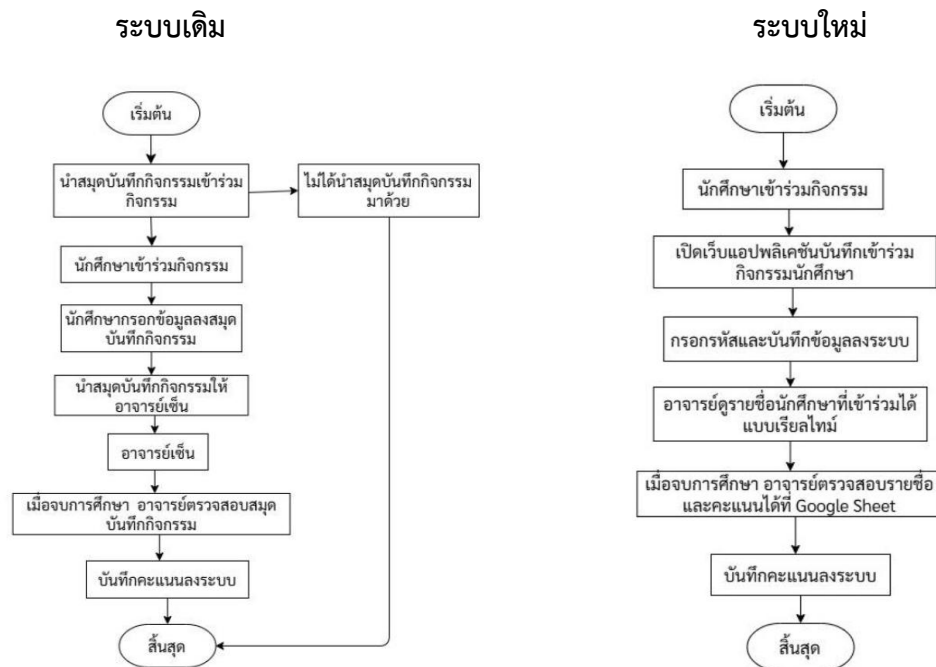
ระบบงานใหม่ถูกพัฒนาในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน โดยใช้ Google apps script เชื่อมต่อกับ Google sheets เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษาอย่างเป็นระบบ ผู้ใช้งานสามารถเข้าสู่ระบบเพื่อบันทึกการเข้าร่วมกิจกรรมผ่านการเช็กอินและแนบหลักฐานแบบดิจิทัล พร้อมทั้งสามารถตรวจสอบสถานะ คะแนน และประวัติการเข้าร่วมกิจกรรมได้แบบเรียลไทม์

ในส่วนของผู้ดูแลระบบ สามารถติดตามข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรมของนักศึกษาได้ทันที ตรวจสอบย้อนหลัง และจัดทำรายงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกจัดเก็บในฐานข้อมูลกลางแบบอัตโนมัติ ลดความซ้ำซ้อนและข้อผิดพลาดของข้อมูล

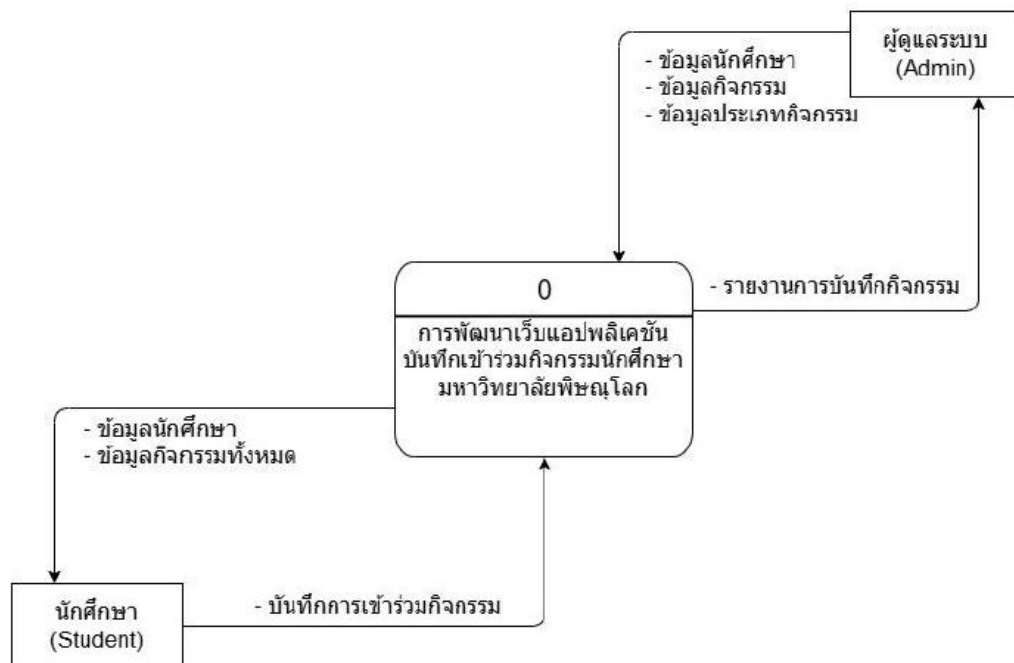
ทั้งนี้ ระบบยังรองรับการตรวจสอบตำแหน่งการเข้าร่วมกิจกรรมตามรัศมีที่กำหนด เพื่อเพิ่มความถูกต้องของข้อมูล ส่งผลให้กระบวนการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษามีความสะดวกรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ

3.3.3 การออกแบบระบบ

การออกแบบระบบเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการวางแผนและกำหนดรูปแบบการทำงาน ของระบบให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้งาน โดยในโครงงานนี้ได้นำเสนอการออกแบบ ระบบในรูปแบบของแผนภาพบริบท (Context diagram) เพื่อแสดงการไหลของข้อมูลภายในระบบบันทึกกิจกรรมนักศึกษาในอุปกรณ์อย่างเป็นระบบ



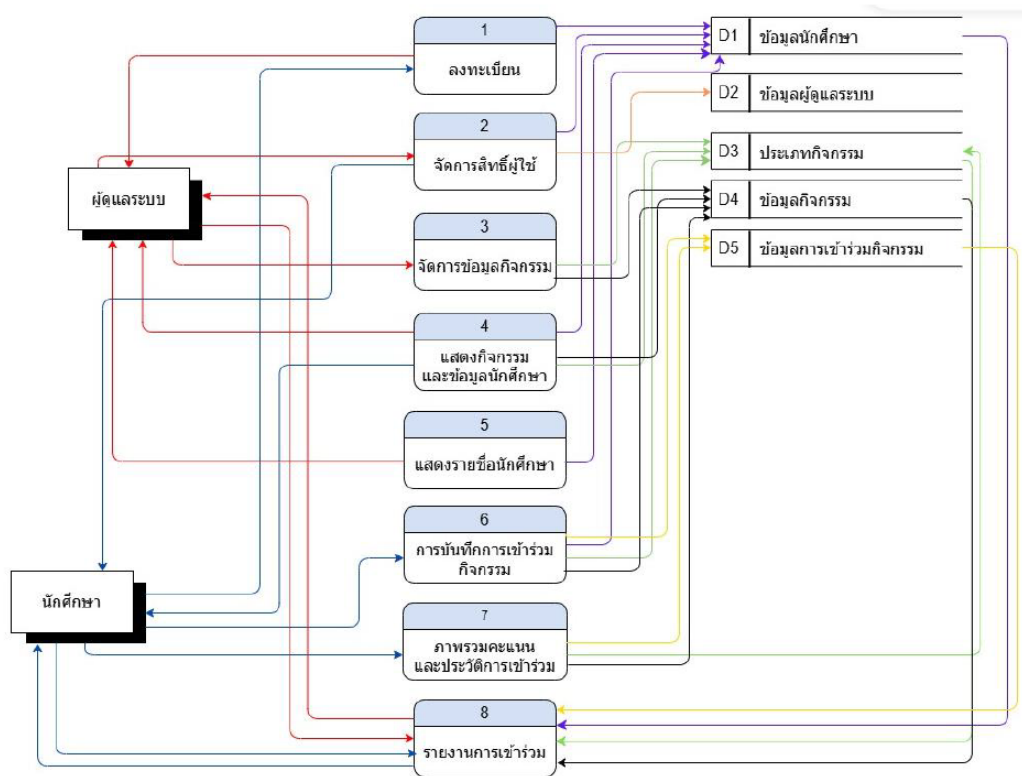
ภาพที่ 2 เปรียบเทียบระบบงานเดิมกับระบบงานใหม่



ภาพที่ 3 Context diagram

นอกจากแผนภาพบริบท (Context diagram) ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์และออกแบบกระบวนการทำงานของระบบด้วย แผนภาพกระแสข้อมูล (Data flow diagram: DFD)

เพื่อแสดงรายละเอียดการไหลของข้อมูลระหว่างผู้ใช้งาน กระบวนการทำงาน และแหล่งจัดเก็บข้อมูลภายในระบบ โดยกำหนดองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ผู้ดูแลระบบ (Admin) และนักศึกษา (User) ซึ่งมีการส่งข้อมูลเข้าสู่กระบวนการประมวลผลและรับผลลัพธ์จากระบบตามสิทธิ์การใช้งาน



ภาพที่ 4 แผนภาพกระแสข้อมูล (Data flow diagram)

3.4 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ นักศึกษามหาวิทยาลัยพิษณุโลกที่เข้าร่วมกิจกรรมของมหาวิทยาลัยในปีการศึกษาที่ดำเนินการวิจัย ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 1,240 คน

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ นักศึกษามหาวิทยาลัยพิษณุโลก จำนวน 104 คน โดยกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างตามหลักเกณฑ์ของตารางสำเร็จรูปของ Krejcie & Morgan (1970) หรือหลักเกณฑ์ที่มหาวิทยาลัยกำหนด (เลือกใช้ตามวิธีที่ใช้จริง) จากนั้นเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive sampling) เนื่องจากเป็นนักศึกษาที่เคยเข้าร่วมกิจกรรมและสามารถทดลองใช้ระบบเพื่อประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจได้อย่างเหมาะสม

3.5 เครื่องมือและเทคโนโลยีที่ใช้ในการพัฒนา

เพื่อให้ระบบสามารถใช้งานได้สะดวก รวดเร็ว และเข้าถึงได้จากอุปกรณ์หลากหลายประเภท ผู้จัดทำได้เลือกใช้เครื่องมือและเทคโนโลยีที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. Google apps script เป็นภาษาสคริปต์ที่พัฒนาโดย Google สำหรับใช้ในการเขียนโปรแกรมที่สามารถ เชื่อมโยงกับบริการต่าง ๆ ของ Google ได้โดยตรง เช่น Google sheets, Google drive และ Google forms โดยในโครงการนี้ Google apps script ถูกนำมาใช้ในการประมวลผลคำสั่งต่าง ๆ เช่น การเพิ่มข้อมูลลงฐานข้อมูล การค้นหาและอัปเดตข้อมูล การควบคุมเงื่อนไขต่าง ๆ ของระบบ และการสร้าง Web app เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงระบบผ่านเบราว์เซอร์ได้อย่างสะดวก

ผู้วิจัยเลือกใช้ Google apps script เนื่องจากสามารถเชื่อมต่อกับบริการของ Google Workspace ได้โดยตรง ลดค่าใช้จ่ายในการพัฒนาระบบ ไม่จำเป็นต้องติดตั้งเซิร์ฟเวอร์เพิ่มเติม และสามารถพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม Google apps script มีข้อจำกัดด้านโควตาการใช้งาน (Quota) และประสิทธิภาพการประมวลผลเมื่อมีผู้ใช้งานพร้อมกันจำนวนมาก

2. Google sheets ใช้เป็นฐานข้อมูลหลักของระบบ เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการเก็บข้อมูลแบบ ตาราง และสามารถใช้งานร่วมกับ Google apps script ได้อย่างมีประสิทธิภาพ Google sheets ยังรองรับการใช้งานแบบเรียลไทม์ (Real-time collaboration) ซึ่งผู้ใช้งานหลายคนสามารถดูและ แก้ไขข้อมูลได้พร้อมกัน อีกทั้งยังง่ายต่อการดูแลและสำรองข้อมูล

Google sheets ถูกเลือกใช้เป็นฐานข้อมูล เนื่องจากสามารถจัดเก็บข้อมูลได้สะดวก รองรับการทำงานแบบเรียลไทม์ และสามารถเชื่อมต่อกับ Google apps script ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม Google sheets เหมาะสำหรับระบบที่มีข้อมูลขนาดเล็กถึงปานกลาง และอาจมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพเมื่อมีข้อมูลหรือจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นมาก

3. HTML, CSS และ JavaScript เป็นภาษาพื้นฐานในการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน HTML (Hyper text markup language) ใช้ในการกำหนดโครงสร้างของหน้าเว็บ เช่น ฟอรัมกรอกข้อมูล ตารางแสดงข้อมูล และ ปุ่มคำสั่ง JavaScript ใช้สำหรับควบคุมการทำงานแบบไดนามิก เช่น การตรวจสอบค่าที่ กรอกในฟอร์ม การแสดงหรือซ่อน Modal Box และการเรียกใช้งานฟังก์ชันของ Google apps script ผ่าน google.script.run

4. Bootstrap 5 เป็น CSS Framework ที่ช่วยในการออกแบบหน้าตาเว็บไซต์ให้สวยงามและมีความ ยืดหยุ่น รองรับการแสดงผลบนอุปกรณ์หลากหลายขนาด (Responsive design) Bootstrap ช่วยลด ระยะเวลาในการพัฒนา UI และทำให้เว็บไซต์มีความเป็นมาตรฐานในระดับสากล

3.6 สถิติที่ใช้ในการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ค่าเฉลี่ย (Mean) ในการวิเคราะห์ระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

2. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ใช้ในการวัดการกระจายของข้อมูล
ความคิดเห็นของผู้ใช้งาน

ทั้งนี้ การแปลผลระดับความพึงพอใจใช้เกณฑ์การประเมินแบบมาตราส่วนประมาณค่า
(Likert scale) 5 ระดับ โดยกำหนดช่วงคะแนน ดังนี้

4.21–5.00 หมายถึง ระดับมากที่สุด

3.41–4.20 หมายถึง ระดับมาก

2.61–3.40 หมายถึง ระดับปานกลาง

1.81–2.60 หมายถึง ระดับน้อย

1.00–1.80 หมายถึง ระดับน้อยที่สุด

3. การประเมินประสิทธิภาพของระบบในเชิงเทคนิค ประกอบด้วย การทดสอบความ
ถูกต้องของการทำงาน (Functional testing) การทดสอบความถูกต้องของการบันทึกและเรียกคืน
ข้อมูล และการทดสอบการตอบสนองของระบบ (Response time) เพื่อประเมินว่าระบบสามารถ
ทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ก่อนนำไปประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

3.7 จริยธรรมการวิจัยและการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล

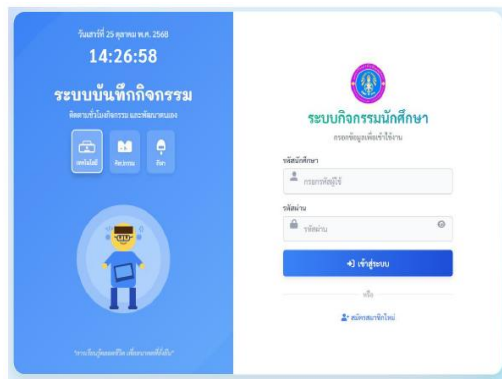
ผู้วิจัยดำเนินการวิจัยโดยคำนึงถึงจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ ผู้เข้าร่วมวิจัยทุกคนได้รับการ
ชี้แจงวัตถุประสงค์ของการวิจัย ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล และสิทธิในการเข้าร่วมหรือถอนตัว
จากการวิจัยได้ทุกเมื่อโดยไม่เกิดผลกระทบ ข้อมูลที่เก็บรวบรวมจะถูกเก็บเป็นความลับ ใช้เพื่อการ
วิจัยเท่านั้น และนำเสนอผลการวิจัยในภาพรวมโดยไม่เปิดเผยข้อมูลส่วนบุคคล ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้
ดำเนินการจัดเก็บข้อมูลให้สอดคล้องกับหลักการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลตามพระราชบัญญัติ
คุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล พ.ศ. 2562 (PDPA)

4. ผลการวิจัย

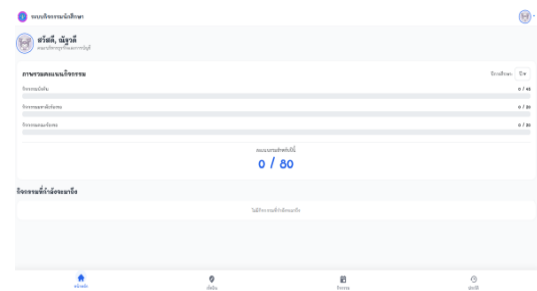
4.1 ผลการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษาใน มหาวิทยาลัยพิษณุโลก

4.1.1 การแสดงผลส่วนของ Student

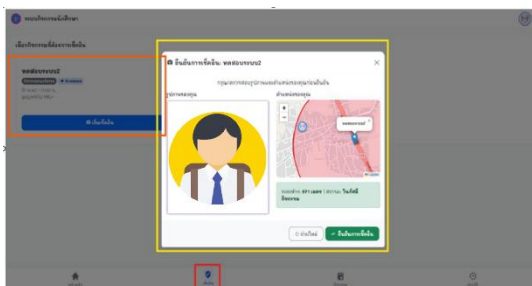
ภาพที่ 5 หน้าเข้าสู่ระบบหน้าแรก เมื่อนักศึกษา ต้องการเข้าใช้งานเว็บแอปพลิเคชัน
จะเห็นหน้านี้เป็นอันดับแรก ซึ่งให้กรอก รหัสนักศึกษา และ Password แล้ว Login เพื่อเข้าถึงระบบ
ภาพที่ 6 เป็นหน้าภาพรวมคะแนนทั้งหมด ที่แสดงคะแนนรวมของประเภทกิจกรรมต่าง ๆ และแสดง
กิจกรรมที่กำลังจะมาถึง ภาพที่ 7 หน้าบันทึกเข้าร่วมกิจกรรม เป็นหน้าที่นักศึกษาใช้ในการบันทึกเข้า
ร่วมกิจกรรม ภาพที่ 8 หน้าแสดงกิจกรรมทั้งหมด เป็นหน้าที่แสดงกิจกรรมทั้งหมด และด้านขวาสุด
ของกิจกรรมนั้น ๆ จะแสดงข้อความว่ากิจกรรมนั้นนักศึกษาได้เข้าร่วมกิจกรรมนั้นหรือไม่



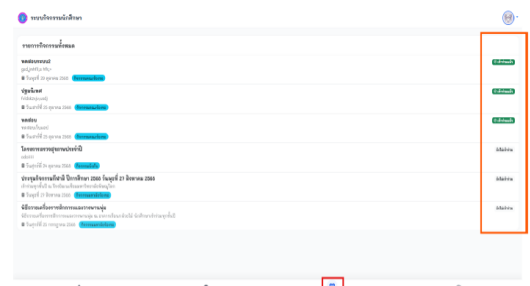
ภาพที่ 5 หน้าเข้าสู่ระบบหน้าแรก



ภาพที่ 6 หน้าหลักของระบบ

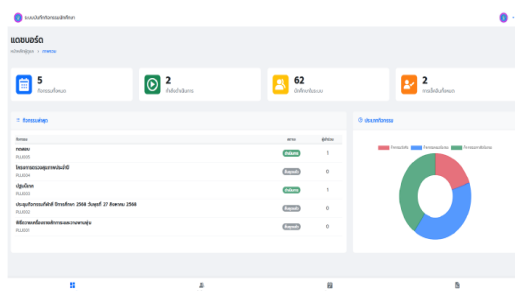


ภาพที่ 7 หน้าบันทึกเข้าร่วมกิจกรรม

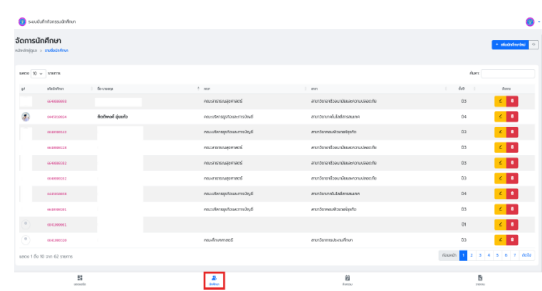


ภาพที่ 8 หน้าแสดงกิจกรรมทั้งหมด

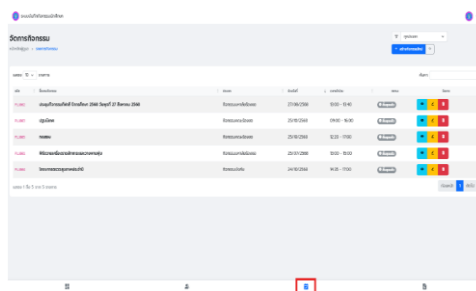
4.1.2 การแสดงผลส่วนของ Admin



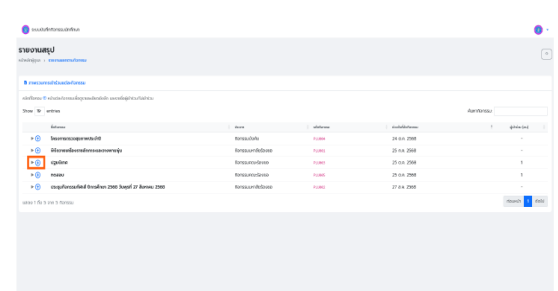
ภาพที่ 9 หน้าหลักของระบบ



ภาพที่ 10 หน้าจัดการนักศึกษา



ภาพที่ 11 หน้าจัดการกิจกรรม



ภาพที่ 12 หน้ารายงาน

ภาพที่ 9 หน้าหลักของระบบ เป็นหน้า Dashboard ที่แสดงสถิติรวมของกิจกรรม จำนวนนักศึกษาทั้งหมด และกิจกรรมล่าสุด พร้อมกราฟแสดงประเภทกิจกรรม และการบันทึก นักศึกษาที่เข้าร่วมก็ค่อนข้างชัดเจน ภาพที่ 10 หน้าจัดการนักศึกษา เป็นหน้าสำหรับเข้าถึงข้อมูล เกี่ยวกับรายชื่อนักศึกษาทั้งหมด ภาพที่ 11 หน้าจัดการกิจกรรม แสดงหน้ากิจกรรมทั้งหมด โดย สามารถเลือกให้เรียงตาม ประเภท ช่วงวันที่ เวลากิจกรรม และสถานะได้ หรือค้นหาได้ด้วย ด้านขวา ของกิจกรรมผู้ดูแลระบบสามารถ ดูรายละเอียด แก้ไข และลบ กิจกรรมได้ ภาพที่ 12 หน้ารายงาน แสดงรายละเอียดกิจกรรม โดยประกอบไปด้วย ชื่อกิจกรรม ประเภทกิจกรรม รหัสกิจกรรม ช่วงวันที่ จัดกิจกรรม จำนวนผู้เข้าร่วมกิจกรรม เมื่อกดสัญลักษณ์บวกสีน้ำเงินด้านหน้า จะแสดงรายละเอียด ต่างๆ

4.1.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ

ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพของเว็บแอปพลิเคชันก่อนนำไปประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน โดยทดสอบการทำงานของฟังก์ชันหลักของระบบ ได้แก่ การเข้าสู่ระบบ การบันทึกข้อมูล การจัดการกิจกรรม การค้นหาข้อมูล และการแสดงผลรายงาน รวมถึงทดสอบความถูกต้องของข้อมูล การรองรับผู้ใช้งานพร้อมกัน และเปรียบเทียบการทำงานระหว่างระบบเดิมกับระบบที่พัฒนาขึ้น ดังนี้

4.1.3.1 ผลการทดสอบความถูกต้องของข้อมูล

ผู้วิจัยได้ทดสอบการบันทึกข้อมูลตัวอย่างผ่านเว็บแอปพลิเคชัน โดยตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่แสดงผลในระบบและข้อมูลที่จัดเก็บใน Google sheets ผลการทดสอบพบว่าข้อมูลที่บันทึกสามารถจัดเก็บและเรียกใช้งานได้ถูกต้องตรงกัน ไม่พบความคลาดเคลื่อนของข้อมูลในการทดสอบ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความถูกต้องของข้อมูล

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ
การบันทึกข้อมูล	ถูกต้อง
การแก้ไขข้อมูล	ถูกต้อง
การลบข้อมูล	ถูกต้อง
การค้นหาข้อมูล	ถูกต้อง



4.1.3.2 ผลการทดสอบการรองรับผู้ใช้งานพร้อมกัน

ผู้วิจัยได้ทดลองให้ผู้ใช้งานเข้าใช้งานระบบพร้อมกันจำนวน 104 คน เพื่อทดสอบความสามารถในการรองรับการใช้งานพร้อมกัน ผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถบันทึกข้อมูลได้ครบถ้วน การแสดงผลเป็นไปอย่างถูกต้อง และไม่พบข้อผิดพลาดในการประมวลผลระหว่างการใช้งาน

4.1.3.3 ผลการเปรียบเทียบระบบเดิมกับระบบใหม่

ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบลักษณะการทำงานของระบบเดิมกับระบบเว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบระบบเดิมกับระบบใหม่

รายการ	ระบบเดิม	ระบบใหม่
การบันทึกการเข้าร่วมกิจกรรม	ลงชื่อในสมุดหรือเอกสาร	บันทึกผ่านเว็บแอปพลิเคชัน
การตรวจสอบคะแนนกิจกรรม	สอบถามจากเจ้าหน้าที่	ตรวจสอบได้ด้วยตนเองผ่านระบบ
การค้นหาข้อมูล	ค้นหาจากเอกสาร ใช้เวลานาน	ค้นหาได้ทันทีผ่านระบบ
การจัดทำรายงาน	จัดทำด้วยตนเอง	ระบบจัดทำรายงานอัตโนมัติ

จากการเปรียบเทียบพบว่า ระบบเว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นช่วยลดขั้นตอนการดำเนินงาน เพิ่มความสะดวกในการค้นหาและตรวจสอบข้อมูล รวมทั้งช่วยสนับสนุนการจัดทำรายงานได้อย่างเป็นระบบเมื่อเทียบกับวิธีการดำเนินงานเดิม

4.2 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ต่อประสิทธิภาพของระบบ

การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ต่อประสิทธิภาพของเว็บแอปพลิเคชันบันทึกการเข้าร่วมกิจกรรมนักศึกษา มหาวิทยาลัยพิษณุโลก ดำเนินการโดยใช้แบบสอบถามกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 104 คน ซึ่งประกอบด้วยนักศึกษาในแต่ละชั้นปีและอาจารย์ที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งการนำเสนอผลการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ตอน ได้แก่ (1) ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม และ (2) ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ

ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถามที่ใช้เว็บแอปพลิเคชันบันทึกการเข้าร่วมกิจกรรมนักศึกษา มหาวิทยาลัยพิษณุโลก โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าร้อยละ (Percentage) แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

สถานภาพ	จำนวน (คน)	ร้อยละ
นักศึกษาชั้นปีที่ 1	33	31.73
นักศึกษาชั้นปีที่ 2	20	19.23
นักศึกษาชั้นปีที่ 3	39	37.50
นักศึกษาชั้นปีที่ 4	10	9.62
อาจารย์ที่ปรึกษากิจกรรม	2	1.92
รวม	104	100.00

จากตารางที่ 1 พบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 3 จำนวน 39 คน คิดเป็นร้อยละ 34.88 รองลงมาเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 1 จำนวน 33 คน คิดเป็นร้อยละ 30.23 และนักศึกษาชั้นปีที่ 2 จำนวน 20 คน คิดเป็นร้อยละ 20.93 ตามลำดับ ขณะที่นักศึกษาชั้นปีที่ 4 มีจำนวน 10 คน คิดเป็นร้อยละ 12.40 และอาจารย์ที่ปรึกษากิจกรรมมีจำนวน 2 คน คิดเป็นร้อยละ 1.55 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 104 คน

ตอนที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้

ผลการวิเคราะห์ระดับความพึงพอใจของผู้ใช้ต่อเว็บแอปพลิเคชันบันทึกการเข้าร่วมกิจกรรมนักศึกษา มหาวิทยาลัยพิษณุโลก โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบ

รายการประเมิน	($\bar{x}$)	S.D.	ระดับความพึงพอใจ
1. ด้านความง่ายในการใช้งาน	4.20	0.58	มาก
2. ด้านความรวดเร็วของระบบ	4.15	0.62	มาก
3. ด้านความถูกต้องของข้อมูล	4.25	0.55	มาก
4. ด้านการเข้าถึงข้อมูล	4.18	0.60	มาก
5. ด้านความพึงพอใจโดยรวม	4.22	0.57	มาก
รวม	4.20	0.58	มาก

จากตารางที่ 2 พบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบโดยรวมอยู่ในระดับ มาก ($\bar{x} = 4.20$, S.D. = 0.58) โดยด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด คือ ด้านความถูกต้องของข้อมูล ($\bar{x} = 4.25$) รองลงมา คือ ด้านความพึงพอใจโดยรวม ($\bar{x} = 4.22$) และ ด้านความง่ายในการใช้งาน ($\bar{x} = 4.20$) ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์สะท้อนให้เห็นว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถจัดเก็บและแสดงผลข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อความถูกต้องของข้อมูลอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 4.25$) และเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลในระบบ นอกจากนี้ ความง่ายในการใช้งาน และการเข้าถึงข้อมูลยังอยู่ในระดับที่น่าพอใจ แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตอบสนองต่อผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อการใช้งานระบบในระดับมาก ในด้านความรวดเร็วของระบบ พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากเช่นกัน ($\bar{x} = 4.15$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถประมวลผลและแสดงผลข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานระบบได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดความล่าช้า

โดยสรุป ระบบเว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นสามารถสนับสนุนการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสร้างความพึงพอใจให้แก่ผู้ใช้งานในระดับมาก ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยเรื่อง การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษาในมหาวิทยาลัยพิษณุโลก มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษาในมหาวิทยาลัยพิษณุโลก และ (2) ประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ต่อประสิทธิภาพของระบบ

ผลการวิจัยพบว่า เว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้ตามขอบเขตที่กำหนด โดยรองรับการบันทึกข้อมูลกิจกรรม การจัดการข้อมูลกิจกรรม การตรวจสอบข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรม การแสดงผลข้อมูล และการจัดทำรายงานผ่านระบบออนไลน์ ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการพัฒนาระบบ นอกจากนี้ จากผลการเปรียบเทียบการดำเนินงานระหว่างระบบเดิมกับระบบที่พัฒนาขึ้น พบว่าระบบใหม่ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถบันทึก ค้นหา และตรวจสอบข้อมูลได้สะดวกยิ่งขึ้น รวมถึงสนับสนุนการจัดทำรายงานในรูปแบบอัตโนมัติ ทั้งนี้ ข้อค้นพบดังกล่าวอ้างอิงจากผลการพัฒนาและการทดสอบระบบ ไม่ได้อ้างอิงจากผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้เพียงอย่างเดียว

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานจำนวน 104 คน พบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบโดยรวมอยู่ในระดับมาก ($\bar{x} = 4.20$, S.D. = 0.58) โดยด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดคือ ด้านความถูกต้องของข้อมูล รองลงมาคือด้านความพึงพอใจโดยรวม และด้านความง่ายในการใช้งาน ตามลำดับ ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าผู้ใช้งานมีความคิดเห็นเชิงบวกต่อการใช้งานเว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัยพบว่า เว็บไซต์พลิเคชันที่พัฒนาขึ้นสามารถดำเนินงานได้ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยรองรับการบริหารจัดการข้อมูลกิจกรรมนักศึกษา การตรวจสอบข้อมูล และการจัดทำรายงานผ่านระบบออนไลน์ ซึ่งช่วยลดขั้นตอนการดำเนินงาน เพิ่มความสะดวกในการจัดเก็บและค้นคืนข้อมูล และสนับสนุนการบริหารจัดการข้อมูลให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น สอดคล้องกับแนวคิดของ โอภาส เอี่ยมสิริวงศ์ (2560) ที่อธิบายว่า ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการรวบรวม จัดเก็บ ประมวลผล และนำเสนอสารสนเทศ เพื่อสนับสนุนการดำเนินงานและการตัดสินใจขององค์กรอย่างเป็นระบบ

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานอยู่ในระดับมาก โดยเฉพาะด้านความถูกต้องของข้อมูล ซึ่งสะท้อนว่าผู้ใช้งานมีความเชื่อมั่นต่อการใช้งานระบบในด้านการจัดเก็บ การประมวลผล และการแสดงผลข้อมูลกิจกรรมนักศึกษา ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดแบบจำลองความสำเร็จของระบบสารสนเทศของ DeLone & McLean (2003) ที่ระบุว่า คุณภาพของระบบ (System quality) และคุณภาพของสารสนเทศ (Information quality) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้งานและความสำเร็จของระบบสารสนเทศ นอกจากนี้ ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ แสงเดือน และปรัชญนันท์ (2552) ที่พบว่า การพัฒนาระบบสารสนเทศแบบออนไลน์สำหรับงานฝ่ายพัฒนานักศึกษาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการข้อมูล ลดข้อจำกัดของระบบงานแบบเดิม และช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลได้สะดวกมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา งานวิจัยนี้มีความแตกต่างในด้านการพัฒนาเว็บไซต์พลิเคชันที่รวบรวมกระบวนการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษาไว้ภายในระบบเดียว ตั้งแต่การบันทึกข้อมูล การตรวจสอบข้อมูล การติดตามผลการเข้าร่วมกิจกรรม ไปจนถึงการจัดทำรายงาน ซึ่งช่วยลดการสลับใช้งานหลายเครื่องมือ และเพิ่มความสะดวกในการบริหารจัดการข้อมูลของผู้ใช้งานเมื่อเทียบกับระบบที่รองรับเฉพาะบางกระบวนการตามที่ปรากฏในงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ มนัสนันท์ (2560) ที่พัฒนาระบบสารสนเทศในรูปแบบเว็บไซต์พลิเคชัน พบว่า ระบบสารสนเทศสามารถช่วยลดขั้นตอนการปฏิบัติงาน เพิ่มความสะดวกในการจัดการข้อมูล และสนับสนุนการดำเนินงานของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ ความง่ายในการใช้งานและการเข้าถึงข้อมูลที่อยู่ในระดับมาก สะท้อนถึงการออกแบบระบบที่สอดคล้องกับหลักการด้านประสบการณ์ผู้ใช้ (User experience) ซึ่งมีผลต่อการยอมรับระบบของผู้ใช้งาน สอดคล้องกับแนวคิดของ Nielsen (1994) ที่เสนอว่า ความสามารถในการใช้งาน (Usability) เป็นองค์ประกอบสำคัญของคุณภาพระบบ โดยระบบที่ดีควรมีความง่ายต่อการเรียนรู้ มีประสิทธิภาพในการใช้งาน และช่วยให้ผู้ใช้สามารถดำเนินงานได้อย่างสะดวก รวมทั้ง

สอดคล้องกับแนวคิดของระบบสารสนเทศที่ดีควรมีความสะดวก รวดเร็ว และสามารถเข้าถึงได้ทุกที่ทุกเวลา

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าผู้ใช้งานจะมีความพึงพอใจต่อระบบในระดับมาก แต่ค่าความพึงพอใจด้านความเร็วของระบบมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าด้านอื่นเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดด้านเครือข่าย จำนวนผู้ใช้งานพร้อมกัน หรือประสิทธิภาพของแพลตฟอร์มที่ใช้พัฒนา ได้แก่ Google apps script และ Google sheets ซึ่งอาจมีข้อจำกัดด้านการประมวลผลเมื่อมีปริมาณข้อมูลเพิ่มขึ้น ดังนั้น ในการพัฒนาระบบในอนาคตควรพิจารณาปรับปรุงโครงสร้างฐานข้อมูล เปลี่ยนไปใช้ระบบจัดการฐานข้อมูลที่รองรับข้อมูลขนาดใหญ่ขึ้น หรือเพิ่มประสิทธิภาพด้านการประมวลผลเพื่อรองรับจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- กิตติยา อาษากิจ, และสุนิสา สำเร็จดี. (2559). ความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบสารสนเทศ วิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี สุรินทร์. *ราชวดีสาร วิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี สุรินทร์*, 6(1), 20–30.
- เนตรนภา แสงเชื้อพ้อ. (2564). การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบสารสนเทศเพื่อการบริหารจัดการองค์กร. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ*, 9(1), 85–96.
- มนัสนันท์ บุญปลาวงค์. (2560). การพัฒนาระบบสารสนเทศสหกิจศึกษา. *วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี*, 7(2), 96–116.
- พรทิพย์ คำแสน. (2563). การพัฒนาระบบสารสนเทศบนเว็บเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการข้อมูล. *วารสารวิจัยและพัฒนาระบบสารสนเทศ*, 6(2), 112–124.
- แสงเดือน แก้วประสม, และปรัชญนันท์ นิลสุข. (2552). การพัฒนาระบบสารสนเทศแบบออนไลน์ ฝ่ายพัฒนานักศึกษาของมหาวิทยาลัยธนบุรี. *วารสารเทคโนโลยีสารสนเทศ*, 5(1), 1–10.
- อติศ บำรุงชีพ. (2559). การบริหารจัดการระบบสารสนเทศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานขององค์กร. *วารสารศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา*, 27(3), 1–15.
- อุราเพ็ญ ยิ้มประเสริฐ, และรพีพร ตันจ้อย. (2558). ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการสำหรับการบริหารสถาบันอุดมศึกษาที่เป็นการศึกษาอิเล็กทรอนิกส์. *วารสารปัญญาภิวัฒน์*, 7(2), 253–260.
- โอภาส เอี่ยมสิริวงศ์. (2560). *ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการ*. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- อัญชลี พัฒนพันธ์ชัย, และผณิกา เชาวเหม. (2569). การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการกิจกรรมพัฒนานักศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. *Mahidol R2R e-Journal*, 13(1), 111–123. Doi:10.14456/jmu.2026.9



- DeLone, W. H., & McLean, E. R. (2003). The DeLone and McLean model of information systems success: A ten-year update. **Journal of Management Information Systems**, 19(4), 9–30. Doi:10.1080/07421222.2003.11045748
- Nielsen, J. (1994). **Usability engineering**. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann.



การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้ จากการสอนในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง APPLYING TEACHING-LEARNING-BASED OPTIMIZATION TO SOLVE THE VEHICLE ROUTING PROBLEM

นิติกร หลีชัย¹, สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ², กล้า วาริพิทักษ์^{1*}

Nitikorn Leechai¹, Saisampan Soonchareon², Kla Wareepitak^{1*}

^{1,3}คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

^{1,3}Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok,
Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

²Faculty of Engineering, Naresuan University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: kla.wa@rmutl.ac.th

วันที่เข้ารับ 13 มิถุนายน 2569

วันที่แก้ไขบทความ 30 กรกฎาคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ 4 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาแอปพลิเคชันโดยประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง และ 2) สืบหา รูปแบบการตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน สำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง โดยมุ่งหวังให้การแก้ไขปัญหานั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสม กระบวนการวิจัยเริ่มจากการพัฒนาแอปพลิเคชันที่ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง จากนั้นดำเนินการออกแบบการทดลองโดยใช้ชุดปัญหามาตรฐานจำนวน 5 ชุด ซึ่งครอบคลุมโจทย์ปัญหาตั้งแต่ขนาดเล็กพิเศษถึงขนาดใหญ่ กำหนดระดับปัจจัย 3 ระดับ และทำการทดลองซ้ำระดับละ 30 รอบ เพื่อนำผลลัพธ์มาวิเคราะห์ทางสถิติและกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการ ผลการวิจัยพบว่าแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นสามารถประยุกต์ใช้วิธีการดังกล่าวในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งได้ โดยใช้เวลาในการประมวลผลค้นหาเส้นทางขนส่งที่มีประสิทธิภาพได้ โดยใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่า 2 นาที โดยรูปแบบการตั้งค่าปัจจัยของโจทย์ขนาดเล็กพิเศษควรกำหนดจำนวนประชากรที่ 100 และจำนวนรอบการค้นหาซ้ำที่ 25 สำหรับโจทย์ปัญหาชุดข้อมูลอื่นควรกำหนดจำนวนประชากรที่ 25 จำนวนรอบการค้นหาซ้ำที่ 100 เพื่อให้ได้ผลเฉลยเฉลี่ยที่ดีที่สุด แสดงให้เห็นว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนสามารถแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง, วิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมบนพื้นฐานการสอนและการเรียนรู้, เมตาฮิวริสติกส์

Abstract

This study aimed to (1) develop an application employing the Teaching–Learning–Based Optimization (TLBO) algorithm to solve the Vehicle Routing Problem (VRP) and (2) determine appropriate TLBO parameter settings for different problem sizes to enhance solution efficiency. The application was first developed by integrating the TLBO algorithm for vehicle route optimization. Experiments were subsequently conducted using five benchmark instances ranging from extra-small to large. The experimental factors were evaluated at three levels, with 30 independent runs performed for each setting. The results were statistically analyzed to identify the most appropriate parameter configuration for each problem size. The results showed that the developed application successfully applied the TLBO algorithm to the VRP and identified efficient vehicle routes in less than two minutes. For the extra-small problem instance, a population size of 100 and 25 iterations constituted the most appropriate parameter configuration. For the remaining benchmark instances, a population size of 25 and 100 iterations yielded the lowest mean objective value. These findings demonstrate that the TLBO algorithm can effectively solve the VRP when its parameters are appropriately configured for the size of the problem.

Keywords: Vehicle routing problem, Teaching–learning–based optimization, Metaheuristics

1. บทนำ

ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง (Vehicle routing problem: VRP) เป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญที่บริษัทด้านโลจิสติกส์และการขนส่งต้องเผชิญในปัจจุบัน (Konstantakopoulos *et al.*, 2022) โดยปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งมีวัตถุประสงค์เพื่อจัดสรรลูกค้าให้แก่กลุ่มยานพาหนะประเภทเดียวกัน และกำหนดเส้นทางการเดินทางที่เหมาะสมสำหรับกลุ่มยานพาหนะ เพื่อส่งมอบสินค้าให้แก่ลูกค้าภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆ (Chakraa *et al.*, 2023) ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งสามารถพบได้ในหลากหลายบริบท ครอบคลุมตั้งแต่การขนส่งและกระจายสินค้า การขนส่งผู้โดยสาร ไปจนถึงการ

เก็บรวบรวมขยะจากจุดทิ้งขยะ (Mohammed *et al.*, 2017) การแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งจึงมักเกี่ยวข้องกับการมุ่งเน้นการออกแบบเส้นทางขนส่ง หรือเส้นทางเดินรถที่สั้นที่สุดจากสถานที่หนึ่งไปยังกลุ่มของสถานที่ต่างๆ ที่กระจายอยู่ตามภูมิศาสตร์ เช่น ที่ตั้งของลูกค้า เมือง มหาวิทยาลัย คลังสินค้า โรงเรียน ร้านค้า (Konstantakopoulos *et al.*, 2022) โดยการกำหนดเส้นทางจะต้องพิจารณาปัจจัยและข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจริงในการดำเนินงาน เช่น ช่วงเวลาส่งมอบสินค้า ความจุของยานพาหนะ จำนวนลูกค้า และระยะทางในการขนส่ง ซึ่งส่งผลให้การค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดมีความยากและซับซ้อน (Konstantakopoulos *et al.*, 2022)

ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งเป็นปัญหาที่มีความยากและซับซ้อนสูง โดยถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของปัญหาชนิด NP-Hard (Stamadianos *et al.*, 2024) ซึ่งต้องใช้ทรัพยากรในการคำนวณผลเพื่อแก้ไขปัญหาลง เนื่องจากจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้เพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตามขนาดของปัญหา ส่งผลให้การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมยากขึ้นอย่างมากเมื่อจำนวนเมืองหรือจุดส่งมอบเพิ่มขึ้น โดยแนวทางการแก้ไขปัญหการจัดเส้นทางขนส่งที่มักถูกประยุกต์ใช้ได้แก่ ได้แก่ วิธีการแบบแม่นยำ (Exact methods) ซึ่งสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ แต่ต้องใช้เวลาในการคำนวณสูง และอาจไม่เหมาะสมสำหรับปัญหขนาดใหญ และวิธีการแบบเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristic methods) ซึ่งสามารถหาคำตอบที่มีระดับคุณภาพสามารถยอมรับได้ ภายในระยะเวลาที่สั้นกว่าและมีความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้กับปัญหาที่ซับซ้อน (Valdez *et al.*, 2014) ตัวอย่างของวิธีการแบบเมตาฮิวริสติกส์ที่สามารถแก้ไขปัญหามีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น วิธีการดมกลิ่นของฉลาม (Shark smell optimization: SSO) (Wareepitak *et al.*, 2026) วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยผีเสื้อกลางคืนและเปลวไฟ (Moth-flame optimization: MFO) (Kuntasup *et al.*, 2025) ขั้นตอนวิธีหิ่งห้อย (Firefly algorithm: FA) (Thepphakorn & Pongcharoen, 2023) วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยหมาป่าสีเทา (Grey wolf optimizer: GWO) (Sooncharoen *et al.*, 2020) ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดบนพื้นฐานชีวภูมิศาสตร์ (Biogeography-based optimization: BBO) (Vitayasak & Pongcharoen, 2020) และขั้นตอนวิธีค้างคาว (Bat algorithm: BA) (Chansombat *et al.*, 2019) โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน (Teaching-learning-based optimization: TLBO) เพื่อแก้ไขปัญหในงานวิจัยเนื่องจากมีรายงานการวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าวิธีนี้ สามารถให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพ และในบางกรณีมีสมรรถนะเหนือกว่าวิธีการเมตาฮิวริสติกส์หลายวิธีในการแก้ปัญหาการขนส่ง ดังที่รายงานในงานวิจัยของ Sun *et al.* (2022) และ Trachanatzi *et al.* (2024)

วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนถูกนำเสนอโดย Rao *et al.* (2011) มีแนวคิดมาจากกระบวนการเรียนการสอนในห้องเรียน ซึ่งประกอบด้วยสองขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนการสอน (Teacher phase) และขั้นตอนการเรียนรู้ระหว่างผู้เรียน (Learner phase) วิธีการ

ดังกล่าวถูกออกแบบเพื่อใช้ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมในปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Rao *et al.*, 2011) โดยวิธีการดังกล่าวได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนหลากหลายรูปแบบอย่างแพร่หลาย แสดงได้ถึงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ดี (Rao, 2016) โดยสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพสูงและมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมในระยะเวลาที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเมตาฮิวริสติกส์อื่นๆ (Rao, 2016)

โดยจากการทบทวนวรรณกรรมในช่วงปี ค.ศ. 2022 ถึง ค.ศ. 2026 ในฐานข้อมูล Scopus พบว่ามีการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนเพื่อแก้ปัญหาเชิงการจัด (Combinatorial optimization problems) ในหลากหลายสาขา อาทิเช่น ปัญหาการวางแผนโครงการ (Lakkamraju *et al.*, 2026) ปัญหาการจัดวางและกำหนดขนาดที่เหมาะสมของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Mehroliya & Arya, 2024) ปัญหาการจัดสรรทรัพยากรและการเชื่อมต่อในเครือข่ายสื่อสารไร้สาย (Djihane *et al.*, 2026) ปัญหาการจัดวางตำแหน่งและกำหนดขนาดที่เหมาะสมในระบบพลังงาน (Krishnamurthy *et al.*, 2023) ปัญหาการจัดตารางการผลิต (Ullah *et al.*, 2024) และปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งที่ซับซ้อนในหลากหลายบริบท ได้แก่ ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม (Green vehicle routing problem) เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงและลดการปล่อยมลพิษ (Sun *et al.*, 2022) ปัญหาการจัดเส้นทางรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อลดต้นทุนการขนส่งและความล่าช้าในการให้บริการ (Zahedi *et al.*, 2023) ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่เลือกให้บริการเฉพาะลูกค้าที่มีความคุ้มค่าสูง เพื่อลดต้นทุนการขนส่งและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Trachanatzi *et al.*, 2024)

แม้ว่าจะมีการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ ในบริบทต่างๆ และมีรายงานการวิจัยถึงผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมา มักกำหนดค่าปัจจัยโดยอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้า หรือจากประสบการณ์ของผู้วิจัย ขณะที่การศึกษาเพื่อสืบหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนอย่างเป็นระบบยังมีค่อนข้างจำกัด และถึงแม้ว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน เป็นวิธีแก้ไขปัญหาก็อาจเพียงปัจจัยพื้นฐานเพียงสองปัจจัย ได้แก่ ขนาดประชากร (Population size) และจำนวนรอบการค้นหา (Iterations) แต่เพื่อให้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนมีประสิทธิภาพสูงสุดในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง จึงควรมีการศึกษาการตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมด้วยการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผลเชิงสถิติอย่างเป็นระบบ เช่นเดียวกับวิธีเมตาฮิวริสติกส์อื่น ๆ

ด้วยความซับซ้อนของปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง (Vehicle routing problem: VRP) และช่องว่างของงานวิจัยที่พบ บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

แบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง พร้อมทั้งศึกษาการตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) พัฒนาแอปพลิเคชันโดยประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง
- 2) สืบหารูปแบบการตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน สำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้เริ่มจากการรวบรวมข้อมูลของปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งและการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการแก้ไข้ปัญหา การพัฒนาเครื่องมือสำหรับการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนเพื่อแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง การสืบหา รูปแบบการตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน สำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง และการวิเคราะห์สรุปผลการวิจัย

3.1 การรวบรวมข้อมูลของปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง

ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง รวมถึงรูปแบบของปัญหา สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ข้อจำกัด (Constraints) และชุดข้อมูลมาตรฐาน (Benchmark dataset) ตลอดจนแนวคิดและหลักการของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนเพื่อนำมาเป็นพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลองและวิธีการแก้ปัญหา

3.1.1 โจทย์ปัญหาเทียบเคียงที่ใช้ในงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนเพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับแก้ไข้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งหลอดไฟจากโกดังสินค้าไปยังลูกค้าที่มีที่ตั้งกระจายอยู่ในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทย โดยใช้ชุดข้อมูลจากงานวิจัยของ (Niracha, 2024) จำนวน 5 ชุดข้อมูล ซึ่งในแต่ละชุดข้อมูลมีความแตกต่างกันในด้านจำนวนยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่ง จำนวนและที่ตั้งของลูกค้า รวมถึงปริมาณความต้องการสินค้า ยกตัวอย่างเช่น ชุดข้อมูล 01_C16V14_XS หมายความว่าในชุดข้อมูลนี้ ต้องส่งสินค้าให้กับลูกค้าที่มีตำแหน่งที่ตั้งแตกต่างกันทั้งหมด 16 ราย มีจำนวนยานพาหนะที่สามารถใช้งานได้จำนวน 14 คัน และชุดข้อมูลนี้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มชุดข้อมูลที่มีขนาดเล็กมาก (Extra small: XS)

ระบบการขนส่งถูกกำหนดให้สามารถขนส่งได้ด้วยยานพาหนะทั้งหมด 3 ประเภท ซึ่งมีความจุในการบรรทุกสินค้าแตกต่างกัน ได้แก่ รถประเภท A มีความจุ 3,600 หน่วย รถประเภท B มี



ความจุ 7,200 หน่วย และรถประเภท C มีความจุ 18,000 หน่วย (Niracha, 2024) ทั้งนี้สำหรับโดยรายละเอียดของ โจทย์ปัญหาแต่ละชุดข้อมูลแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของโจทย์ปัญหาเทียบเคียงในแต่ละชุดข้อมูลที่ถูกใช้ในงานวิจัย

ชื่อชุดข้อมูล	ขนาดของโจทย์ปัญหา	จำนวนลูกค้า	จำนวนสินค้าที่ต้องขนส่ง	จำนวนยานพาหนะทั้งหมดสำหรับการขนส่งสูงสุด
01_C16V14_XS	เล็กพิเศษ	16	102,000	14
02_C22V19_S	เล็ก	22	175,200	19
03_C29V26_M	กลาง	29	235,200	26
04_C34V31_L	ใหญ่	34	261,600	31
05_C46V38_XL	ใหญ่พิเศษ	46	399,600	38

วัตถุประสงค์ของการแก้ไขปัญหการจัดเส้นทางรถขนส่งในงานวิจัยนี้คือการค้นหาแบบแผนการจัดเส้นทางรถขนส่งที่มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่ำที่สุด โดยฟังก์ชันเป้าประสงค์แสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$\text{Minimize } \sum_{p=1}^P \sum_{i=0}^Q \sum_{j=0}^Q (Vc^p \cdot S_{ij} \cdot D_{ij}^p) + \sum_{p=1}^P E^p \quad (1)$$

เมื่อ Q คือ จำนวนลูกค้าทั้งหมด
 P คือ จำนวนประเภทยานพาหนะ
 i, j คือ ดัชนีลำดับที่ตั้งของลูกค้า
 p คือ ดัชนีลำดับของประเภทยานพาหนะ
 S_{ij} คือ ระยะทางระหว่างที่ตั้งของลูกค้ารายที่ i และ j
 Vc^p คือ ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยระยะทางเคลื่อนที่ของยานพาหนะประเภท p
 E^p คือ ค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับยานพาหนะประเภท p
 D_{ij}^p คือ ตัวแปรตัดสินใจหากยานพาหนะประเภท p เลือกขนส่งจากตำแหน่ง i ไปยังตำแหน่ง j

ข้อตกลงเบื้องต้น สำหรับปัญหการจัดเส้นทางรถขนส่งในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย
 1) มีสินค้าเพียงพอต่อการขนส่งเสมอ 2) ค่าใช้จ่ายในการขนส่งไม่แปรผันตามกาลเวลา 3) ไม่มีของเสียระหว่างกระบวนการขนส่ง 4) สินค้าถูกส่งมอบตรงเวลาให้กับลูกค้าเสมอ 5) ไม่มีอุปสรรคทางถนนระหว่างการเส้นทางขนส่ง 6) ในหนึ่งรอบการขนส่งยานพาหนะสามารถขนส่งสินค้าต่างประเภท

กันได้ โดยเส้นทางการขนส่งต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข คือ 1) ในหนึ่งรอบการขนส่งแต่ละภาชนะไม่สามารถขนส่งสินค้าได้เกินความจุของยานพาหนะ 2) พาหนะเริ่มต้นส่งสินค้าจากโกดังสินค้าและสิ้นสุดเส้นทางเมื่อกลับมายังโกดังสินค้าเท่านั้น 3) ลูกค้าแต่ละรายสามารถรับสินค้าได้จากยานพาหนะเพียง 1 คันเท่านั้น 4) ยานพาหนะแต่ละคันสามารถรับสินค้าได้เพียง 1 ครั้งเท่านั้น

3.1.2 วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน (Teaching-learning-based optimization: TLBO) เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากกระบวนการเรียนการสอนในห้องเรียน โดยมีแนวคิดที่ว่าคำตอบที่ดีนั้นเปรียบเสมือน “ครู” และคำตอบอื่น ๆ ในประชากรค้นหาคำตอบเปรียบเสมือน “นักเรียน” โดยกระบวนการหาคำตอบของ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน เริ่มจากการกำหนดจำนวนประชากร (P_n) และจำนวนรอบของการค้นหา (G_n) จากนั้นสร้างกลุ่มประชากรเริ่มต้น (X_i) ตามจำนวนประชากรสูงสุด และการปรับปรุงคำตอบ 2 ระยะ ได้แก่ ระยะการสอน (Teacher phase) และระยะการเรียนรู้ (Learner phase) โดยในระยะการสอน คำตอบที่ดีที่สุดจะถูกใช้ในการปรับปรุงคำตอบอื่น ๆ เพื่อให้ค่าเฉลี่ยของคำตอบทั้งหมดดีขึ้นด้วยสมการที่ (2) ส่วนในระยะการเรียนรู้ แต่ละคำตอบจะมีการปรับปรุงตนเองผ่านการเปรียบเทียบและเรียนรู้จากคำตอบอื่นในกลุ่มประชากรแบบสุ่ม ด้วยสมการที่ (3) หรือสมการที่ (4) ทั้งนี้ที่ถูกปรับปรุงจะถูกประเมินด้วยฟังก์ชันเป้าประสงค์สมการที่ (1) ทั้งนี้คำตอบเดิมจะถูกแทนที่หากคำตอบที่ปรับปรุงนั้นดีกว่าเดิม กระบวนการทั้งสองระยะนี้จะถูกดำเนินการซ้ำจนกว่าจะสิ้นสุดตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ (Rao *et al.*, 2011)

$$X_{new} = X_{old} + r(X_{teacher} - (T_F)Mean) \quad (2)$$

$$X_{new} = X_{old} + r(X_i - X_j) \quad (3)$$

$$X_{new} = X_{old} + r(X_j - X_i) \quad (4)$$

เมื่อ X_{new} คือ คำตอบใหม่ที่ถูกปรับปรุง

X_{old} คือ คำตอบเดิมก่อนการปรับปรุง

r คือ เลขสุ่มที่ค่าระหว่าง 0 ถึง 1

T_F คือ เลขสุ่มที่ค่าเป็นได้ 1 หรือ 2

$X_{Teacher}$ คือ คำตอบที่มีผลเฉลยที่ดีที่สุดในรอบการค้นหา

X_i คือ คำตอบที่ถูกสุ่มเลือกคำตอบที่ 1

X_j คือ คำตอบที่ถูกสุ่มเลือกคำตอบที่ 2

3.2 การพัฒนาเครื่องมือสำหรับการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง

Visual basic for applications (VBA) เป็นภาษาโปรแกรมที่พัฒนาโดยบริษัท Microsoft สำหรับการสร้างและปรับแต่งระบบอัตโนมัติ (Automation) ภายในโปรแกรม Microsoft office เช่น Microsoft excel, Microsoft word เป็นต้น โดยสามารถใช้พัฒนาโปรแกรม ฟังก์ชัน และส่วนติดต่อผู้ใช้ (User interface) เพื่อสนับสนุนการประมวลผลข้อมูลและการแก้ปัญหาเฉพาะด้าน (Roy *et al.*, 2019) โดย Visual basic for applications ซึ่งเป็นหนึ่งในภาษาทางคอมพิวเตอร์ที่สามารถสร้างเครื่องมือ หรือแอปพลิเคชันแก้ไขปัญหามีความซับซ้อนได้สำเร็จ ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Sooncharoen *et al.* (2020) และ Wareepitak *et al.* (2026)

งานวิจัยนี้พัฒนาโปรแกรมประยุกต์ด้วยภาษา Visual basic for applications (VBA) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง โดยฝังกลไกการค้นหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน สำหรับค้นหาผลเฉลยที่เหมาะสมของปัญหา โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถรับข้อมูลนำเข้า ได้แก่ ข้อมูลลูกค้า ตำแหน่งที่ตั้ง ความต้องการสินค้า และข้อจำกัดของยานพาหนะ ก่อนนำข้อมูลเข้าสู่กระบวนการของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน เพื่อค้นหาเส้นทางขนส่งที่ให้ต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุดตามเงื่อนไขของปัญหา ทั้งนี้ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่สร้างขึ้นสำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งของงานวิจัย แสดงได้ดังรหัสเทียมของวิธีการแก้ปัญหาดังรูปที่ 1 ทั้งนี้ ขั้นตอนการเข้ารหัส ถอดรหัส ตลอดจนวิธีการจัดการข้อจำกัดของปัญหาแสดงได้ดังรูปที่ 2

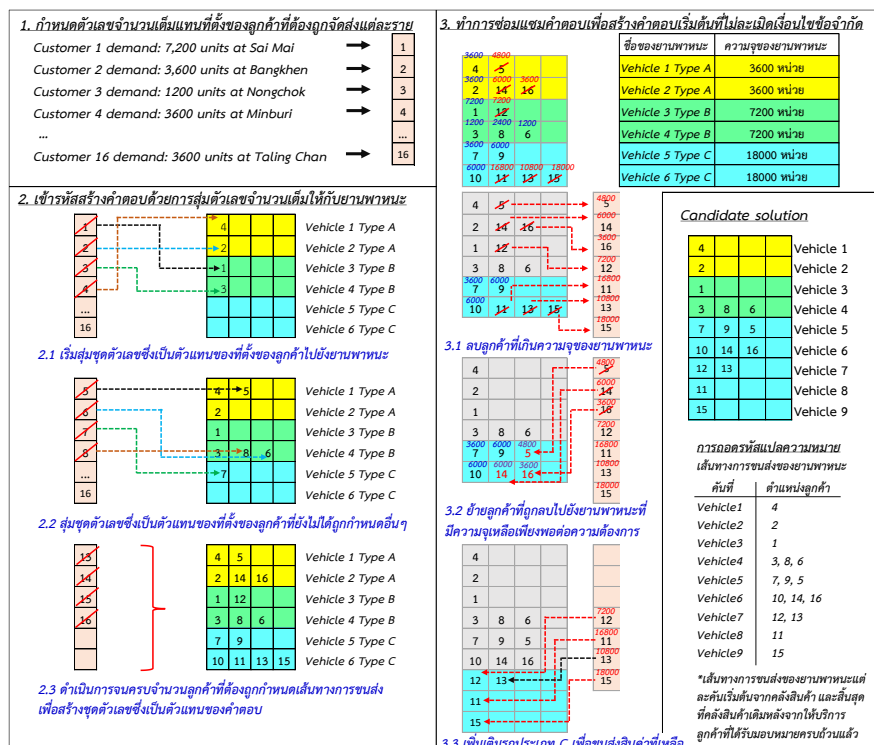
3.3 การสืบทอดรูปแบบการตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง

กระบวนการสืบทอดรูปแบบการตั้งค่าปัจจัยเริ่มจาก การออกแบบการทดลองโดยกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของวิธีการแก้ปัญหา โดยกำหนดระดับของปัจจัยออกเป็น 3 ระดับ เพื่อให้ครอบคลุมจำนวนประชากรในระดับต่ำ ปานกลาง และสูง ขณะที่จำนวนรอบการค้นหาลูกถูกปรับให้ผลคูณของจำนวนประชากรและจำนวนรอบการค้นหามีค่าเท่ากันที่ 2,500 คำตอบ ทั้ง 3 กลุ่มประชากร เพื่อเป็นการควบคุมปริมาณการค้นหาให้เท่ากันในทุกชุดการทดลอง ทำให้สามารถเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้อย่างเป็นธรรม ทั้งนี้โดยแต่ละระดับปัจจัยถูกทำการทดลองซ้ำ 30 การทดลอง เพื่อให้มีข้อมูลเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์และสรุปผลทางสถิติ โดยระดับปัจจัยและข้อมูลที่เกี่ยวข้องแสดงได้ดังตารางที่ 2 ทั้งนี้การทดลองจะถูกดำเนินการโดยใช้ข้อมูลจากปัญหาเทียบเคียงจำนวน 5 ชุดข้อมูล ก่อนนำผลการทดลองที่ได้วิเคราะห์รูปแบบการตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมด้วยการวิเคราะห์ผลทางสถิติ และการวิเคราะห์กราฟผลกระทบหลัก (Main effects plot) เพื่อสรุปผล

```

Begin
Input Parameters; Iteration, Population, Dataset
Solution encoding and Initialize population ()
Repair solution based on problems constraints
Evaluate fitness of each solution based on eq. (1)
Sort and rank the solution
For each iteration do
// Teacher Phase
Select best solution as Teacher
Calculate different mean of population
For each solution  $X_i$  do
Update  $X_i$  based on Teacher and Mean based on eq. (2)
Repair solution based on problems constraints
Evaluate fitness of the new solution based on eq. (1)
If new solution is better  $\rightarrow$  replace  $X_i$ 
End For
// Learner Phase
For each solution  $X_i$  do
Randomly select  $X_j$  ( $i \neq j$ )
If  $X_i$  better than  $X_j$  then
Update  $X_i$  based on Teacher and Mean based on eq. (3)
Else
Update  $X_i$  based on Teacher and Mean based on eq. (4)
End If
Repair solution based on problems constraints
Evaluate new solution based on eq. (1)
If new solution is better  $\rightarrow$  replace  $X_i$ 
End For
End For
Output best solution (optimal route)
End
  
```

รูปที่ 1 รหัสเทียมของโปรแกรมสำหรับการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนแก้ไขปัญหการจัดเส้นทางขนส่ง



รูปที่ 2 ขั้นตอนการเข้ารหัสและการถอดรหัสคำตอบสำหรับการสร้างเส้นทางขนส่ง

ตารางที่ 2 ปัจจัยและการแบ่งระดับปัจจัยสำหรับการทดลอง

ระดับปัจจัย	จำนวนประชากร	จำนวนรอบการค้นหาค่า	จำนวนการทดลอง	จำนวนคำตอบ
1	25 (ระดับต่ำ)	100	30 การทดลอง	2,500
2	50 (ระดับกลาง)	50	30 การทดลอง	2,500
3	100 (ระดับสูง)	25	30 การทดลอง	2,500

4. ผลการทดลอง

การทดลองเพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้ ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะด้วยปัญหาเทียบเคียงทั้งหมด 5 ชุดข้อมูล ได้ดำเนินการภายใต้เงื่อนไขการตั้งค่าจำนวนประชากร และจำนวนรอบการค้นหาค่า ที่เท่ากันที่จำนวน 2,500 คำตอบ โดยมีระดับปัจจัยแตกต่างกัน 3 ระดับ และได้มีการกำหนดค่าสุ่ม (Seed number) ที่แตกต่างกัน 30 ค่า เพื่อทำการทดลองซ้ำจำนวน 30 ครั้ง โดยโปรแกรมประยุกต์แก้ปัญหาถูกเขียนขึ้นด้วยภาษา Visual Basic for Application ซึ่งถูกประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Laptop) ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง Intel 11th Gen Core i9-11900 H, 2.5 GHz หน่วยความจำหลัก (Ram) 32 GB ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 11 โดยผลการทดลองที่ได้แสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลเฉลยตามการประเมินด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) โดยมีผลเฉลยในรูปแบบของค่าใช้จ่ายในการขนส่งรวม ซึ่งถูกแก้ไขด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน ภายใต้การกำหนดค่าปัจจัยจำนวนประชากร (P_n) และจำนวนรอบของการค้นหาค่า (G_n) ที่ 3 ระดับปัจจัย ได้แก่ 25×100 , 50×50 และ 100×25 ทั้ง 5 ชุดข้อมูล โดยผลการหาค่าตอบถูกรายงานในรูปแบบ ค่าเฉลี่ยของค่าใช้จ่ายในการขนส่งรวม (Average) ค่าใช้จ่ายในการขนส่งรวมที่ต่ำที่สุด (Minimum) ค่าใช้จ่ายในการขนส่งรวมที่สูงที่สุด (Maximum) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) โดยเมื่อพิจารณาพบว่า โจทย์ปัญหาเทียบเคียงทั้ง 5 ชุดข้อมูล ภายใต้การกำหนดค่าปัจจัยที่แตกต่างกันทั้ง 3 ระดับ ให้ผลเฉลยที่แตกต่างกันในทุกตัวชี้วัด

จากการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Probability plot) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของข้อมูลทั้ง 5 ชุดข้อมูล ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติสำเร็จรูป พบว่า ข้อมูลของโจทย์ปัญหา 01_C16V14_XS และชุดข้อมูล 02_C22V19_S มีการแจกแจงแบบไม่ปกติ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ขณะที่ข้อมูลชุด 03_C29V26_M, 04_C34V31_L และ 05_C46V38_XL มีการแจกแจงแบบปกติ เนื่องจากมีค่า P-value มากกว่า 0.05 จากผลดังกล่าวเนื่องจากข้อมูลบางชุดมีการแจกแจงแบบไม่ปกติ จึงไม่เป็นไปตามข้อกำหนดเบื้องต้นของการวิเคราะห์ทางสถิติแบบพารามิเตอร์ (Parametric statistics) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้การวิเคราะห์แบบไม่อาศัยพารามิเตอร์ (Non-parametric statistics) ด้วยวิธี Kruskal–Wallis test เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการตั้งค่า

ปัจจัยที่แตกต่างกัน 3 ระดับที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ นำไปสู่วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนสำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทาง การขนส่ง โดยผลการทดสอบด้วยวิธี Kruskal-Wallis test แสดงได้ดังตารางที่ 4

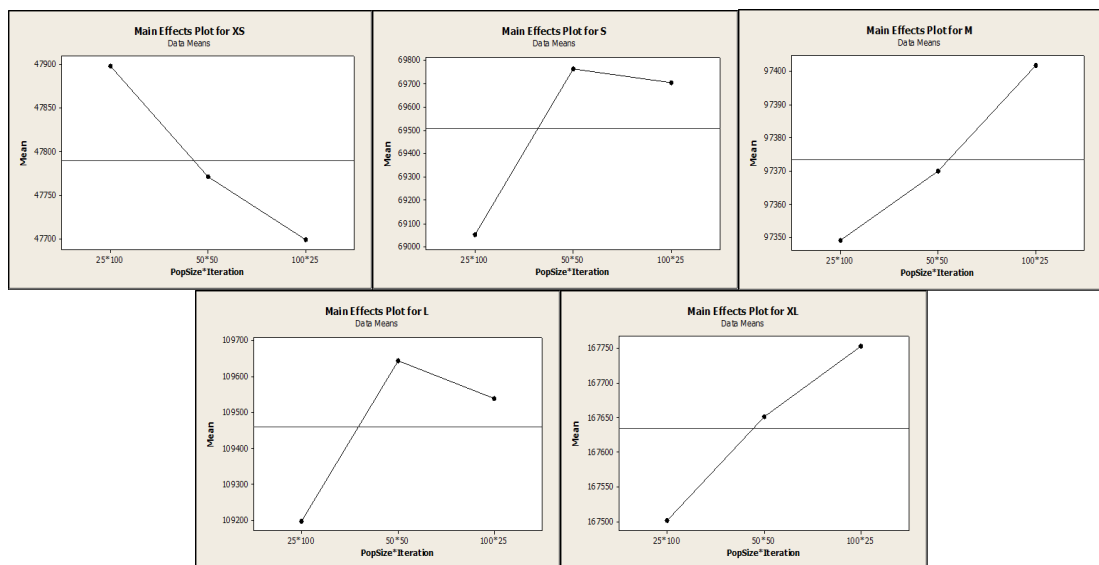
ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบค่าคำตอบจากการกำหนดจำนวนประชากร (P_n) และจำนวนรอบของ การค้นหาซ้ำ (G_n) สำหรับโจทย์ปัญหาทั้ง 5 ชุดข้อมูล

โจทย์ปัญหา	$P_n * G_n$	Total transportation cost (Bath)			SD	Time (sec.)
		Average	Minimum	Maximum		
01_C16V14_XS	25*100	47897.64	46733.78	48913.82	563.89	5.22
	50*50	47771.52	46553.02	48554.09	480.12	7.35
	100*25	47699.33	46205.29	48448.33	571.96	11.00
02_C22V19_S	25*100	69052.38	67772.31	70463.87	587.96	9.62
	50*50	69765.99	68565.61	70927.62	482.24	12.79
	100*25	69704.81	68402.90	70943.78	577.40	21.46
03_C29V26_M	25*100	97349.18	95545.32	98514.74	652.06	18.08
	50*50	97369.99	96031.32	98365.89	644.28	25.35
	100*25	97401.67	96045.82	98498.10	738.43	35.58
04_C34V31_L	25*100	109197.48	107780.30	110827.79	888.93	26.61
	50*50	109645.07	108185.98	110566.50	690.62	40.52
	100*25	109539.27	107088.34	111430.64	905.40	49.14
05_C46V38_XL	25*100	167501.82	165118.68	168937.47	1027.04	73.49
	50*50	167651.49	165426.84	169212.07	960.42	92.81
	100*25	167752.22	165960.68	169920.64	915.73	109.20

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยจำนวนประชากร (P_n) และจำนวนรอบของการค้นหาซ้ำ (G_n) ต่อค่าคำตอบเฉลี่ยด้วยวิธี Kruskal-Wallis test ของโจทย์ปัญหาทั้ง 5 ชุดข้อมูล

โจทย์ปัญหา	H	DF	P-Value	การแปลผล
01_C16V14_XS	1.80	2	0.407	ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ
02_C22V19_S	23.04	2	0.000	มีผลอย่างมีนัยสำคัญ
03_C29V26_M	0.03	2	0.987	ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ
04_C34V31_L	4.35	2	0.113	ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ
05_C46V38_XL	0.39	2	0.824	ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ

จากตารางที่ 4 พบว่า การกำหนดจำนวนประชากร (P_n) และจำนวนรอบของการค้นหาซ้ำ (G_n) ในระดับที่แตกต่างกัน มีอิทธิพลต่อผลเฉลี่ยเฉลี่ยของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนเฉพาะในโจทย์ปัญหาเทียบเคียงชุดข้อมูล 02_C22V19_S เท่านั้น โดยมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่าปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อผลลัพธ์ของวิธีการอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับในชุดข้อมูลอื่น ๆ พบว่า จำนวนประชากร (P_n) และจำนวนรอบของการค้นหาซ้ำ (G_n) ทั้ง 3 ระดับ ไม่มีผลต่อค่าคำตอบเฉลี่ยของวิธีการดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยมีค่า P-value มากกว่า 0.05 อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์พบว่า การกำหนดค่าปัจจัยดังกล่าวไม่มีอิทธิพลต่อผลเฉลี่ยเฉลี่ย แต่เพื่อสืบทอดรูปแบบการตั้งค่าที่ให้ผลเฉลี่ยเฉลี่ยที่ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์กราฟอิทธิพลหลัก (Main effects plot) เพื่อพิจารณาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลเฉลี่ยเฉลี่ยในแต่ละระดับของปัจจัย และกำหนดรูปแบบการตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสม โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟอิทธิพลหลัก (Main effects plot) จำนวนประชากร (P_n) และจำนวนรอบของการค้นหาซ้ำ (G_n) ต่อค่าคำตอบเฉลี่ยของโจทย์ปัญหาทั้ง 5 ชุดข้อมูล

จากรูปที่ 3 พบว่ารูปแบบการตั้งค่าที่ให้ผลเฉลี่ยเฉลี่ยต่ำที่สุดสำหรับโจทย์ปัญหา 01_C16V14_XS คือ การตั้งค่าจำนวนประชากร (P_n) เท่ากับ 100 และจำนวนรอบของการค้นหาซ้ำ (G_n) เท่ากับ 25 ซึ่งแตกต่างจากโจทย์ปัญหา 02_C22V19_S, 03_C29V26_M, 04_C34V31_L และ 05_C46V38_XL ที่ต้องพบว่าการกำหนดจำนวนประชากร (P_n) เท่ากับ 25 และจำนวนรอบของการค้นหาซ้ำ (G_n) เท่ากับ 100 ให้ผลเฉลี่ยเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด



อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์หาค่าเหมาะที่สุดของปัจจัยจากตารางที่ 4 พบว่า สำหรับ โจทย์ปัญหา 01_C16V14_XS, 03_C29V26_M, 04_C34V31_L และ 05_C46V38_XL การเปลี่ยนแปลงค่าของจำนวนประชากร (P_n) และจำนวนรอบของการค้นหา (G_n) ไม่มีผลต่อค่าคำตอบเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้น เพื่อยืนยันรูปแบบการตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการเปรียบเทียบผลเฉลยแบบรายคู่ระหว่างการตั้งค่าทั้ง 3 ระดับเพิ่มเติม เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจเลือกรูปแบบการตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุดต่อไป โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ (Pairwise comparison) ของการรูปแบบการตั้งค่าทั้ง 3 ระดับ

โจทย์ปัญหา	ค่า P-Value คู่เทียบ ($P_n * G_n$)			การแปลผลคู่เทียบรูปแบบการตั้งค่า จำนวนประชากร และจำนวนรอบของการ ค้นหา $P_n * G_n$
	25*100 เทียบ 50*50	25*100 เทียบ 100*25	50*50 เทียบ 100*25	
01_C16V14_XS	0.261	0.258	0.701	ที่รูปแบบการตั้งค่าปัจจัย 25*100, 50*50, 100*25 ให้ผลเฉลยเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน
02_C22V19_S	0.000	0.000	0.564	ที่รูปแบบการตั้งค่าปัจจัย 25*100 ให้ผลเฉลยเฉลี่ยแตกต่างจาก 50*50, 100*25 แต่ปัจจัย 50*50 และ 100*25 ให้ผลเฉลยเฉลี่ยไม่ต่างกัน
03_C29V26_M	0.842	0.971	0.853	ที่รูปแบบการตั้งค่าปัจจัย 25*100, 50*50, 100*25 ให้ผลเฉลยเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน
04_C34V31_L	0.047	0.134	0.631	ที่รูปแบบการตั้งค่าปัจจัย 25*100 และ 50*50 ให้ผลเฉลยแตกต่างกัน แต่ที่รูปแบบการตั้งค่าปัจจัย 25*100, 100*25 และ ปัจจัย 50*50, 100*25 ให้ผลเฉลยเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน
05_C46V38_XL	0.785	0.569	1.000	ที่รูปแบบการตั้งค่าปัจจัย 25*100, 50*50, 100*25 ให้ผลเฉลยเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน

จากตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของผลเฉลยเฉลี่ยที่ได้จากการหาคำตอบด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน ที่มีรูปแบบการตั้งค่าปัจจัยแตกต่างกัน 3 รูปแบบ โดยวิเคราะห์แยกเป็นแบบรายคู่ (Pairwise comparison) ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติสำเร็จรูป ทั้งนี้ เนื่องจากการกระจายตัวของชุดข้อมูลบางชุดข้อมูลเป็นไม่เป็นแบบ

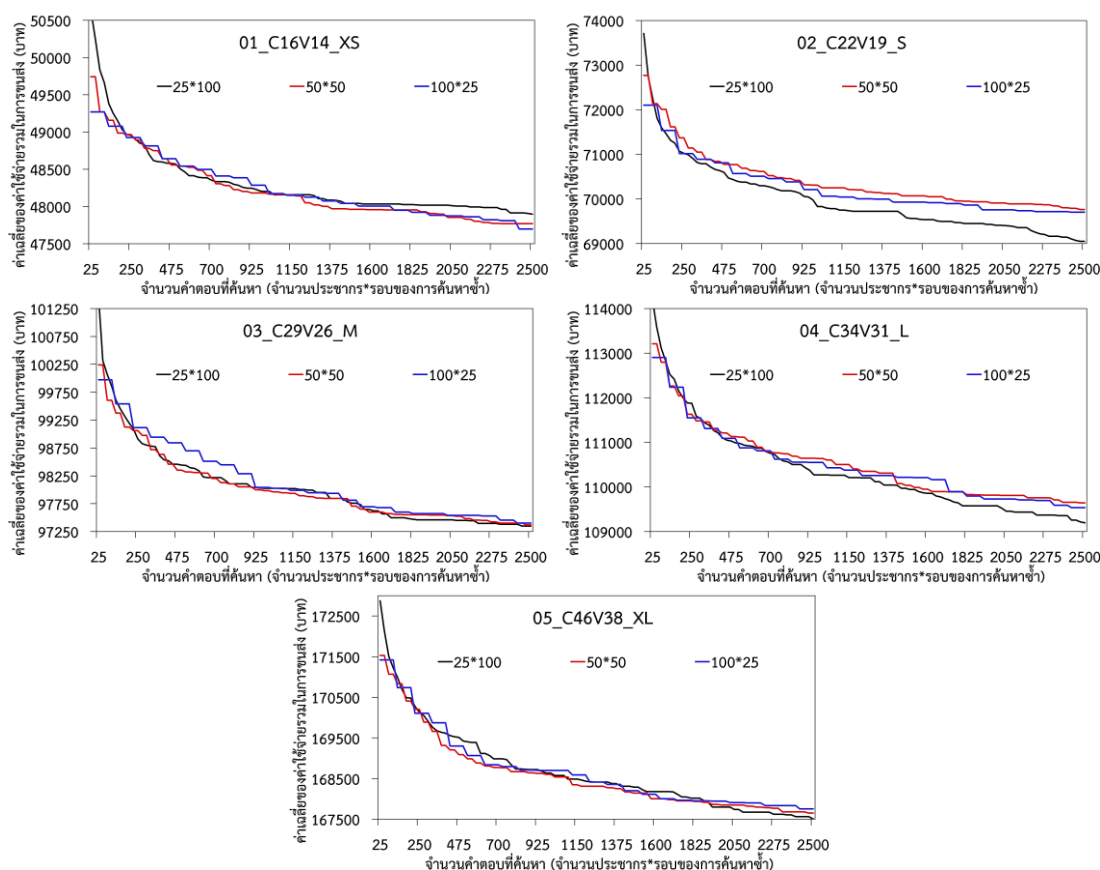
ปกติ ดังนั้น การทดสอบการเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ของผลเฉลี่ยเฉลี่ย จึงถูกทดสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบไม่อาศัยพารามิเตอร์ ด้วยวิธี Mann-Whitney U test โดยเมื่อพิจารณาผลการทดสอบจะพบว่า สำหรับโจทย์ปัญหาเทียบเคียงชุดข้อมูล 01_C16V14_XS, 03_C29V26_M และ 05_C46V38_XL มีค่า P-value ของการเปรียบเทียบผลเฉลี่ยเฉลี่ยรายคู่ระหว่างรูปแบบการตั้งค่าจำนวนประชากร และจำนวนรอบของการค้นหาซ้ำ ($P_n * G_n$) มากกว่า 0.05 ในทุกคู่เทียบ แสดงว่ารูปแบบการตั้งค่าปัจจัยที่ถูกทดลองทั้ง 3 แบบนั้นให้ผลเฉลี่ยเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 4 ดังนั้น โจทย์ปัญหาเทียบเคียงชุดข้อมูลดังกล่าวสามารถตั้งค่าปัจจัยได้ทั้ง 3 ระดับ

ทั้งนี้สำหรับโจทย์ปัญหาชุดข้อมูล 02_C22V19_S พบว่าค่า P-value ของปัจจัยคู่เทียบที่ได้จากรูปแบบการตั้งค่าจำนวนประชากร และจำนวนรอบของการค้นหาซ้ำ ($P_n * G_n$) ที่ $25*100$ เทียบกับ $50*50$ และ $25*100$ เทียบกับ $100*25$ มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ารูปแบบการตั้งค่าปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อค่าผลเฉลี่ยเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาที่คู่เทียบผลเฉลี่ยเฉลี่ยที่ได้จากการตั้งค่าปัจจัยที่ $50*50$ เทียบกับ $100*25$ จะพบว่าการตั้งค่าทั้งสองแบบนี้ให้ผลเฉลี่ยเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นรูปแบบการตั้งค่าปัจจัยในกรณีของชุดข้อมูลดังกล่าวควรตั้งค่ายึดตามการแปลผลที่ได้จากผลการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main effects plot) ซึ่งต้องกำหนด จำนวนประชากรเท่ากับ 25 และจำนวนรอบของการค้นหาซ้ำเท่ากับ 100 ถึงจะให้ผลเฉลี่ยเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด

ส่วนโจทย์ปัญหาเทียบเคียงชุดข้อมูล 04_C34V31_L พบว่า รูปแบบการตั้งค่าจำนวนประชากร และจำนวนรอบของการค้นหาซ้ำ ($P_n * G_n$) ที่ $25*100$ เทียบกับ $50*50$ ให้ผลเฉลี่ยเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.047 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ขณะที่การตั้งค่าจำนวนประชากร และจำนวนรอบของการค้นหาซ้ำ ($P_n * G_n$) ที่ $25*100$ เทียบกับ $100*25$ และที่คู่เทียบ $50*50$ เทียบกับ $100*25$ ให้ผลเฉลี่ยเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นการตั้งค่าปัจจัยสามารถกำหนดได้ทั้งรูปแบบ $25*100$ และรูปแบบ $100*25$ โดยสรุปรูปแบบการตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน การตั้งค่าปัจจัยที่ให้ค่าเฉลี่ยค่าใช้จ่ายในการขนส่งรวมต่ำที่สุด ค่าผลเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในการแก้ไขปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง แสดงได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การตั้งค่าปัจจัยจำนวนประชากร และจำนวนรอบของการค้นหาซ้ำ ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนสำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถขนส่ง

โจทย์ปัญหา	ปัจจัยที่เหมาะสม ($P_n * G_n$)	ค่าเฉลี่ยผลเฉลยที่ต่ำที่สุด (บาท)	ค่าผลเฉลยที่ต่ำที่สุด (บาท)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
01_C16V14	25*100, 50*50 , <u>100*25</u>	47699.33	46205.29	571.96
02_C22V19	<u>25*100</u>	69052.38	67772.31	587.96
03_C29V26	<u>25*100</u> , 50*50 ,100*25	97349.18	95545.32	652.06
04_C34V31	<u>25*100</u> , 100*25	109197.48	107780.30	888.93
05_C46V38	<u>25*100</u> , 50*50 ,100*25	167501.82	165118.68	1027.04
* ปัจจัยที่ขีดเส้นใต้หมายถึงปัจจัยที่ให้ค่าเฉลี่ยผลเฉลยที่ต่ำที่สุด (บาท)				



รูปที่ 4 แผนภาพการลู่เข้าของผลเฉลย (Convergence graph) เมื่อจำนวนรอบการค้นหาเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4 แผนภาพการลู่เข้าของคำตอบของผลเฉลยเฉลี่ยที่ได้จากรูปแบบการตั้งค่าปัจจัยทั้ง 3 รูปแบบ โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยผลเฉลยเมื่อจำนวนคำตอบที่ถูกค้นหาสะสมได้เพิ่มขึ้น โดยพบว่ารูปแบบการลู่เข้าของผลเฉลยเฉลี่ยของการตั้งค่าปัจจัยทั้ง 3 รูปแบบ มีลักษณะเป็นไปใน

ทิศทางเดียวกัน โดยในช่วงเริ่มต้นของการค้นหา รูปแบบการตั้งค่าปัจจัยที่ 100×25 ให้ผลเฉลยเฉลี่ยต่ำที่สุด รองลงมาคือ 50×50 และ 25×100 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อจำนวนรอบการค้นหาเพิ่มขึ้น เส้นโค้งการลู่เข้าของทั้งสามรูปแบบมีแนวโน้มลดลงในลักษณะเดียวกัน แต่เมื่อสังเกตจะพบว่า การตั้งค่าปัจจัยในรูปแบบ 25×100 มีอัตราการลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่รวดเร็วกว่าการตั้งค่าอื่น ส่งผลให้ในช่วงท้ายของการค้นหารูปแบบการตั้งค่าดังกล่าวให้ผลเฉลยเฉลี่ยต่ำที่สุดในโจทย์ปัญหาขนาดเล็ก กลาง ใหญ่ และใหญ่พิเศษ ทั้งนี้สำหรับโจทย์ปัญหาเทียบเคียงชุดข้อมูล 01_C16V14_XS ซึ่งเป็นโจทย์ปัญหาขนาดเล็กพิเศษ พบว่าการตั้งค่า 100×25 ยังคงให้ผลเฉลยเฉลี่ยต่ำที่สุดเมื่อสิ้นสุดการค้นหา

5. อภิปรายผลและสรุปผล

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อได้พัฒนาแอปพลิเคชันโดยประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน (Teaching-learning-based optimization: TLBO) สำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง พร้อมทั้งสืบหารูปแบบการตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการแก้ไขปัญห สำหรับแก้ไขปัญหการจัดเส้นทางขนส่ง

ผลการวิจัยพบว่า สามารถพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับแก้ปัญหการจัดเส้นทางขนส่งด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน ได้สำเร็จ โดยแอปพลิเคชันสามารถประมวลผลและค้นหาผลเฉลยของโจทย์ปัญหาเทียบเคียงทั้ง 5 ชุดข้อมูลได้ ผลการศึกษาการตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อการใช้งาน พบว่าโจทย์ปัญหาเทียบเคียงชุดข้อมูล 01_C16V14_XS, 03_C29V26_M, 05_C46V38_XL มีรูปแบบการตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมสามารถกำหนดได้ที่ จำนวนประชากร และจำนวนรอบของการค้นหา ($P_n * G_n$) ที่ 25×100 , 50×50 หรือ 100×25 สำหรับโจทย์ปัญหา 02_C22V19_S ควรตั้งจำนวนประชากร และจำนวนรอบของการค้นหา ($P_n * G_n$) ที่ 25×100 สำหรับโจทย์ปัญหา 04_C34V31_L ควรตั้งจำนวนประชากร และจำนวนรอบของการค้นหา ($P_n * G_n$) ที่ 25×100 หรือ 100×25 อย่างไรก็ตาม แม้ว่าผลการวิเคราะห์ทางสถิติจะพบว่า รูปแบบการตั้งค่าปัจจัยบางรูปแบบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในบางชุดข้อมูล แต่ในเชิงการนำไปประยุกต์ใช้งาน ควรเลือกรูปแบบการตั้งค่าที่ให้ผลเฉลยเฉลี่ยต่ำที่สุดสำหรับลักษณะของโจทย์ปัญหานั้น ๆ โดยสำหรับชุดข้อมูล 01_C16V14_XS ซึ่งเป็นโจทย์ปัญหาขนาดเล็กพิเศษ การตั้งค่าปัจจัยที่ 100×25 นั้นให้ผลเฉลยเฉลี่ยต่ำที่สุด ขณะที่โจทย์ปัญหาที่มีขนาดอื่นๆ ที่ใหญ่กว่าควรตั้งค่าปัจจัยที่ระดับ 25×100 ซึ่งให้ผลเฉลยเฉลี่ยดีที่สุด

ผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าชุดข้อมูล 01_C16V14_XS ซึ่งเป็นโจทย์ปัญหาขนาดเล็กพิเศษนั้นมีพื้นที่การค้นหาค่าตอบ (Search space) อย่างจำกัดเมื่อเทียบกับชุดข้อมูลอื่นๆ การกำหนดจำนวนประชากร (Population size) ให้เท่ากับ 100 ซึ่งมีขนาดใหญ่ตั้งแต่เริ่มต้นเป็นการเปิดโอกาสให้เกิดการใช้ทรัพยากรในการคำนวณจำนวนมาก ในแต่ละรอบการค้นหาซ้ำ (Iteration)

ซึ่งได้เพิ่มความหลากหลายของคำตอบในกระบวนการสร้างคำตอบเริ่มต้น (Initialization) และทำให้การค้นหาคำตอบแบบการสำรวจพื้นที่ (Exploration) ทำได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้สามารถค้นพบผลเฉลยที่มีคุณภาพได้ตั้งแต่ช่วงต้นของการค้นหา นำไปสู่การพัฒนาคำตอบได้อย่างรวดเร็วทำให้ค้นพบผลเฉลยเฉลี่ยที่ได้ต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดของโจทย์เพิ่มขึ้น พื้นที่การค้นหานั้นมีขนาดใหญ่และซับซ้อนมากขึ้น การกำหนดให้จำนวนประชากรในการค้นหามีจำนวนมากขึ้น แม้จะทำให้กระบวนการสำรวจคำตอบพบเจอคำตอบที่ค่อนข้างดีได้อย่างรวดเร็วในระยะเริ่มต้น แต่ด้วยจำนวนรอบการค้นหาที่มีจำกัด กลุ่มประชากรจะมีโอกาสผ่านกระบวนการปรับปรุงคำตอบในระยะการสอน (Teacher phase) และระยะการเรียนรู้ (Learner phase) ได้จำกัด ส่งผลให้การพัฒนาคำตอบอาจไม่เพียงพอต่อการค้นหาผลเฉลยที่ดียิ่งขึ้นได้ดังที่ควร ในทางตรงกันข้าม การกำหนดจำนวนประชากร (Population size) ให้เท่ากับ 25 แม้จะมีจำนวนประชากรน้อยกว่า แต่แลกมาซึ่งจำนวนรอบการค้นหาซ้ำที่เพิ่มขึ้น ทำให้ประชากรได้รับการปรับปรุงคำตอบผ่านทั้งระยะการสอน และระยะการเรียนรู้ อย่างต่อเนื่อง จึงสามารถรักษาสมดุลระหว่างการสำรวจพื้นที่คำตอบ (Exploration) และการพัฒนาคำตอบ (Exploitation) ได้ดีกว่า ดังนั้น การกำหนดจำนวนรอบการค้นหาให้มากขึ้นดังเช่นการตั้งค่าระดับปัจจัยที่ 25×100 จึงเอื้อต่อการปรับปรุงคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอน ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สามารถค้นหาผลเฉลยที่มีคุณภาพสูงกว่าได้ในโจทย์ปัญหาขนาดเล็ก ขนาดกลาง ขนาดใหญ่ และขนาดใหญพิเศษ โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนจากแผนภาพการลู่เข้าของคำตอบรูปที่ 4 ทั้งนี้ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Ullah *et al.*, 2024) ซึ่งอธิบายว่าประสิทธิภาพของวิธีการหาคำตอบดังกล่าวเกิดจากความสามารถในการสร้างสมดุลระหว่างการสำรวจพื้นที่คำตอบและการพัฒนาคำตอบของทั้ง 2 ระยะการหาคำตอบ

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงข้อพิสูจน์ว่าวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนนั้นสามารถแก้ไขปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง ซึ่งเป็นปัญหาที่มีความยากและซับซ้อนได้อีกทั้งยังพบว่าแม้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนเป็นวิธีการหาคำตอบที่มีเพียงปัจจัยพื้นฐานในการควบคุมกลไกในการหาคำตอบ ได้แก่ จำนวนขนาดของประชากร และจำนวนรอบการค้นหาซ้ำ ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้งานวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยไม่ได้สืบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมก่อนการแก้ไขปัญหา อย่างไรก็ตามจากผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้พบว่าการกำหนดค่าปัจจัยที่ต่างกันอย่างส่งผลต่อประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบได้ ดังนั้นควรมีการสืบหารูปแบบการตั้งค่าปัจจัยก่อนนำวิธีการดังกล่าวไปใช้แก้ปัญหา

6. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการเรียนรู้แบบการสอน ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไขของปัญหาที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในอนาคตควรศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาศัยการเรียนรู้จากการสอนในอนาคต อาจพิจารณาปรับปรุงกลไกการค้นหาคำตอบของวิธีการเดิม (Modification) หรือพัฒนาเป็นวิธีการแบบผสมผสาน (Hybridization) ร่วมกับเทคนิคเมตาฮีริสติกอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ หรือพิจารณาการประยุกต์ใช้วิธีเมตาฮีริสติกชนิดอื่นๆ เช่น วิธีการเชิงพันธุกรรม วิธีการแบบฝูงมด หรือ วิธีการดมกลืนของฉลาม กับชุดข้อมูลเดียวกันและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในด้านคุณภาพของคำตอบและเวลาในการคำนวณ เพื่อประเมินความเหมาะสมของวิธีแก้ไขปัญหสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะต่อไป

นอกจากนี้ งานวิจัยในอนาคตอาจศึกษาการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการเรียนรู้แบบการสอนกับปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพประเภทอื่นที่มีความซับซ้อน เช่น ปัญหาการจัดตารางการผลิต ปัญหาการจัดตารางการทำงาน ปัญหาการกำหนดตำแหน่งสิ่งอำนวยความสะดวก หรือปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งภายใต้เงื่อนไขเพิ่มเติมได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณหลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต (ค.อ.บ. วิศวกรรมอุตสาหการ) สาขาครุศาสตรบัณฑิตและเทคโนโลยีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาพิษณุโลก และหน่วยวิจัยด้านการวิจัยการดำเนินงานและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม (Centre of Operations Research and Industrial Application : CORIA) ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่กรุณาให้การสนับสนุนในการวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- Chakraa, H., Guérin, F., Leclercq, E., & Lefebvre, D. (2023). Optimization techniques for multi-robot task allocation problems: Review on the state of the art. **Robotics and Autonomous Systems**, 168, 104492. Doi: 10.1016/j.robot.2023.104492
- Chansombat, S., Musikapun, P., Pongcharoen, P., & Hicks, C. (2019). A hybrid discrete bat algorithm with krill herd-based advanced planning and scheduling tool for the capital goods industry. **International Journal of Production Research**, 57(21), 6705–6726. Doi: 10.1080/00207543.2018.1471240

- Djihane, M., Abdelkrim, H., & Dhiya Eddine, C. (2026). UAV association and beam planning in NTN-assisted 5G networks: A TLBO framework. **Physical Communication**, 74, 102969. Doi: 10.1016/j.phycom.2025.102969
- Konstantakopoulos, G. D., Gayialis, S. P., & Kechagias, E. P. (2022). Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: A literature review and classification. **Operational Research**, 22(3), 2033–2062. Doi: 10.1007/s12351-020-00600-7
- Krishnamurthy, N. K., Sabhahit, J. N., Jadoun, V. K., Gaonkar, D. N., Shrivastava, A., Rao, V. S., & Kudva, G. (2023). Optimal placement and sizing of electric vehicle charging infrastructure in a grid-tied DC microgrid using modified TLBO method. **Energies**, 16(4), 1781. Doi: 10.3390/en16041781
- Kuntasup, M., Pongcharoen, P., & Thepphakorn, T. (2025). Moth flame optimisation based timetabling tool for educational course timetabling. **International Journal of Innovation and Learning**, 38(3), 282–300. Doi: 10.1504/IJIL.2025.148422
- Lakkamraju, V., Tewari, N., Panigrahi, G. R., Nayak, S. K., Kulkarni, A., & Mortazavi, M. Z. (2026). Utilizing artificial intelligence for solving many-objective construction time–cost–quality–safety risk trade-off optimization problems. **Asian Journal of Civil Engineering**, 27(7), 3565–3575. Doi: 10.1007/s42107-026-01683-x
- Mehroliya, S., & Arya, A. (2024). Distributed generator and capacitor-embedded reconfiguration in three-phase unbalanced distribution systems using teaching–learning-based optimization. **Computer Applications in Engineering Education**, 32(1), e22689. Doi: 10.1002/cae.22689
- Mohammed, M. A., Abd Ghani, M. K., Hamed, R. I., Mostafa, S. A., Ahmad, M. S., & Ibrahim, D. A. (2017). Solving vehicle routing problem by using improved genetic algorithm for optimal solution. **Journal of Computational Science**, 21, 255–262. Doi: 10.1016/j.jocs.2017.04.003
- Niracha, B. (2024). **Modified marine predators algorithms for solving capacitated vehicle routing problem: A case study of an LED company** (Master’s thesis). Naresuan University, Phitsanulok.

- Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P. (2011). Teaching–learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. **Computer-Aided Design**, 43(3), 303–315. Doi: 10.1016/j.cad.2010.12.015
- Roy, S., Van Deursen, A., & Hermans, F. (2019). **Perceived relevance of automatic code inspection in end-user development: A study on VBA**. In Proceedings of the Evaluation and Assessment in Software Engineering Conference (pp. 167–176). New York, NY: ACM. Doi: 10.1145/3319008.3319028
- Sooncharoen, S., Pongcharoen, P., & Hicks, C. (2020). Grey wolf production scheduling for the capital goods industry. **Applied Soft Computing**, 94, 106480. Doi: 10.1016/j.asoc.2020.106480
- Stamadianos, T., Taxidou, A., Marinaki, M., & Marinakis, Y. (2024). Swarm intelligence and nature-inspired algorithms for solving vehicle routing problems: A survey. **Operational Research**, 24(3), 47. Doi: 10.1007/s12351-024-00862-5
- Sun, X., Dai, X., Pan, S., Bao, N., Liu, N., & Shi, X. (2022). **A discrete teaching–learning-based optimization algorithm for the green vehicle routing problem**. In 2021 IEEE 23rd International Conference on High Performance Computing and Communications, 7th International Conference on Data Science and Systems, 19th International Conference on Smart City, and 7th International Conference on Dependability in Sensor, Cloud and Big Data Systems and Applications (pp. 1552–1557). IEEE.
- Thepphakorn, T., & Pongcharoen, P. (2023). Modified and hybridised bi-objective firefly algorithms for university course scheduling. **Soft Computing**, 27(14), 9735–9772. Doi: 10.1007/s00500-022-07810-5
- Trachanatzi, D., Rigakis, M., Marinaki, M., & Marinakis, Y. (2024). A teaching–learning-based optimization algorithm for the environmental prize-collecting vehicle routing problem. **Energy Systems**, 15(4), 1429–1456. Doi: 10.1007/s12667-021-00477-1
- Ullah, W., Mu’tasim, M. A. N., & Rashid, M. F. F. (2024). Optimization of cost-based hybrid flowshop scheduling using teaching–learning-based optimization algorithm. **International Journal of Automotive and Mechanical Engineering**, 21(3), 11616–11628. Doi: 10.15282/ijame.21.3.2024.13.0896

- Valdez, F., Melin, P., & Castillo, O. (2014). A survey on nature-inspired optimization algorithms with fuzzy logic for dynamic parameter adaptation. **Expert Systems with Applications**, 41(14), 6459–6466. Doi: 10.1016/j.eswa.2014.04.015
- Venkata Rao, R. (2016). Review of applications of TLBO algorithm and a tutorial for beginners to solve the unconstrained and constrained optimization problems. **Decision Science Letters**, 5(1), 1–30. Doi: 10.5267/j.dsl.2015.9.003
- Vitayasak, S., & Pongcharoen, P. (2020). Cooperative designing of machine layout using teaching–learning-based optimisation and its modifications. In Y. Luo (Ed.), *Cooperative design, visualization, and engineering* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 12341, pp. 137–147). **Cham, Switzerland: Springer**. Doi: 10.1007/978-3-030-60816-3_16
- Wareepitak, K., Sooncharoen, S., Pongcharoen, P., & Hicks, C. (2026). A modified and hybrid-based optimization tool for solving multi-row, non-identical machine layout problems in multiple-product job shop production environments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. **Advance online publication**. Doi: 10.1007/s00170-026-18242-y
- Zahedi, F., Kia, H., & Khalilzadeh, M. (2023). A hybrid metaheuristic approach for solving a bi-objective capacitated electric vehicle routing problem with time windows and partial recharging. **Journal of Advances in Management Research**, 20(4), 695–729. Doi: 10.1108/JAMR-01-2023-0007



การออกแบบและประเมินสมรรถนะเครื่องสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำเพื่อลดการเกิด สีน้ำตาลของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภค

DESIGN AND PERFORMANCE EVALUATION OF A LOW-TEMPERATURE SPIN-DRYING SYSTEM FOR REDUCING BROWNING IN FRESH-CUT ORGANIC GREEN COS LETTUCE

ณัฐพงษ์ แกมทับทิม¹, ภควัต หุ่นฉัตร¹, เอกรัฐ ชะอุ่มเอียด¹,
เดือนแรม แผงเกี้ยว¹, สุวรรณ เอกรัมย์², นิติกร หลีชัย^{1*}

Natthaphong Kaemthapthim¹, Phakhawat Hunchat¹, Ekarat Chauumeiad¹,
Duanraem Phaengkieo¹, Suwan Aekram², Nitikorn Leechai^{1*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก
อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok, Muang, Phitsanulok,
Thailand, 65000

²Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok,
Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: Nitikorn@rmutl.ac.th

วันที่เข้ารับ 10 กรกฎาคม 2569

วันที่แก้ไขบทความ 26 สิงหาคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ 27 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

การรักษาคุณภาพของผักตัดแต่งพร้อมบริโภค โดยเฉพาะผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*) เป็นความท้าทายสำคัญในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากการเกิดสีน้ำตาลส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพด้านรูปลักษณ์และการยอมรับของผู้บริโภค งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและประเมินสมรรถนะเครื่องสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำสำหรับกระบวนการสลัดน้ำของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภค และศึกษาผลของการควบคุมอุณหภูมิระหว่างกระบวนการสลัดน้ำต่อการเกิดสีน้ำตาลของผลิตผล เครื่องต้นแบบได้รับการออกแบบโดยบูรณาการระบบทำความเย็นเข้ากับกระบวนการสลัดน้ำ โดยนำตัวอย่างผักที่ผ่านการตัดแต่งและล้างทำความสะอาดมาสุ่มแบ่งเป็นชุดละ 1 kg ก่อนเดินระบบทำความเย็นล่วงหน้าเป็นเวลา 5 min และสลัดน้ำที่ความเร็วรอบคงที่ 180 rpm เป็นเวลา 15 min ภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีอุณหภูมิลมจ่ายและลมกลับเท่ากับ 18.0 และ 22.3 °C ตามลำดับ ส่วนชุดควบคุมผ่านกระบวนการสลัดน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องโดยไม่เปิดระบบทำความเย็น หลังการสลัดน้ำ ตัวอย่างของแต่ละสภาวะถูกแบ่งเป็น 20 หน่วยทดลอง หน่วยละ 20 g บรรจุในถุงพอลิเอทิลีน และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 10 วัน โดยติดตาม

การเกิดสีน้ำตาลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายในระบบสี HSI และกำหนดช่วงมุมสี 35° – 50° สำหรับระบุพื้นที่สีน้ำตาล ผลการประเมินสมรรถนะทางวิศวกรรมพบว่า เครื่องมีความสามารถในการทำความเย็น 0.066 TR อัตราการไหลของอากาศ $2.97 \text{ m}^3/\text{min}$ และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) 0.73 BTU/h/W ผลการวิเคราะห์พื้นที่การเกิดสีน้ำตาลพบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลต่ำกว่า 2.5% ขณะที่ชุดควบคุมมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลมากกว่า 3.6% และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การสลัดน้ำร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิต่ำมีศักยภาพในการลดการเกิดสีน้ำตาลและช่วยรักษาคุณภาพด้านรูปลักษณะของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภคระหว่างการเก็บรักษา

คำสำคัญ: ระบบสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำ, การเกิดสีน้ำตาล, ผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์, การจัดการหลังการเก็บเกี่ยว, ระบบทำความเย็น

Abstract

Maintaining the quality of fresh-cut, ready-to-eat vegetables, particularly organic green cos lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*), remains a major challenge in postharvest handling because browning directly affects visual quality and consumer acceptance. This study aimed to design and evaluate the engineering performance of a temperature-controlled spin dryer for fresh-cut organic green cos lettuce and to investigate the effect of low-temperature control during spin drying on browning development. The prototype was designed by integrating a refrigeration system into the spin-drying process. After trimming and washing, the lettuce samples were randomly divided into 1-kg batches. The refrigeration system was operated for 5 min before spin drying. The samples were then spin-dried at a constant rotational speed of 180 rpm for 15 min under low-temperature conditions, with supply- and return-air temperatures of 18.0 and 22.3 °C, respectively. Control samples were spin-dried under ambient conditions without operating the refrigeration system. Following spin drying, the samples from each treatment were divided into 20 experimental units of 20 g each, individually packaged in polyethylene bags, and stored at 4 °C for 10 days. Browning development was monitored using image analysis based on the hue–saturation–intensity (HSI) color model, with hue angles ranging from 35° to 50° used to identify browned areas. The engineering performance evaluation showed that the prototype had a cooling capacity of 0.066 TR, an airflow rate of $2.97 \text{ m}^3/\text{min}$, and an

energy efficiency ratio (EER) of 0.73 BTU/h/W. Image analysis revealed that the samples subjected to low-temperature spin drying exhibited less than 2.5% browned area, whereas the control samples exhibited more than 3.6%. The difference between the treatments was statistically significant ($p < 0.05$). These findings demonstrate that spin drying under controlled low-temperature conditions can reduce browning and help maintain the visual quality of fresh-cut organic green cos lettuce during refrigerated storage.

Keywords: Low-temperature spin-drying system, Browning, Organic green cos lettuce, Postharvest handling, Cooling system

1. บทนำ

ผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*) เป็นผักกินใบที่ได้รับความนิยมสำหรับการบริโภคสดและการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ตัดแต่งพร้อมบริโภค (Fresh-cut หรือ Ready-to-eat) เนื่องจากมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่กรอบและสะดวกต่อการบริโภค อย่างไรก็ตาม ผักสลัดมีปริมาณน้ำสูงและมีโครงสร้างเนื้อเยื่อที่บอบบาง จึงมีความไวต่อการเสื่อมคุณภาพภายหลังการเก็บเกี่ยว โดยเฉพาะเมื่อผ่านกระบวนการตัดแต่ง การล้าง การกำจัดน้ำ และการบรรจุ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อและเร่งการเปลี่ยนแปลงด้านสีและลักษณะปรากฏ ส่งผลต่อคุณภาพและการยอมรับของผู้บริโภค (Bhatia *et al.*, 2024; Toivonen & Brummell, 2008)

การล้างเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการผลิตผักตัดแต่งพร้อมบริโภค เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและลดสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิว อย่างไรก็ตาม ภายหลังการล้างมักมีน้ำอิสระตกค้างบริเวณผิวใบ ซึ่งหากกำจัดออกไม่เพียงพออาจทำให้เกิดการสะสมของหยดน้ำภายในบรรจุภัณฑ์ และส่งผลต่อสภาวะแวดล้อมรอบผลิตผลระหว่างการเก็บรักษา ดังนั้น การกำจัดน้ำส่วนเกินออกจากพื้นผิวก่อนการบรรจุจึงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อการรักษาคุณภาพของผักตัดแต่ง วิธีการที่นิยมใช้ ได้แก่ การผึ่งลม การใช้ลมบังคับ และการสลัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยง โดยการสลัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยงสามารถกำจัดน้ำส่วนเกินบริเวณพื้นผิวได้อย่างรวดเร็วและเหมาะสมกับกระบวนการผลิตผักตัดแต่ง (Bolin & Huxsoll, 1991) อย่างไรก็ตาม หากกำหนดสภาวะการสลัดน้ำไม่เหมาะสม อาจทำให้ผลิตผลเกิดความเสียหายทางกลหรือเกิดการสูญเสียน้ำมากเกินไป ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพของผลิตผลในระหว่างการเก็บรักษา

การเกิดสีน้ำตาลเป็นปัญหาสำคัญด้านคุณภาพของผักสลัดตัดแต่ง เนื่องจากกระบวนการตัด การเสียดสี และการกระแทกสามารถทำลายความสมบูรณ์ของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้สารประกอบฟีนอลิกและเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในเนื้อเยื่อมีโอกาสสัมผัสกันมากขึ้น และนำไปสู่การพัฒนาของสีน้ำตาล นอกจากนี้ การบาดเจ็บของเนื้อเยื่อยังสามารถกระตุ้นการตอบสนอง

ต่อบาดแผล (Wound response) และการเปลี่ยนแปลงของวิถีเมแทบอลิซึมฟีนิลโพรพานอยด์ (Phenylpropanoid metabolism) ซึ่งสัมพันธ์กับการสังเคราะห์และสะสมสารประกอบฟีนอลิกที่มีบทบาทต่อการเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ตัดแต่ง (He & Luo, 2007; Toivonen & Brummell, 2008; Li *et al.*, 2023) Iakimova & Woltering, (2018) รายงานว่า แม้ผักสลัดตัดแต่งจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C แต่ยังสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อและการเกิดสีน้ำตาลบริเวณรอยตัดในระหว่างการเก็บรักษาได้ แสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษาเพียงอย่างเดียวอาจไม่สามารถป้องกันการตอบสนองของเนื้อเยื่อที่เกิดขึ้นภายหลังการตัดแต่งได้ทั้งหมด

ในด้านการกำจัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยง เกร์รัฐ และเดือนแรม (2565) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสลัดน้ำของผักตัดแต่ง โดยพิจารณาน้ำหนักตัวอย่าง ความเร็วรอบ และระยะเวลาการสลัด ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม การศึกษาดังกล่าวมุ่งเน้นการกำหนดสภาวะการทำงานของกระบวนการสลัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยงภายใต้สภาวะแวดล้อมทั่วไป โดยยังไม่ได้บูรณาการระบบทำความเย็นเข้ากับกระบวนการสลัดน้ำ งานวิจัยนี้จึงต่อยอดแนวคิดดังกล่าวโดยบูรณาการระบบทำความเย็นและการหมุนเวียนอากาศเข้ากับกระบวนการสลัดน้ำ เพื่อศึกษาผลของการควบคุมสภาวะอุณหภูมิระหว่างการกำจัดน้ำต่อการเกิดสีน้ำตาลของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภคระหว่างการเก็บรักษา

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าเครื่องหรือกระบวนการสลัดน้ำสำหรับผักตัดแต่งส่วนใหญ่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำส่วนเกิน โดยพิจารณาปัจจัยด้านความเร็วรอบ ปริมาณผลิตภัณฑ์ และระยะเวลาการสลัดเป็นหลัก ขณะที่การบูรณาการการสลัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยง ร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่อง เพื่อให้สามารถกำจัดน้ำส่วนเกินและควบคุมสภาวะอุณหภูมิของอากาศในขั้นตอนเดียวกันยังมีรายงานค่อนข้างจำกัด โดยเฉพาะการประเมินผลของกระบวนการดังกล่าวต่อการพัฒนาของสีน้ำตาลในผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งระหว่างการเก็บรักษา นอกจากนี้ การประเมินพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลในเชิงปริมาณด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายยังเป็นแนวทางที่สามารถลดความคลาดเคลื่อนจากการประเมินด้วยสายตาและช่วยให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพได้อย่างเป็นระบบ ดังนั้น เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้จึงมีลักษณะแตกต่างจากเครื่องสลัดน้ำทั่วไป โดยบูรณาการถังสลัดน้ำแบบแรงเหวี่ยงร่วมกับระบบทำความเย็นและระบบหมุนเวียนอากาศ พร้อมประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายในระบบสี HSI เพื่อประเมินพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลของผักสลัดในเชิงปริมาณตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา

ในการศึกษานี้ ชุดทดลองดำเนินการสลัดน้ำภายใต้ระบบทำความเย็น โดยมีอุณหภูมิลมจ่าย 18.0 °C และอุณหภูมิลมกลับ 22.3 °C ขณะที่ชุดควบคุมผ่านกระบวนการสลัดน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องโดยไม่เปิดระบบทำความเย็น แม้ว่าภายหลังการสลัดน้ำ ตัวอย่างจากทั้งสองสภาวะจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิเดียวกัน คือ 4°C แต่ความแตกต่างของการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บ

รักษาอาจสัมพันธ์กับสถานะที่ผลิตผลได้รับในช่วงหลังการล้างและก่อนการบรรจุ ซึ่งเป็นระยะเริ่มต้น ภายหลังเนื้อเยื่อได้รับความเสียหายจากการตัดแต่ง การใช้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าสถานะแวดล้อม ในระหว่างการสลัดน้ำอาจช่วยลดภาระความร้อนของผลิตผลและชะลอการเปลี่ยนแปลงทาง สรีรวิทยาและชีวเคมีในระยะแรกก่อนเข้าสู่การเก็บรักษาที่ 4°C ประกอบกับการกำจัดน้ำอิสระออก จากพื้นผิวก่อนการบรรจุอาจช่วยลดการสะสมของความชื้นส่วนเกินภายในบรรจุภัณฑ์ ดังนั้น ความ แตกต่างของพื้นที่การเกิดสื่อน้ำตาลที่ตรวจพบในระหว่างการเก็บรักษาจึงอาจเป็นผลต่อเนื่องจาก สถานะการจัดการผลิตผลก่อนเข้าสู่การเก็บรักษา อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการศึกษานี้ไม่ได้ตรวจวัด กิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) เพอร์ออกซิเดส (POD) หรือฟีนอละลาโนน แอมโมเนียไลเอส (PAL) โดยตรง การอธิบายกลไกที่เกี่ยวข้องจึงพิจารณาจากแนวโน้มของการ เปลี่ยนแปลงพื้นที่การเกิดสื่อน้ำตาลร่วมกับกลไกที่มีรายงานในงานวิจัยที่ผ่านมา (Luna *et al.*, 2016; lakimova & Woltering, 2018)

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและประเมินสมรรถนะของเครื่องสลัดน้ำ อุณหภูมิต่ำสำหรับสลัดน้ำบนพื้นผิวของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภคร และศึกษาผล ของการสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิต่อการเกิดสื่อน้ำตาลระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายในระบบสี HSI เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของ พื้นที่การเกิดสื่อน้ำตาลในเชิงปริมาณ

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำสำหรับกระบวนการสลัดน้ำของผักสลัด กรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภคร

2.2 เพื่อประเมินสมรรถนะทางวิศวกรรมของเครื่องต้นแบบและระบบทำความเย็นภายใต้ สถานะการทำงานที่กำหนด

2.3 เพื่อศึกษาผลของกระบวนการสลัดน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำต่อการเกิดสื่อน้ำตาลของผัก สลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภครระหว่างการเก็บรักษา โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ ภาพถ่าย (Image analysis) ในระบบสี HSI เพื่อประเมินพื้นที่การเกิดสื่อน้ำตาลเชิงปริมาณ

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบและประเมินเครื่องสลัดน้ำแบบอุณหภูมิต่ำ

การศึกษานี้มุ่งออกแบบและพัฒนาเครื่องสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำ โดยบูรณาการกระบวนการ สลัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยงร่วมกับระบบทำความเย็นและระบบหมุนเวียนอากาศ เพื่อควบคุมสภาวะ อุณหภูมิของผลิตผลในระหว่างกระบวนการสลัดน้ำและศึกษาผลต่อการพัฒนาของพื้นที่การเกิดสี

น้ำตาระหว่างการเก็บรักษา การออกแบบเครื่องต้นแบบให้มีความสำคัญกับการรักษาสภาพของผลิตภัณฑ์ การลดความเสียหายทางกลระหว่างกระบวนการ และการควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องให้ต่ำกว่าสถานะแวดล้อมก่อนและระหว่างการปฏิบัติงาน

เกณฑ์การออกแบบกำหนดให้ระบบสามารถลดอุณหภูมิอากาศภายในบริเวณควบคุมอุณหภูมิของเครื่องให้ต่ำกว่าอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 4–5 °C ภายในระยะเวลา 5 min ระบบต้นแบบประกอบด้วยคอมเพรสเซอร์กำลังไฟฟ้าพิกัด 1.1 kW คอยล์เย็น (Evaporator) พร้อมระบบส่งลมเย็นแบบบังคับทิศทาง คอยล์ร้อน (Condenser) พร้อมพัดลมระบายความร้อน ชุดควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติร่วมกับเซ็นเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิ (DS18B20/NTC) และพัดลมโบลเวอร์สำหรับหมุนเวียนอากาศ โครงสร้างเครื่องต้นแบบมีขนาด 90 × 90 × 100 cm ภายในติดตั้งถังตะแกรงหมุนสำหรับสไลด์น้ำ ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1/2 hp (220 V, 50 Hz) โดยควบคุมความเร็วรอบให้เหมาะสมกับสถานะการทดลอง (ภาพที่ 1) ในการออกแบบระบบทำความเย็น ได้ประมาณการระความร้อนสัมผัสของอากาศภายในบริเวณควบคุมอุณหภูมิจากสมดุลพลังงาน โดยพิจารณาความหนาแน่นของอากาศ ปริมาตรของบริเวณควบคุม ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ผลต่างอุณหภูมิ และระยะเวลาที่กำหนด ตามหลักการของ ซิงห์ และเฮลด์แมน (Singh & Heldman, 2014) ดังสมการที่ (1)

$$Q = \frac{\rho V c_p \Delta T}{t} \quad (1)$$

โดยที่ Q คือการระความร้อน (kW), ρ คือความหนาแน่นของอากาศ (1.2 kg/m³), V คือปริมาตรห้อง (0.81 m³), c_p คือความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (1.006 kJ/kg·K), ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิ (10 K) และ t คือเวลา (300 s)

แม้ว่าเป้าหมายการทำงานของเครื่องต้นแบบกำหนดให้ลดอุณหภูมิอากาศภายในระบบต่ำกว่าอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 4–5 °C แต่ในการคำนวณออกแบบได้กำหนดค่า ΔT เท่ากับ 10 K ซึ่งสูงกว่าเป้าหมายการใช้งานจริง เพื่อใช้เป็น ค่าความต่างอุณหภูมิสำหรับการออกแบบที่มีส่วนเผื่อ (Design safety margin) รองรับความแปรผันของสถานะแวดล้อมและการระความร้อนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งานจริง จากสมการที่ 1 คำนวณได้การระความร้อนสัมผัสของอากาศประมาณ 0.033 kW หรือ 33 W

ทั้งนี้ ค่าดังกล่าวเป็นการประมาณเฉพาะการระความร้อนสัมผัสของอากาศ และไม่ได้รวมการระความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระหว่างการปฏิบัติงานจริง เช่น การระความร้อนจากผลิตภัณฑ์ การระความร้อนแฝงจากความชื้น การถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้าง การแทรกซึมของอากาศจากภายนอก

และความร้อนจากอุปกรณ์ภายในเครื่อง ดังนั้น การเลือกอุปกรณ์ทำความเย็นจึงพิจารณาให้มีกำลังสำรองเหนือกว่าค่าภาระความร้อนสัมผัสที่คำนวณได้ โดยเครื่องต้นแบบใช้คอมเพรสเซอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าพิกัด 1.1 kW สำหรับระบบทำความเย็น ส่วนสมรรถนะการทำความเย็นจริงของระบบประเมินจากอัตราการไหลของอากาศ ความแตกต่างของเอนทัลปีระหว่างลมกลับและลมจ่าย ความสามารถในการทำความเย็นสุทธิ และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) ภายใต้สภาวะการทำงานจริง ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.3

3.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดลองสลัดน้ำ

ผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์สดที่ใช้ในการทดลองจัดซื้อจากวิสาหกิจชุมชนผักปลอดภัยจากสารพิษ ตำบลเกาะตาเลี้ยง อำเภอสรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย ก่อนการทดลอง ตัวอย่างผักถูกคัดเลือกและตัดแต่งด้วยมือ โดยคัดแยกส่วนที่มีลักษณะเสียหายหรือไม่สมบูรณ์ออก จากนั้นล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปาไหลผ่านเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนบริเวณพื้นผิว ก่อนสุมแบ่งตัวอย่างชุดละ 1 kg บรรจุลงในตะกร้าพอลิโพรพิลีนแบบมีรูพรุน และนำเข้าสู่เครื่องสลัดน้ำต้นแบบ (ภาพที่ 1)

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ ได้แก่ 1) การสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิต่ำ โดยเปิดระบบทำความเย็น และ 2) ชุดควบคุม (Control) ซึ่งดำเนินการสลัดน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องโดยไม่เปิดระบบทำความเย็น สำหรับสภาวะควบคุมอุณหภูมิต่ำ ระบบทำความเย็นถูกเดินเครื่องล่วงหน้า (Pre-cooling) เป็นเวลา 5 min เพื่อให้อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องเข้าสู่สภาวะที่กำหนดก่อนเริ่มกระบวนการสลัดน้ำ โดยกำหนดอุณหภูมิลมจ่าย (Supply-air temperature) เท่ากับ 18.0°C ขณะที่อุณหภูมิลมกลับ (Return-air temperature) เฉลี่ยเท่ากับ 22.3°C และความเร็วลมกลับเท่ากับ 3.2 m/s การกำหนดอุณหภูมิลมจ่ายที่ 18.0°C สอดคล้องกับเกณฑ์การออกแบบของเครื่องต้นแบบที่กำหนดให้สามารถลดอุณหภูมิอากาศภายในบริเวณควบคุมให้ต่ำกว่าสภาวะแวดล้อมประมาณ $4\text{--}5^{\circ}\text{C}$ ภายในระยะเวลา 5 min

ภายหลังการทำ Pre-cooling ตัวอย่างถูกสลัดน้ำที่ความเร็วรอบคงที่ 180 rpm เป็นเวลา 15 min การกำหนดสภาวะดังกล่าวเป็นการต่อยอดจากงานวิจัยของ เอกรัฐ และเดือนแรม (2565) ซึ่งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลัดน้ำของผักสดตัดแต่งชนิดผักใบ โดยทดสอบความเร็วรอบ 85, 130 และ 180 rpm และระยะเวลาการสลัดน้ำ 5, 10 และ 15 min ผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าสำหรับผักน้ำหนัก 1 kg การสลัดที่ความเร็วรอบ 180 rpm เป็นองค์ประกอบของสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำสูง โดยรายงานผลที่ระยะเวลา 10 min ดังนั้น การศึกษาปัจจุบันจึงเลือกความเร็วรอบ 180 rpm และกำหนดระยะเวลา 15 min ซึ่งเป็นระดับที่อยู่ภายในช่วงพารามิเตอร์ที่ได้รับการศึกษามาก่อน เพื่อใช้เป็นสภาวะการทำงานคงที่สำหรับประเมินผลของการบูรณาการระบบทำความเย็น ทั้งนี้ มิได้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอว่าสภาวะ 180 rpm และ 15 min เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผักกรีนคอส สำหรับชุดควบคุม ใช้ปริมาณตัวอย่าง ความเร็วรอบ และระยะเวลาการสลัดน้ำเช่นเดียวกับ

ชุดทดลองทุกประการ แต่ไม่เปิดระบบทำความเย็น เพื่อให้ปัจจัยหลักที่แตกต่างกันระหว่างสองสภาวะ เป็นการควบคุมอุณหภูมิระหว่างกระบวนการสลัดน้ำ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการสลัดน้ำ ตัวอย่างของแต่ละสภาวะถูกสุ่มแบ่งออกเป็น 20 หน่วยทดลอง โดยกำหนดมวลตัวอย่างหน่วยละ 20 g และบรรจุแยกในถุงพอลิเอทิลีนจำนวน 20 ถุง ทั้งนี้ การกำหนดหน่วยทดลองใช้มวลของตัวอย่างเป็นเกณฑ์โดยไม่ได้กำหนดจำนวนใบต่อถุง เนื่องจากขนาดและมวลของใบผักมีความแปรผันตามธรรมชาติ ตัวอย่างทั้งหมดถูกนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 10 วันภายใต้สภาวะเดียวกัน

การติดตามการเกิดสีน้ำตาลดำเนินการโดยกำหนดรหัสประจำหน่วยทดลองแต่ละถุง และใช้ตัวอย่างชุดเดิมของแต่ละหน่วยทดลองในการบันทึกภาพซ้ำทุกวันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา โดยบันทึกภาพในเวลา 12.00 น. ของแต่ละวัน เพื่อให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลของตัวอย่างเดียวกันตามระยะเวลาการเก็บรักษาได้อย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 1 เครื่องสลัดน้ำต้นแบบ

3.3 การประเมินสมรรถนะของระบบทำความเย็น

สมรรถนะของระบบทำความเย็นถูกประเมินผ่านพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (CMM, m³/min) คำนวณจากความเร็วลมกลับและพื้นที่หน้าตัดของท่อลม ดังสมการที่ (2)

$$CMM = 60 \times V \times A \quad (2)$$

โดยที่ V คือความเร็วลมกลับเฉลี่ย (m/s) และ A คือพื้นที่หน้าตัดของท่อ (m²) จากนั้น ภาระการทำความเย็น (Cooling capacity) ในหน่วยตันความเย็น (TR) คำนวณจากความแตกต่างของเอนทัลปีระหว่างลมกลับและลมจ่ายตามสมการที่ (3)

$$TR = 5.707 \times 10^{-3} \times CMM \times (H_r \times H_s) \quad (3)$$

โดยที่ H_r และ H_s คือเอนทัลปีของลมกลับและลมจ่าย (kJ/kg) ตามลำดับ เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ได้ทำการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าต่อตันความเย็น (CHP) ตามสมการที่ (4)

$$CHP = \frac{W_{in}}{TR} \quad (4)$$

โดยที่ W_{in} คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้า (kW) นอกจากนี้ อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Ratio, EER) ซึ่งเป็นดัชนีมาตรฐานในงานวิศวกรรมทำความเย็น ได้ถูกคำนวณดังนี้

$$ERR = \frac{Q}{W_{in}} \quad (5)$$

โดยที่ Q คือความจุการทำความเย็นสุทธิ (BTU/h) และ W_{in} คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ (W)

3.4 การถ่ายภาพและการประเมินการเกิดสีน้ำตาลด้วยการวิเคราะห์ภาพถ่าย

การประเมินการเกิดสีน้ำตาลของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ดำเนินการเชิงปริมาณด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย ภายใต้สภาวะการถ่ายภาพที่ควบคุมให้คงที่ โดยใช้ตู้ถ่ายภาพควบคุมแสง (Studio Light Box, Shenzhen PULUZ Technology Co., Ltd., China) ขนาด 25 × 25 cm ติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65 เพื่อควบคุมอุณหภูมิสีและสภาวะแสงระหว่างการบันทึกภาพให้

มีความสม่ำเสมอ ภาพตัวอย่างถูกบันทึกในมุมมองด้านบน (Top-down view) ด้วยสมาร์ทโฟน iPhone 13 (Apple Inc., USA) โดยกำหนดระยะห่างระหว่างกล้องกับตัวอย่างเท่ากับ 25 cm และบันทึกภาพที่มีความละเอียด 3024 × 4032 pixel

ภายหลังการสลัดน้ำ ตัวอย่างของแต่ละสภาวะถูกแบ่งเป็น 20 หน่วยทดลอง โดยกำหนดมวลตัวอย่างหน่วยละ 20 g และบรรจุแยกในถุงพอลิเอทิลีนจำนวน 20 ถุงต่อสภาวะ การกำหนดหน่วยทดลองใช้มวลของตัวอย่างเป็นเกณฑ์ โดยไม่ได้กำหนดจำนวนใบ เนื่องจากใบผักสลัดมีความแตกต่างกันด้านขนาดและมวลตามธรรมชาติ แต่ละหน่วยทดลองถูกกำหนดรหัสประจำตัวเพื่อใช้ติดตามตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา

การบันทึกภาพดำเนินการกับตัวอย่างชุดเดิมของแต่ละหน่วยทดลองตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 10 วัน โดยถ่ายภาพตัวอย่างแต่ละหน่วยทดลองทุกวันในเวลา 12.00 น. ภายใต้ตำแหน่งกล้อง ระยะถ่ายภาพ และสภาวะแสงเดียวกันตลอดการทดลอง การใช้ตัวอย่างชุดเดิมในการติดตามรายวันทำให้สามารถประเมินการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลของแต่ละหน่วยทดลองตามระยะเวลาการเก็บรักษาได้อย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 การจัดวางผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ในระบบถ่ายภาพ

การประมวลผลภาพดำเนินการด้วยภาษา Python ร่วมกับไลบรารี OpenCV เวอร์ชัน 4.10.0 ประกอบด้วยขั้นตอนการประมวลผลภาพเบื้องต้น การแปลงปริภูมิสี และการแบ่งส่วนภาพด้วยค่าขีดจำกัดสี (Color thresholding) ภาพต้นฉบับในปริภูมิสี RGB ถูกแปลงเป็นปริภูมิสี HSI (Hue, Saturation, Intensity) ตามสมการที่ 6–9 จากนั้นแยกพื้นที่ของผักออกจากพื้นหลังและระบุบริเวณที่เกิดสีน้ำตาลโดยประยุกต์หลักเกณฑ์การวิเคราะห์ค่าสี (Aekram *et al.*, 2024; Zhou *et al.*, 2004) โดย Aekram *et al.* (2024) รายงานช่วงมุมสีสำหรับพื้นที่สีน้ำตาลที่ 35°–79° อย่างไรก็ตาม

ตาม จากการตรวจสอบค่ามุมสีของตัวอย่างในการศึกษานี้ พบว่าพิกเซลที่จำแนกเป็นพื้นที่สีน้ำตาลอยู่ในช่วง 35° – 50° และไม่พบค่ามุมสีในช่วง 51° – 79° ดังนั้น การศึกษานี้จึงกำหนดช่วงมุมสี 35° – 50° สำหรับการจำแนกพื้นที่สีน้ำตาลของตัวอย่างที่ศึกษา ทั้งนี้ วิธีการดังกล่าวประยุกต์จาก Aekram *et al.* (2024) ซึ่งรายงานความสอดคล้องระหว่างพื้นที่ที่คำนวณด้วยวิธีวิเคราะห์ภาพและพื้นที่จากการวัดจริง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3% (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 อัลกอริทึมการวิเคราะห์ภาพถ่ายสำหรับการหาปริมาณพื้นที่ที่เกิดสีน้ำตาล

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R-G) + (R-B)]}{\left[(R-B)^2 + (R-B)(G-B) \right]^{\frac{1}{2}}} \right\} \quad (6)$$

$$H = \begin{cases} \theta & B \leq G \\ 360 - \theta & B > G \end{cases} \quad (7)$$

$$S = 1 - \frac{1}{(R+G+B)} [\min(R, G, B)] \quad (8)$$

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B) \quad (9)$$

โดยที่ $[\min(R, G, B)]$ คือค่าต่ำสุดเมื่อเทียบระหว่างค่าของ R, G และ B

ข้อมูลร้อยละพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบผสมสองปัจจัย (Two-way mixed-design ANOVA) โดยกำหนดสถานะการสลัดน้ำ (Treatment) เป็นปัจจัยระหว่างหน่วยทดลอง (Between-subject factor) ประกอบด้วยสถานะควบคุมอุณหภูมิต่ำและสถานะอุณหภูมิห้อง และกำหนดระยะเวลาการเก็บรักษา (Storage time) เป็นปัจจัยภายในหน่วยทดลองแบบวัดซ้ำ (Within-subject repeated-measures factor) เนื่องจากตัวอย่างชุดเดิมของแต่ละหน่วยทดลองถูกติดตามและบันทึกภาพซ้ำตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา การวิเคราะห์พิจารณาผลหลักของสถานะการสลัดน้ำ ผลหลักของระยะเวลาการเก็บรักษา และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสถานะการสลัดน้ำกับระยะเวลาการเก็บรักษา (Treatment $\times$ storage time)

ก่อนการวิเคราะห์ ข้อมูลได้รับการตรวจสอบการแจกแจงของค่าคลาดเคลื่อนและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แบบวัดซ้ำ ในกรณีที่สมมติฐานความเป็นทรงกลม (Sphericity) ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ จะใช้การปรับค่าองศาอิสระด้วยวิธี Greenhouse-Geisser สำหรับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างสถานะการทดลองในแต่ละช่วงเวลาหรือระหว่างช่วงเวลาการเก็บรักษา ใช้การเปรียบเทียบรายคู่พร้อมปรับค่า p ด้วยวิธี Bonferroni โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

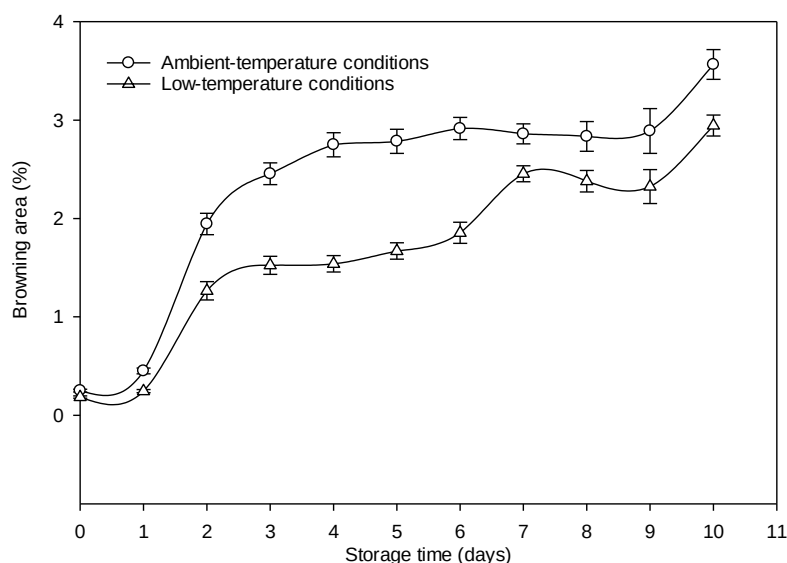
4. ผลการวิจัย

4.1 สมรรถนะของระบบทำความเย็นในเครื่องสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำ

จากการประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องสลัดน้ำต้นแบบที่บูรณาการระบบปรับอากาศเพื่อกำจัดความชื้นบนผิวผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ พบว่าระบบมีอัตราการไหลเวียนของอากาศเท่ากับ $2.97 \text{ m}^3/\text{min}$ และให้ความสามารถในการทำความเย็นสุทธิที่ 0.066 TR หรือคิดเป็น 794.02 BTU/h อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน พบว่าระบบมีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) เท่ากับ 0.73 BTU/h/W

4.2 ผลของการสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำต่อการเกิดสีน้ำตาล

การติดตามการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลในผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำตาลที่ผ่านกระบวนการสลัดน้ำภายใต้ 2 สถานะ ได้แก่ สถานะควบคุมอุณหภูมิต่ำและสถานะอุณหภูมิห้อง ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 10 วัน พบว่า พื้นที่การเกิดสีน้ำตาลของตัวอย่างในทั้งสองสถานะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สถานะควบคุมอุณหภูมิต่ำมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลต่ำกว่าชุดควบคุมที่สลัดน้ำภายใต้สถานะอุณหภูมิห้อง การวิเคราะห์แบบวัดซ้ำพบว่าสถานะการสลัดน้ำ ระยะเวลาการเก็บรักษา และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสถานะการสลัดน้ำกับระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 4 เปอร์เซ็นต์พื้นที่การเกิดสีน้ำตาลของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 10 วัน ภายใต้สภาวะการสลัดน้ำที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า พื้นที่การเกิดสีน้ำตาลของทั้งสองสภาวะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 2 วันแรก โดยรอยสีน้ำตาลปรากฏเด่นชัดบริเวณรอยตัดและบริเวณเนื้อเยื่อที่ได้รับความเสียหายทางกล (Mechanical damage) (ภาพที่ 5) หลังจากนั้นในช่วงวันที่ 3-9 อัตราการเพิ่มขึ้นของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับช่วง 2 วันแรก ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งในวันที่ 10 (ภาพที่ 6) ทั้งนี้ ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ชุดควบคุมมีแนวโน้มของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลสูงกว่าตัวอย่างที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิต่ำ

ในช่วงปลายระยะเวลาการเก็บรักษา ตัวอย่างที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิต่ำมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลต่ำกว่า 2.5% ขณะที่ชุดควบคุมมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลมากกว่า 3.6% ซึ่งแสดงให้เห็นความแตกต่างของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลระหว่างสองสภาวะประมาณ 1.1 จุดเปอร์เซ็นต์ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แม้ว่าตัวอย่างจากทั้งสองสภาวะจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิเดียวกัน คือ 4°C แต่สภาวะการจัดการในขั้นตอนการสลัดน้ำก่อนการบรรจุมีความสัมพันธ์กับระดับการเกิดสีน้ำตาลที่ตรวจพบในระหว่างการเก็บรักษา โดยตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิต่ำมีการพัฒนาของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลน้อยกว่าชุดควบคุม



ภาพที่ 5 พื้นที่สีน้ำตาลที่เกิดจากการตัดที่สังเกตพบในช่วง 2 วันแรกของการเก็บรักษา



ภาพที่ 6 การพัฒนาของการเกิดสีน้ำตาลถูกติดตามตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 10 วัน

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้สามารถออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำที่บูรณาการระบบทำความเย็นร่วมกับกระบวนการสลัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยงสำหรับผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภค โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ ได้แก่ 1) ชุดทดลองที่ดำเนินการสลัดน้ำภายใต้ระบบทำความเย็น โดยใช้อุณหภูมิลมจ่ายเท่ากับ 18.0°C และอุณหภูมิลมกลับเฉลี่ยเท่ากับ 22.3°C และ

2) ชุดควบคุมที่ดำเนินการสลัดน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องโดยไม่เปิดระบบทำความเย็น ทั้งสองสภาวะใช้ความเร็วรอบ 180 rpm เป็นเวลา 15 min ภายใต้ปริมาณตัวอย่างและเงื่อนไขการสลัดน้ำเดียวกัน จากนั้นตัวอย่างทั้งหมดถูกนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 10 วัน ผลการประเมินด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายในระบบสี HSI แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิตำมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในช่วงปลายระยะเวลาการเก็บรักษา ตัวอย่างที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิตำมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลต่ำกว่า 2.5% ขณะที่ชุดควบคุมมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลมากกว่า 3.6% แสดงให้เห็นว่าการควบคุมสภาวะอุณหภูมิระหว่างกระบวนการสลัดน้ำก่อนการบรรจุมีความสัมพันธ์กับการลดระดับการเกิดสีน้ำตาลของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิตำ

ในด้านสมรรถนะทางวิศวกรรม เครื่องต้นแบบมีอัตราการไหลเวียนของอากาศ 2.97 m³/min ความสามารถในการทำความเย็นสุทธิ 0.066 TR และมีอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy efficiency ratio; EER) เท่ากับ 0.73 BTU/h/W ผลการศึกษาจึงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการบูรณาการกระบวนการสลัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยงร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิสำหรับการลดน้ำส่วนเกินบนพื้นผิวและชะลอการพัฒนาของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลในผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภค ทั้งนี้ การพัฒนาระบบในอนาคตควรให้ความสำคัญกับการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานควบคู่กับการรักษาคุณภาพของผลิตผล

5.2 การอภิปรายผล

5.2.1 การวิเคราะห์สมรรถนะและการใช้พลังงานของระบบ

แม้ว่าระบบจะสามารถลดอุณหภูมิและกำจัดความชื้นเพื่อรักษาคุณภาพของผักสลัดได้ตามเป้าหมาย แต่ค่า EER ที่ 0.73 BTU/h/W ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานของระบบทำความเย็นเชิงพาณิชย์ทั่วไป (มักมีค่า EER อยู่ระหว่าง 8–12 BTU/h/W) อย่างมีนัยสำคัญ ถือเป็นประเด็นความท้าทายทางวิศวกรรม ค่า EER ที่ต่ำนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากการออกแบบเครื่องจักรที่ต้องให้ความสำคัญสูงสุดกับการรักษาโครงสร้างใบที่บอบบางของผลิตผล โดยต้องควบคุมความเร็วลมและรูปแบบการไหลเวียนของอากาศอย่างนุ่มนวลเพื่อป้องกันความบอบช้ำทางกล แทนที่จะมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเพียงอย่างเดียว ความท้าทายในการรักษาสมดุลระหว่างประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการควบคุมสภาวะแวดล้อมที่แม่นยำนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Song *et al.* (2008) ที่รายงานถึงข้อจำกัดของการจัดการพลังงานในระบบเครื่องทำความเย็นเฉพาะทาง นอกจากนี้ Zhang & Kacira (2020) ยังได้เน้นย้ำถึงความท้าทายในการปรับสมดุลระหว่างการใช้พลังงานกับคุณภาพของพืชผลในระบบปรับอากาศและระบายอากาศสำหรับโรงเรือนควบคุมสภาพแวดล้อม ดังนั้น ในอนาคตการปรับปรุงระบบโดยนำเทคโนโลยีควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

การปรับปรุงรูปแบบการไหลเวียนของอากาศ หรือการประยุกต์ใช้ระบบลดความชื้นร่วมด้วย อาจเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องต้นแบบ โดยควรประเมินผลร่วมกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์และการใช้พลังงานต่อหน่วยมวลผลิตผลเพื่อพิจารณาความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง

5.2.2 ผลของสภาวะการสลัดน้ำต่อการเกิดสีน้ำตาลระหว่างการเก็บรักษา

ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายแสดงให้เห็นว่า ผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิตำมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลต่ำกว่าชุดควบคุมที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แม้ว่าภายหลังการสลัดน้ำ ตัวอย่างจากทั้งสองสภาวะจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิเดียวกัน คือ 4°C ตลอดระยะเวลา 10 วันก็ตาม ความแตกต่างดังกล่าวอาจสัมพันธ์กับสภาวะที่ผลิตผลได้รับในช่วงหลังการล้างและก่อนการบรรจุ ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของการตอบสนองของเนื้อเยื่อภายหลังการตัดแต่ง โดยในการทดลองนี้ ทั้งสองสภาวะใช้ปริมาณตัวอย่าง ความเร็วรอบ 180 rpm และระยะเวลาการสลัดน้ำ 15 min เท่ากัน ปัจจัยหลักที่แตกต่างกันจึงเป็นการควบคุมอุณหภูมิระหว่างกระบวนการสลัดน้ำ โดยชุดทดลองใช้อุณหภูมิเฉลี่ย 18.0°C และอุณหภูมิกลับเฉลี่ย 22.3°C ขณะที่ชุดควบคุมดำเนินการภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องโดยไม่เปิดระบบทำความเย็น

การตัดแต่ง การเสียดสี และการกระทบกระเทือนของเนื้อเยื่อเป็นปัจจัยสำคัญที่กระตุ้นการเกิดสีน้ำตาลในผลิตผลตัดแต่ง เนื่องจากความเสียหายของโครงสร้างเซลล์ทำให้สารประกอบฟีนอลิกและเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชันมีโอกาสดำรงกันมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีบริเวณเนื้อเยื่อที่ได้รับความเสียหาย (He & Luo, 2007; Toivonen & Brummell, 2008) นอกจากนี้ Aquino-Bolaños & Mercado-Silva, (2004) รายงานความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) และเพอร์ออกซิเดส (POD) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และการพัฒนาของสีน้ำตาลในเนื้อเยื่อตัดแต่ง ขณะที่ Li *et al.* (2023) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของวิถีเมแทบอลิซึมฟีนิลโพรพานอยด์ (Phenylpropanoid metabolism) มีบทบาทสำคัญต่อการเกิดสีน้ำตาลของผักกาดหอมตัดแต่ง

การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลในช่วง 2 วันแรกของการเก็บรักษา โดยเฉพาะบริเวณรอยตัดและบริเวณที่ได้รับความเสียหายทางกล อาจเกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อบาดแผล (Wound response) ที่เกิดขึ้นภายหลังการตัดแต่ง Iakimova & Woltering (2018) รายงานว่า Fresh-cut lettuce ยังคงเกิดการตอบสนองของเนื้อเยื่อต่อบาดแผลและการเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสีน้ำตาลได้แม้เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิต่ำระหว่างการเก็บรักษาไม่สามารถยุติกระบวนการตอบสนองต่อบาดแผลได้ทั้งหมด ดังนั้น การจัดการสภาวะของผลิตผลในช่วงก่อนเข้าสู่การเก็บรักษาจึงอาจมีส่วนต่อระดับการเกิดสีน้ำตาลที่ตรวจพบในระยะต่อมา

การที่ชุดทดลองได้รับอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าสถานะแวดล้อมในระหว่างการสลัดน้ำ อาจช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและชีวเคมีในระยะแรกภายหลังการตัดแต่งก่อนที่ ผลผลิตจะเข้าสู่การเก็บรักษาที่ 4 °C ส่งผลให้การพัฒนาของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลในชุดทดลองมี แนวโน้มต่ำกว่าชุดควบคุมตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการ จัดการผลิตผลตัดแต่งที่ให้ความสำคัญกับการลดความเสียหายของเซลล์และการควบคุมสถานะ แวดล้อมภายหลังกระบวนการตัดแต่ง เพื่อชะลอการเปลี่ยนแปลงด้านสีและคุณภาพของผลิตผล (Toivonen & Brummell, 2008) นอกจากนี้ Zhou *et al.* (2004) รายงานว่าการเปลี่ยนแปลงของ สีและพื้นที่ผิวดินบนผิวผักสลัดสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณในการติดตามการเสื่อมคุณภาพของ ผักสลัดพร้อมใช้ระหว่างการเก็บรักษาได้

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ไม่ได้ตรวจวัดกิจกรรมของเอนไซม์ PPO, POD หรือฟีนอลอะ ลานินแอมโมเนียไลเอส (PAL) โดยตรง ดังนั้น จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าการลดลงของพื้นที่การเกิดสี น้ำตาลในชุดทดลองเป็นผลโดยตรงจากการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ดังกล่าว การอภิปรายกลไกใน งานวิจัยนี้จึงเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ของผลการทดลองกับกลไกที่มีรายงานในงานวิจัยที่ผ่านมา ผลการศึกษานี้สนับสนุนว่าการควบคุมสถานะอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการสลัดน้ำก่อนการบรรจุมี ศักยภาพในการชะลอการพัฒนาของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ระหว่างการ เก็บรักษา ทั้งนี้ การศึกษาในอนาคตควรตรวจวัดกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสีน้ำตาล ร่วมกับตัวชี้วัดทางกายภาพและชีวเคมีอื่น เพื่อยืนยันกลไกที่เกี่ยวข้องกับผลของการควบคุมอุณหภูมิ ระหว่างกระบวนการสลัดน้ำให้ชัดเจนยิ่งขึ้น

ทั้งนี้ การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นการประเมินสมรรถนะของระบบทำความเย็นและการ เปลี่ยนแปลงของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาล โดยไม่ได้ตรวจวัดปริมาณน้ำส่วนเกินบนพื้นผิวหรือร้อยละการ ลดลงของมวลก่อนและหลังการสลัดน้ำโดยตรง ดังนั้น การศึกษาครั้งต่อไปควรประเมินประสิทธิภาพ การกำจัดน้ำเชิงปริมาณร่วมกับการสูญเสียมวล คุณภาพของผลิตผล และการใช้พลังงาน เพื่อให้ สามารถประเมินสมรรถนะของเครื่องได้อย่างครอบคลุมยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภายใต้ การสนับสนุนของมูลนิธิโครงการหลวงและศูนย์สนับสนุนโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ วิสาหกิจชุมชนผักปลอดภัยจากสารพิษ ตำบลเกาะตาเลี้ยง อำเภอสรีสาโรง จังหวัดสุโขทัย ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบทางการเกษตร ตลอดจนให้ความร่วมมือ และการสนับสนุนอย่างดียิ่งตลอดการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- เอกรัฐ ชะอุ่มเอียด, และเดือนแรม แพ่งเกี่ยว. (2565). การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมการทำงานของเครื่องสลัดน้ำผักสดตัดแต่งชนิดผักใบด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง. **วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 15(3), 57-70.
- Aekram, S., Prompuge, W., Wongkhunkaew, P., Samosorn, B., Doncomephang, W., Treerat, N., & Kanjanna, B. (2024). Image processing algorithm for area determination of irregularity quality in leafy green salad. **Food Agricultural Sciences and Technology**, 10(1), 29-41. Doi: 10.14456/fast.2024.3
- Aquino-Bolaños, E. N., & Mercado-Silva, E. (2004). Effects of polyphenol oxidase and peroxidase activity, phenolics and lignin content on the browning of cut jicama. **Postharvest Biology and Technology**, 33(3), 275-283. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2004.03.009
- Bhatia, V., Nag, R., Burgess, C. M., Gaffney, M., Celayeta, J. M. F., & Cummins, E. (2024). Microbial risks associated with ready-to-eat fresh produce (RTEFP)–A focus on temperate climatic conditions. **Postharvest Biology and Technology**, 213, 112924. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2024.112924
- Bolin, H. R., & Huxsoll, C. C. (1991). Effect of preparation procedures and storage parameters on quality retention of salad-cut lettuce. **Journal of Food Science**, 56(1), 60-62. Doi: 10.1111/j.1365-2621.1991.tb07975.x
- He, Q., & Luo, Y. (2007). Enzymatic browning and its control in fresh-cut produce. **Stewart Postharvest Review**, 3(6), 1-7. Doi: 10.2212/spr.2007.6.3
- Iakimova, E. T., & Woltering, E. J. (2018). The wound response in fresh-cut lettuce involves programmed cell death events. **Protoplasma**, 255(4), 1225-1238. Doi: 10.1007/s00709-018-1228-y
- Li, X., Zhang, S., Wang, Q., & Dong, T. (2023). Diacetyl inhibits the browning of fresh-cut stem lettuce by regulating the metabolism of phenylpropane and antioxidant ability. **Foods**, 12(4), 740. Doi: 10.3390/foods12040740
- Luna, M. C., Tudela, J. A., Tomás-Barberán, F. A., & Gil, M. I. (2016). Modified atmosphere (MA) prevents browning of fresh-cut romaine lettuce through multi-target effects

- related to phenolic metabolism. **Postharvest Biology and Technology**, 119, 84-93. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2016.05.001
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2014). **Introduction to food engineering** (5th ed.). Amsterdam: Elsevier, Academic Press.
- Song, Y.-H., Akashi, Y., & Yee, J.-J. (2008). A study on the energy performance of a cooling plant system: Air-conditioning in a semiconductor factory. **Energy and Buildings**, 40(8), 1521-1528. Doi: 10.1016/j.enbuild.2008.02.003
- Toivonen, P. M. A., & Brummell, D. A. (2008). Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables. **Postharvest Biology and Technology**, 48(1), 1-14. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2007.09.004
- Zhang, Y., & Kacira, M. (2020). Comparison of energy use efficiency of greenhouse and indoor plant factory system. **European Journal of Horticultural Science**, 85(5), 310-320. Doi: 10.17660/eJHS.2020/85.5.2
- Zhou, T., Harrison, A. D., McKellar, R. C., Young, J. C., Odumeru, J. A., Piyasena, P., Lu, X., Mercer, D. G., & Karr, S. (2004). Determination of acceptability and shelf life of ready-to-use lettuce by digital image analysis. **Food Research International**, 37(9), 875-881. Doi: 10.1016/j.foodres.2004.05.005

การวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการยศาสตร์ของแรงงานก่อสร้างโดยวิธี PATH
กรณีศึกษา บริษัท จัวนเซ่ง มิลเลียนแนร์ กรุ๊ป จำกัด
ERGONOMIC RISK ANALYSIS OF CONSTRUCTION WORKERS USING
THE PATH METHOD: A CASE STUDY OF NGUAN SENG
MILLIONAIRE GROUP CO., LTD.

ฤดี นิยมรัตน์*, ปริณวัฒน์ ธนศิริเอียรชัย, ไสว ศิริทองถาวร, วรทยา ขุนนาค
Ruedee Niyomrath*, Parinwat Thanasirathirachai, Sawai Siritongthaworn,
Warattaya Kumnak

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10300
Faculty of Engineering and Industrial Technology, Suansunandha Rajabhat University, Dusit,
Bangkok, Thailand, 10300

*Corresponding author e-mail: reudee.ni@ssru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 11 กรกฎาคม 2569
วันที่แก้ไขบทความ 27 สิงหาคม 2569
วันที่ตอบรับบทความ 28 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบาดเจ็บของแรงงานก่อสร้างและเพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการยศาสตร์ของแรงงานก่อสร้าง บริษัท จัวนเซ่ง มิลเลียนแนร์ กรุ๊ป จำกัด กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาการบาดเจ็บจำนวน 30 คน ใช้การเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจงจากแรงงานก่อสร้างทั้งหมดที่ทำงานในโครงการก่อสร้างบ้านพักอาศัย ในเขตคลองเตย กรุงเทพมหานคร สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ความเสี่ยงทางการยศาสตร์ เป็นแรงงานก่อสร้าง 4 กลุ่มงาน ได้แก่ งานกระเบื้อง งานไฟฟ้า งานฝ้าและสี และงานติดตั้งบัวภายนอก ที่ใช้การสุ่มกลุ่มตัวอย่างแบบบังเอิญรวมจำนวน 19 คน เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการบาดเจ็บของแรงงานก่อสร้าง เป็นแบบสอบถามที่ปรับปรุงมาจากแบบสอบถามมาตรฐานชนิดตอบเอง ที่มีค่าความเชื่อมั่น ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค 0.843 การวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการยศาสตร์ของแรงงานก่อสร้าง โดยการบันทึกเวลาที่ใช้ในการทำงาน ที่พิจารณาจากท่าทาง กิจกรรม เครื่องมือ และการขนย้าย ตามวิธี PATH ผลการวิจัยพบว่า แรงงานก่อสร้างมีการบาดเจ็บในช่วง 7 วันและ 12 เดือนที่ผ่านมา มากที่สุดบริเวณมือ/ข้อมือ หลังส่วนล่าง หลังส่วนบน ไหล่ และคอ แรงงานทั้งหมดมีพฤติกรรมการทำงานที่ต้องเพ่งสายตาดูจอเป็นเวลานานและใช้มือหรือแขนเคลื่อนไหวซ้ำๆ ขณะที่แรงงานส่วนมากมีพฤติกรรมเอื้อมจับ บิดตัว ยกของหนัก และทำงานในท่าทางเกร็งคงที่เป็นเวลานาน ผลการประเมินด้วยวิธี PATH พบว่า ทุกกลุ่มงานมีการใช้ท่าทางผิดธรรมชาติ โดยเฉพาะท่าทางของลำตัว/หลัง ท่าทางของขา แขนส่วนบน (ไหล่) และท่าทางของคอ ข้อค้นพบนี้สามารถนำไปกำหนดมาตรการลดความเสี่ยง

ทางการยศาสตร์ การอบรมให้ความรู้ด้านการยศาสตร์และความปลอดภัยในการทำงาน รวมทั้งการปรับปรุงวิธีการทำงานและขั้นตอนการทำงาน

คำสำคัญ: ความเสี่ยงทางการยศาสตร์, ท่าทางการทำงาน, การบาดเจ็บจากการทำงาน, แรงงานก่อสร้าง, วิธี PATH

Abstract

This research aims to study the injuries of construction workers and to analyze the ergonomic risks of construction workers at Nguan Seng Millionaire Group Co., Ltd. The sample group used for the injury study consisted of 30 people, selected specifically from all construction workers involved in the residential construction project in the Khlong Toei district of Bangkok. For the sample group used to analyze ergonomic risks, it consists of construction workers from four job categories: tile work, electrical work, ceiling and painting work, and exterior molding installation. An accidental random sampling method was used to select a group of 19 people. The instrument used to study construction workers' injuries was a questionnaire adapted from the standardized Nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms, with a reliability coefficient (Cronbach's alpha) of 0.843. Ergonomic risk analysis of construction workers by recording the time spent on tasks, considering posture, activities, tools, and handling according to the PATH method. The research findings revealed that construction workers sustained injuries in the past 7 days and 12 months, primarily in the hands/wrists, lower back, upper back, shoulders, and neck. All workers exhibited work behaviors requiring prolonged visual concentration and repetitive hand or arm movements, while most engaged in reaching, twisting, lifting heavy objects, and working in fixed tense postures for extended periods. The PATH assessment found that all work groups exhibited unnatural postures, particularly in the torso/back, legs, upper arms (shoulders), and neck. This finding can be used to establish measures to reduce ergonomic risks, provide training on ergonomics and workplace safety, as well as improve work methods and procedures.

Keywords: Ergonomic risk, Working postures, Occupational injury, Construction workers, PATH method

1. บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นแหล่งจ้างงานสำคัญของประเทศไทย โดยมีจำนวนแรงงานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง 2.35 ล้านคน (ข้อมูลเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2567) (Market Research Thailand, 2024) อย่างไรก็ตามงานก่อสร้างถือเป็นงานที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดอุบัติเหตุและการบาดเจ็บ แรงงานในภาคการก่อสร้างเป็นแรงงานทั่วไปที่ต้องใช้แรงกายในการทำงานภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงสูง เช่น การทำงานที่สูง การยกของหนัก การทำงานในพื้นที่จำกัด หรือการสัมผัสกับฝุ่นและเสียงดัง เสี่ยงต่ออุบัติเหตุและการบาดเจ็บจากเครื่องจักร เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงปัจจัยด้านสภาพอากาศ เช่น ความร้อน ความชื้น หรือฝน ซึ่งอาจทำให้เกิดความล้าและลดความสามารถในการควบคุมเครื่องมือได้อย่างปลอดภัย อีกทั้งยังมีความเสี่ยงจากการลื่นล้ม กระแทก หรือถูกวัสดุตกใส่ (กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน, 2566)

ปัจจัยเสี่ยงต่อการบาดเจ็บของแรงงานในภาคการก่อสร้างมาจากหลายสาเหตุ เช่น การขาดความรู้ ความเข้าใจ และทักษะด้านความปลอดภัยของแรงงาน การละเลยมาตรการป้องกันอุบัติเหตุ การสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันไม่ครบถ้วน รวมถึงการทำงานภายใต้แรงกดดันด้านเวลา ซึ่งอาจนำไปสู่ความประมาทและเพิ่มโอกาสในการเกิดอุบัติเหตุได้ (กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน, 2566) นอกจากนี้ท่าทางการทำงานที่ไม่เหมาะสม รวมทั้งการใช้เครื่องมือที่ไม่เหมาะสมกับสรีระของแรงงาน ยังส่งผลให้เกิดอาการปวดกล้ามเนื้อเรื้อรัง และลดประสิทธิภาพการทำงานได้ การนำแนวคิดด้านการยศาสตร์ (Ergonomics) มาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้าง เช่น การประเมินท่าทางการทำงาน การจัดสภาพแวดล้อมการทำงานให้เหมาะสม และการออกแบบเครื่องมือหรืออุปกรณ์ให้สอดคล้องกับสรีระของแรงงาน จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยลดความเสี่ยงด้านสุขภาพและอุบัติเหตุ ตลอดจนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานและคุณภาพชีวิตของแรงงานในระยะยาว (กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน, 2565)

ข้อมูลจากองค์การแรงงานระหว่างประเทศ (International Labour Organization, 2024) ระบุว่า งานก่อสร้างเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีอัตราการบาดเจ็บและเสียชีวิตจากการทำงานสูงที่สุดเมื่อเทียบกับภาคเศรษฐกิจอื่น โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา ที่มีกบประสบปัญหาด้านมาตรฐานความปลอดภัยและการบังคับใช้กฎหมายที่ยังไม่ทั่วถึง สาเหตุหลักของการบาดเจ็บและเสียชีวิตในงานก่อสร้างส่วนใหญ่เกิดจากพฤติกรรมการทำงานที่ไม่ปลอดภัยและการขาดระบบบริหารและจัดการความปลอดภัยที่มีประสิทธิภาพในสถานที่ก่อสร้าง (สำนักงานประกันสังคม, 2567) การบาดเจ็บหรือเสียชีวิตของแรงงานไม่เพียงสร้างความสูญเสียต่อบุคลากรและครอบครัว แต่ยังส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงการก่อสร้าง ต้นทุนทางเศรษฐกิจ และภาพลักษณ์ของอุตสาหกรรมก่อสร้างโดยรวม ดังนั้นการศึกษาปัญหาอุบัติเหตุและการบาดเจ็บของแรงงานก่อสร้างจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

การศึกษาปัญหาการทำงานของแรงงานก่อสร้าง สามารถใช้การประเมินทางกายศาสตร์ (Ergonomic assessment) ที่เป็นขั้นตอนของการวิเคราะห์ท่าทางวิธีการทำงาน เพื่อให้ได้ข้อมูลปัจจัยเสี่ยงที่เกิดขึ้นกับผู้ปฏิบัติงาน นำไปใช้ในการออกแบบและปรับปรุงงานให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ลักษณะการประเมินด้านการยศาสตร์โดยทั่วไปจะประเมินตามภาระงานและลักษณะการใช้แรงของกล้ามเนื้อของผู้ปฏิบัติงาน มีวิธีการประเมินที่หลากหลายแตกต่างกันตามลักษณะการทำงาน สำหรับการประเมินด้านการยศาสตร์ของแรงงานก่อสร้าง พบว่ามีการใช้วิธี RULA (Rapid Upper Limb Assessment) (Adi *et al.*, 2023) ที่เน้นการประเมินท่าทางการเคลื่อนไหวของร่างกายส่วนบน (งานด้านการยศาสตร์ในประเทศไทย, 2557) ใช้วิธี REBA (Rapid Entire Body Assessment) (Mishra & Satapathy, 2021; Anagha & Xavier, 2022) ที่เหมาะสำหรับการประเมินส่วนต่างๆ ของร่างกายสำหรับงานที่มีลักษณะเปลี่ยนท่าทางอย่างรวดเร็วหรืองานที่ไม่อยู่กับที่ งานที่ไม่นั่งหรือยืนปฏิบัติงานในท่าทางเดิมๆ ซ้ำๆ ตลอดเวลา (งานด้านการยศาสตร์ในประเทศไทย, 2557) รวมทั้งใช้วิธี REBA และวิธี RULA (Kibria, 2023)

สำหรับลักษณะของกิจกรรมการทำงานในงานก่อสร้างมีความแตกต่างจากกิจกรรมในการทำงานในกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม โดยงานก่อสร้างมีลักษณะงานไม่ซ้ำเดิม หรือไม่สม่ำเสมอ มีการปรับเปลี่ยนท่าทางการทำงาน กิจกรรมแวดล้อม เครื่องมือที่ใช้ และการขนย้าย ซึ่งมีลักษณะงานเช่นเดียวกับงานเกษตรกรรม และงานเหมืองแร่ รวมทั้งลักษณะงานมีอุปสรรคของการเกิดความผิดปกติของระบบกล้ามเนื้อและโครงกระดูกที่เกี่ยวข้องกับการทำงานสูง การประเมินท่าทางการทำงานก่อสร้างในลักษณะงานไม่ซ้ำซาก จึงมีการออกแบบวิธีการประเมินท่าทางเรียกว่า วิธี PATH ที่ปรับปรุงท่าทางการทำงานจากแบบประเมินวิธี OWAS ร่วมกับการพิจารณากิจกรรมของแรงงาน การใช้เครื่องมือ ภาระการยก และลักษณะของการจับ (Buchholz *et al.*, 1996)

“PATH method” เป็นการวิเคราะห์อันตรายของงานจากท่าทาง (Posture) กิจกรรม (Activity) เครื่องมือ (Tools) และการขนย้าย (Handling) เป็นวิธีการประเมินความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัยที่มีเป้าหมายเพื่อระบุและลดอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ปฏิบัติงาน โดยการสังเกตแรงงานก่อสร้างโดยตรง การสังเกตท่าทางการทำงานจะถูกแบ่งตามขั้นตอนของกิจกรรมการก่อสร้างและการปฏิบัติงาน ผู้ประเมินสามารถกำหนดลักษณะท่าทางและสภาพแวดล้อมทางกายภาพของงานได้ ผลจากการประเมินสามารถนำมาใช้เพื่อระบุงานที่เป็นอันตรายต่อสรีระของแรงงานได้ ซึ่งพบว่าการประยุกต์ใช้เพื่อการประเมินและวิเคราะห์งานผู้ช่วยพยาบาลในสถานดูแลผู้สูงอายุ (Park *et al.*, 2009) การทำงานของแรงงานภาคเกษตร (Tonchoy *et al.*, 2026) โดยเฉพาะกิจกรรมต่างๆ ในงานก่อสร้าง เช่น การขนย้ายวัสดุ (Paquet *et al.*, 1999) งานเหล็ก (Forde & Buchholz, 2004) งานติดตั้งผนังแผ่นเรียบ (Yuan *et al.*, 2016) งานปูพื้น (Jing & Fulmer, 2009) เป็นต้น

บริษัท จัวันเซ้ง มิลเลียนแนร์ กรุ๊ป จำกัด ดำเนินธุรกิจรับเหมาก่อสร้างอาคาร ซ่อมแซมและปรับปรุงอาคาร ให้บริการงานก่อสร้างได้แก่ สำรวจและวิเคราะห์ความต้องการของลูกค้า วิเคราะห์พื้นที่และงบประมาณ ออกแบบโครงการ ออกแบบสถาปัตยกรรม วิศวกรรม และระบบงานต่างๆ พร้อมรับเขียนแบบและประเมินราคาเบื้องต้น ครอบคลุมงานระบบฐานราก โครงสร้างอาคาร (Structural) งานสถาปัตยกรรม (Architectural) ระบบวิศวกรรมต่างๆ งานวัสดุอุปกรณ์ จัดซื้อและโลจิสติกส์ที่เกี่ยวข้องกับโครงการก่อสร้าง ในปี พ.ศ.2568 บริษัทมีการรับเหมาก่อสร้างอาคารที่พักอาศัย จำนวน 5 โครงการ มีจำนวน 1 โครงการที่อยู่ระหว่างการปรับพื้นที่ยังไม่เริ่มดำเนินการก่อสร้าง และจำนวน 4 โครงการที่แล้วเสร็จอยู่ระหว่างการตกแต่ง แต่ละโครงการจึงเป็นงานสถาปัตยกรรมครอบคลุม 4 กลุ่มงานคือ งานกระเบื้อง งานไฟฟ้า งานฝ้าและสี และงานติดตั้งบัวภายนอก มีแรงงานโครงการละ 27-30 คน รวมแรงงานทั้งหมด 117 คน (บริษัท จัวันเซ้ง มิลเลียนแนร์ กรุ๊ป จำกัด, 2568)

การทำงานก่อสร้างได้รับการยอมรับว่าเป็นงานหนัก ต้องใช้ร่างกายเพื่อก่อสร้างในการทำงาน ทั้งการยก และเคลื่อนย้ายวัสดุต่างๆ ที่เป็นเหตุให้เกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อและกระดูกทั้งแบบฉับพลันและแบบสะสม นำไปสู่การหยุดงาน เป็นผลกระทบทั้งในระดับตัวบุคคลและครัวเรือน รวมทั้งผลกระทบต่อผู้นำจ้าง และลูกค้า ซึ่งเป็นผลกระทบในวงกว้าง ดังนั้นหากสามารถหาแนวทางในการป้องกันการบาดเจ็บกล้ามเนื้อและกระดูกอันเนื่องมาจากการทำงานก่อสร้างได้ จะช่วยให้ผู้ใช้แรงงานในอุตสาหกรรมก่อสร้างมีความปลอดภัยในการทำงานเพิ่มมากขึ้น การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบาดเจ็บของแรงงานก่อสร้าง และวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการยศาสตร์ของแรงงานก่อสร้าง บริษัท จัวันเซ้ง มิลเลียนแนร์ กรุ๊ป จำกัด ผลของการศึกษาวิจัยสามารถใช้ค้นหาแนวทางในการป้องกันการบาดเจ็บกล้ามเนื้อและกระดูกอันเนื่องมาจากการทำงานก่อสร้าง เป็นแนวทางในการปรับปรุงระบบความปลอดภัย พัฒนาแนวทางการป้องกัน และยกระดับคุณภาพชีวิตของแรงงานในอุตสาหกรรมก่อสร้างให้มีความปลอดภัย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้แรงงานและผู้เกี่ยวข้องต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาการบาดเจ็บของระบบโครงร่างกระดูกและกล้ามเนื้อของแรงงานก่อสร้าง
- 2.2 เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการยศาสตร์ของแรงงานก่อสร้าง

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

3.1.1 ประชากรที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้แก่แรงงานก่อสร้าง บริษัท จัวันเซ้ง มิลเลียนแนร์ กรุ๊ป จำกัด จำนวน 117 คน

3.1.2 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาการบาดเจ็บ ใช้การเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจง (Purposive sampling) จากแรงงานก่อสร้างทั้งหมดจำนวน 30 คน ที่ทำงานในโครงการที่อยู่ระหว่างการดำเนินงาน ได้แก่ แรงงานก่อสร้างของโครงการบ้านพักอาศัย ตั้งอยู่ที่ซอยสุขุมวิท 26 แขวงคลองตัน เขตคลองเตย กรุงเทพมหานคร

3.1.3 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ได้แก่ แรงงานก่อสร้างที่เป็นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาการบาดเจ็บ โดยใช้การสุ่มตัวอย่างแบบบังเอิญ (Accidental sampling) โดยเลือกจากแรงงานก่อสร้างที่มาปฏิบัติงานในวันที่เริ่มเก็บข้อมูล มีสัญชาติไทย และยินยอมร่วมเป็นกลุ่มตัวอย่างของการวิจัย ได้จำนวน 19 คน แบ่งเป็น 4 กลุ่มงาน ได้แก่ งานกระเบื้องงานไฟฟ้า งานฝ้าและสี และงานติดตั้งบัวภายนอก

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนแรงงานก่อสร้าง บริษัท จัวนเซ้ง มิลเลียนแนร์ กรุ๊ป จำกัด จำแนกตามกลุ่มงาน และกลุ่มตัวอย่างของการวิจัย

กลุ่มงาน	บ้านพักอาศัย	บ้านพักอาศัย	บ้านพักอาศัย	บ้านพักอาศัย	กลุ่มตัวอย่าง	
	เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ	เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ	อำเภอบ้านโป่ง ราชบุรี	เขตคลองเตย กรุงเทพฯ	ศึกษาการ บาดเจ็บ	วิเคราะห์ ความเสี่ยง
กระเบื้อง	5	4	5	4	4	4
ไฟฟ้า	5	4	7	6	6	5
ฝ้าและสี	14	14	12	13	13	5
ติดตั้งบัวภายนอก	6	5	6	7	7	5
รวม	30	27	30	30	30	19

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 การศึกษาการบาดเจ็บของแรงงานก่อสร้าง เป็นการศึกษาการบาดเจ็บกล้ามเนื้อและกระดูกอันเนื่องมาจากการทำงาน (Work-related musculoskeletal disorder, WMDs) ของแรงงานก่อสร้าง โดยใช้แบบสอบถามที่ปรับปรุงมาจากแบบสอบถามมาตรฐานชนิดตอบเอง The standardized Nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms (Kuorinka *et al.*, 1987) เพื่อใช้สอบถามลักษณะการทำงานและอาการบาดเจ็บของระบบโครงร่างกระดูกและกล้ามเนื้อ การตอบแบบสอบถามโดยให้แรงงานก่อสร้างเป็นผู้ให้ข้อมูลเอง ร่วมกับการสังเกตและสัมภาษณ์ แบบสอบถามประกอบด้วยข้อคำถาม 3 ตอนดังนี้



ตอนที่ 1 ด้านข้อมูลทั่วไป ลักษณะการตอบเป็นแบบตรวจสอบรายการ (Checklist) จำนวน 7 ข้อ ประกอบด้วย สัญชาติ เพศ อายุ สถานภาพสมรส ระดับการศึกษา กลุ่มงานที่ทำ และ ประสบการณ์การทำงาน

ตอนที่ 2 ด้านการเกิดการบาดเจ็บ ลักษณะการตอบเป็นแบบเลือกคำตอบระหว่าง ใช่ หรือ ไม่ใช่ สำหรับอาการบาดเจ็บร่างกายส่วนต่าง ๆ ทั้งหมด 12 ส่วน ในรอบ 12 เดือน และ 7 วันที่ผ่านมา รวมทั้งการป้องกันการบาดเจ็บ และการรักษาอาการบาดเจ็บ

ตอนที่ 3 ด้านพฤติกรรมการทำงานที่มีผลต่อการเกิดการบาดเจ็บ ลักษณะการตอบเป็นแบบตรวจสอบรายการโดยระบุคำตอบ ใช่ หรือ ไม่ใช่ รวม 25 ข้อ

แบบสอบถามมีค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of item objective congruence, IOC) (Rovinelli & Hambleton, 1977) ตามความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญอยู่ระหว่าง 0.67-1.00 และมีค่าความเชื่อมั่น (Reliability) โดยใช้วิธีหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's alpha coefficient) (Cronbach, 1951) เท่ากับ 0.843

3.2.2 การวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการยศาสตร์ของแรงงานก่อสร้าง โดยการบันทึกเวลาที่ใช้ในการทำงาน ที่พิจารณาจากท่าทาง กิจกรรม เครื่องมือ และการขนย้าย ตามวิธี PATH (PATH method) ของแรงงานก่อสร้างจำนวน 4 กลุ่มงาน จำนวนกลุ่มละ 4-5 คน ด้วยการสังเกตการทำงาน คนละ 3 ครั้ง ครั้งละ 1 นาที โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการประเมิน 4 ด้าน ได้แก่

3.2.2.1 ด้านท่าทางการทำงาน (Posture) ประกอบด้วย ท่าทางของลำตัว/หลัง ท่าทางของขา แขนส่วนบน (ไหล่) แขนส่วนล่าง (ข้อศอก) และท่าทางของคอ

3.2.2.2 ด้านกิจกรรม (Activity) ได้แก่ การใช้มือ ระดับของการเคลื่อนไหวของมือ การสั่นสะเทือน ระดับเสียง และงานย่อย

3.2.2.3 ด้านเครื่องมือที่ใช้ในการทำงาน (Tools) ได้แก่ การใช้แรง และเครื่องมือที่ใช้

3.2.2.4 ด้านการขนย้ายวัสดุ/อุปกรณ์ (Handling) ได้แก่ การขนย้าย และการเคลื่อนย้ายด้วยมือ

3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1 การศึกษาการบาดเจ็บของแรงงานก่อสร้าง เก็บข้อมูลและวิเคราะห์แบบสอบถามโดยสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ความถี่ (Frequency, F) และร้อยละ (Percentage, %)

3.3.2 การวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการยศาสตร์ โดยการวิเคราะห์การทำงานของแรงงานแต่ละคน ของแต่ละกลุ่มกิจกรรม หาผลรวมของเวลาที่แรงงานแต่ละกลุ่มงานใช้ในแต่ละข้อ/ประเด็น และคำนวณสัดส่วนร้อยละของเวลาในการทำงานดังนี้

3.3.2.1 ด้านท่าทางการทำงาน คำนวณสัดส่วนของเวลาระหว่างเวลาที่ใช้ส่วนของร่างกายในการทำงานด้วยท่าทางปกติและเวลาที่ทำงานด้วยท่าทางผิดปกติ

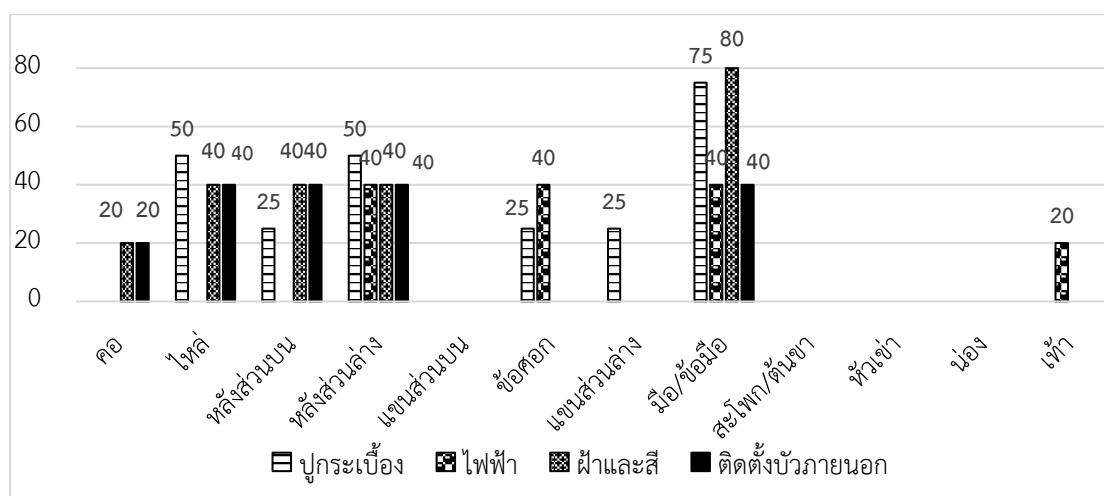
3.3.2.2 ด้านกิจกรรม ด้านเครื่องมือที่ใช้ในการทำงาน และด้านการขนย้ายวัสดุ/อุปกรณ์ คำนวณสัดส่วนร้อยละของเวลาที่ใช้ในแต่ละส่วนย่อย

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาการบาดเจ็บของแรงงานก่อสร้าง

4.1.1 ด้านข้อมูลทั่วไป พบว่า แรงงานส่วนมากมีสัญชาติ ไทย (19 คน ร้อยละ 63.3) ส่วนที่เหลือเป็นเมียนมา (11 คน ร้อยละ 36.7) ส่วนมากเป็นเพศชาย (26 คน ร้อยละ 86.7) มีอายุระหว่าง 22-29 ปี (15 คน ร้อยละ 50.0) รองลงมาคืออายุ 30-37 ปี และ 38-45 ปี ตามลำดับ (ร้อยละ 26.7 และ 23.3) สถานภาพสมรส (18 คน ร้อยละ 60.0) สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น (19 คน ร้อยละ 63.3) และมีประสบการณ์ทำงาน 1-2 ปี (ร้อยละ 56.6) รองลงมาคือประสบการณ์ 3-5 ปี และมากกว่า 5 ปี ตามลำดับ (ร้อยละ 23.3 และ 20)

4.1.2 ด้านการเกิดการบาดเจ็บ พบว่า แรงงานส่วนมากไม่เกิดการบาดเจ็บในช่วง 7 วันที่ผ่านมา มีจำนวนน้อย (ร้อยละ 30.0) ที่เกิดการบาดเจ็บที่มือและข้อมือ สำหรับการเกิดการบาดเจ็บในช่วง 12 เดือนที่ผ่านมา พบว่า แรงงานก่อสร้างส่วนมากบาดเจ็บบริเวณมือและข้อมือ (ร้อยละ 73.3) รองลงมาได้แก่ บาดเจ็บบริเวณหลังส่วนล่าง (ร้อยละ 60.0) และหลังส่วนบน (ร้อยละ 56.7) ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่า แรงงานก่อสร้างส่วนมากไม่มีการป้องกันการบาดเจ็บ และไม่มีการรักษาอาการบาดเจ็บในช่วง 12 เดือนที่ผ่านมา รายละเอียดตามตารางที่ 2 และแสดงร้อยละของแรงงานก่อสร้างที่เกิดการบาดเจ็บในช่วง 7 วันที่ผ่านมา จำแนกตามกลุ่มงานและส่วนของร่างกายที่ได้รับการบาดเจ็บ ตามภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ร้อยละของแรงงานก่อสร้างที่เกิดการบาดเจ็บในช่วง 7 วันที่ผ่านมา



ตารางที่ 2 จำนวนและร้อยละของแรงงานก่อสร้างจำแนกตามการเกิดการบาดเจ็บ (n=30)

ส่วนของ ร่างกาย	เกิดการบาดเจ็บ ในช่วง 7 วันที่ผ่านมา		เกิดการบาดเจ็บ ในช่วง 12 เดือนที่ผ่านมา		มีการป้องกัน การบาดเจ็บ		รักษาอาการบาดเจ็บ ช่วง 12 เดือน ที่ผ่านมา	
	ใช่	ไม่ใช่	ใช่	ไม่ใช่	ใช่	ไม่ใช่	ใช่	ไม่ใช่
	จำนวน	จำนวน	จำนวน	จำนวน	จำนวน	จำนวน	จำนวน	จำนวน
	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)	(ร้อยละ)
1. คอ	2 (6.7)	28 (93.3)	12 (40.0)	18 (60.0)	3 (10.0)	27 (90.0)	-	30 (100.0)
2. ไหล่	6 (20.0)	24 (80.0)	10 (33.3)	20 (66.7)	5 (16.7)	25 (83.3)	-	30 (100.0)
3. หลังส่วนบน	5 (16.7)	25 (83.3)	17 (56.7)	13 (43.3)	6 (20.0)	24 (80.0)	2 (6.7)	28 (93.3)
4. หลังส่วนล่าง	8 (26.7)	22 (73.3)	18 (60.0)	12 (40.0)	8 (26.7)	22 (73.3)	3 (10.0)	27 (90.0)
5. แขนส่วนบน	-	30 (100.0)	6 (20.0)	24 (80.0)	3 (10.0)	27 (90.0)	1 (3.3)	29 (96.7)
6. ข้อศอก	2 (6.7)	28 (93.3)	10 (33.3)	20 (66.7)	2 (6.7)	28 (93.3)	-	30 (100.0)
7. แขนส่วนล่าง	1 (3.3)	29 (96.7)	7 (23.3)	23 (76.7)	2 (6.7)	28 (93.3)	1 (3.3)	29 (96.7)
8. มือ/ข้อมือ	9 (30.0)	21 (70.0)	22 (73.3)	8 (26.7)	1 (3.3)	29 (96.7)	1 (3.3)	29 (96.7)
9. สะโพก/ต้นขา	-	30 (100.0)	1 (3.3)	29 (96.7)	-	30 (100.0)	-	30 (100.0)
10. หัวเข่า	-	30 (100.0)	2 (6.7)	28 (93.3)	1 (3.3)	29 (96.7)	-	30 (100.0)
11. น่อง	-	30 (100.0)	-	30 (100.0)	-	30 (100.0)	-	30 (100.0)
12. เท้า	1 (3.3)	29 (96.7)	1 (3.3)	30 (96.7)	1 (3.3)	29 (96.7)	-	30 (100.0)

4.1.3 ด้านพฤติกรรมการทำงานที่มีผลต่อการเกิดการบาดเจ็บ ผลการศึกษาพบว่า แรงงานก่อสร้างทั้งหมด (ร้อยละ 100.0) มีการทำงานที่ต้องเพ่งสายตาคจดจ่อเป็นอย่างมากต่อเนื่องเป็นเวลา 3-5 นาที ต้องใช้มือหรือแขนเคลื่อนไหวซ้ำกัน หรือเหมือนกันตลอดเวลา รวมทั้งทำงานในที่ที่มีสภาพแวดล้อมและอากาศไม่ปกติ (ร้อน หนาว ชื้น หรือเปียกฝน) นอกจากนี้ พบว่า แรงงานส่วนมาก (ร้อยละ 90.0) ต้องเอื้อมมือหยิบจับสิ่งของหรือเครื่องมือเป็นประจำ ต้องบิดตัวหรือเอี้ยวตัวเป็นประจำ ต้องใช้มือหรือแขนเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็ว และขณะทำงานมีการยกของที่มีน้ำหนักมากกว่า 10 กิโลกรัมบ่อยๆ รายละเอียดตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 จำนวนและร้อยละของแรงงานก่อสร้างจำแนกตามพฤติกรรมการทำงานที่มีผลต่อการเกิดการบาดเจ็บ (n=30)

พฤติกรรมการทำงาน	ใช่ จำนวน (ร้อยละ)	ไม่ใช่ จำนวน (ร้อยละ)
1. ทำงานอยู่ในตำแหน่งหรือจุดใด จุดหนึ่งที่คงที่เป็นเวลามากกว่า 20 นาที	12 (40.0)	18 (60.0)
2. ท่าทางในการทำงานมีผลต่อการเจ็บปวดของระบบโครงร่างกระดูกและกล้ามเนื้อ	4 (13.3)	26 (86.7)
3. ลักษณะการทำงานทำให้ต้องอยู่ในท่าทางที่เกร็งกล้ามเนื้อคงที่เป็นเวลานาน หรือต้องออกแรงต่อเนื่องเป็นเวลา 3-5 นาที	26 (86.7)	4 (13.3)
4. ลักษณะงานที่ทำจะต้องออกแรงมากกว่าปกติอยู่ตลอดเวลา	22 (73.3)	8 (26.7)
5. ลักษณะงานที่ทำอยู่ในปัจจุบันสายตาต้องเพ่ง จดจ่อเป็นอย่างมากต่อเนื่องเป็นเวลา 3-5 นาที	30 (100.0)	-
6. ลักษณะงานที่ทำก่อให้เกิดความเครียดเป็นอย่างมาก	-	30 (100.0)
7. ต้องยืนทำงานเป็นเวลามากกว่าครึ่งหนึ่งของเวลาทำงานทั้งหมด	17 (56.7)	13 (43.3)
8. ต้องเอื้อมมือหยิบจับสิ่งของหรือเครื่องมือเป็นประจำ	27 (90.0)	3 (10.0)
9. ต้องบิดตัวหรือเอี้ยวตัวเป็นประจำ	27 (90.0)	3 (10.0)
10. ต้องลงน้ำหนักของตัวไปข้างใดข้างหนึ่ง หรืออยู่ในท่าที่ไม่สมดุลเป็นประจำ	21 (70.0)	9 (30.0)
11. ต้องนั่งทำงานเป็นเวลามากกว่าครึ่งหนึ่งของเวลาทำงานทั้งหมด	13 (43.3)	17 (56.7)
12. ต้องนั่งยองๆ ในการทำงานเป็นประจำ	9 (30.0)	21 (70.0)
13. ต้องใช้มือหรือแขนเคลื่อนไหวซ้ำกัน หรือเหมือนกันตลอดเวลา	30 (100.0)	-
14. ต้องใช้มือหรือแขนเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็ว	27 (90.0)	3 (10.0)
15. ต้องออกแรงในการบีบหรือจับของด้วยมือ	22 (73.3)	8 (26.7)
16. ขณะทำงานมีการยกของที่มีน้ำหนักมากกว่า 30 กิโลกรัม	11 (36.7)	19 (63.3)
17. ขณะทำงานมีการยกของที่มีน้ำหนักมากกว่า 10 กิโลกรัม บ่อยๆ	27 (90.0)	3 (10.0)



พฤติกรรมการทำงาน	ใช่	ไม่ใช่
	จำนวน (ร้อยละ)	จำนวน (ร้อยละ)
18. ของที่ยกมีลักษณะเป็นก้อนใหญ่เทอะทะ ไม่มันคง และไม่มีที่จับ ถือลำบาก	12 (40.0)	18 (60.0)
19. ต้องยกของห่างจากลำตัว	5 (16.7)	25 (83.3)
20. ต้องยกของอยู่เหนือไหล่ หรือมืออยู่ต่ำกว่าเข่า	7 (23.3)	23 (76.7)
21. ระยะเวลาทำงานยาวนานในแต่ละวัน	-	30 (100.0)
22. ใช้เครื่องมือที่มีน้ำหนักมากหรือสั่นสะเทือนในขณะทำงาน	9 (30.0)	21 (70.0)
23. ทำงานโดยไม่ผ่านการฝึกอบรม	3 (10.0)	27 (90.0)
24. ที่ทำงานร้อน หนาว ชื้น หรือเปียกฝน	30 (100.0)	-
25. ทำงานต่อเนื่องแม้ได้รับบาดเจ็บ	-	30 (100.0)

4.2 ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการยศาสตร์ของแรงงานก่อสร้าง

4.2.1 ด้านท่าทางการทำงาน พบว่า แรงงานก่อสร้างทั้ง 4 กลุ่มงาน มีสัดส่วนของเวลาที่ใช้ส่วนของร่างกายในการทำงานด้วยท่าทางผิดธรรมชาติสูงกว่าการใช้ท่าทางปกติ ทั้งท่าทางของลำตัว/หลัง ท่าทางของขา แขนส่วนบน (ไหล่) และท่าทางของคอ ยกเว้นแขนส่วนล่าง (ข้อศอก) ที่มีสัดส่วนของเวลาที่ใช้ส่วนของร่างกายในการทำงานด้วยท่าทางปกติสูงกว่า แสดงรายละเอียดตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สัดส่วนร้อยละของเวลาที่ใช้ส่วนของร่างกายในการทำงานด้วยท่าทางปกติและท่าทางผิดธรรมชาติ (n=19)

ส่วนของร่างกาย	งานกระเบื้อง		งานไฟฟ้า		งานฝ้าและสี		งานติดตั้งบัวภายนอก	
	ท่าทาง ท่าทางผิด		ท่าทาง ท่าทางผิด		ท่าทาง ท่าทางผิด		ท่าทาง ท่าทางผิด	
	ปกติ	ธรรมชาติ	ปกติ	ธรรมชาติ	ปกติ	ธรรมชาติ	ปกติ	ธรรมชาติ
1. ลำตัว/หลัง	13.20	86.80	25.81	74.19	20.91	79.09	22.94	77.06
2. ขา	25.84	74.16	38.70	61.30	43.02	56.98	40.76	59.24
3. แขนส่วนบน (ไหล่)	27.78	72.22	21.29	78.71	14.74	85.26	11.63	88.37
4. แขนส่วนล่าง (ข้อศอก)	80.00	20.00	64.50	35.50	57.71	42.29	60.42	39.58
5. คอ	15.79	84.21	35.50	64.50	29.80	70.20	26.72	73.28

4.2.2 ด้านกิจกรรม พบว่า แรงงานก่อสร้างทั้ง 4 กลุ่มงาน มีกิจกรรมในการทำงานที่พิจารณาจากการใช้มือ ระดับของการเคลื่อนไหวของมือ การสั่นสะเทือน ระดับเสียง และงานย่อยแบบกระจายหรือเคลื่อนไหวหลายท่าทาง แสดงรายละเอียดตามตารางที่ 5



ตารางที่ 5 สัดส่วนร้อยละเวลาของกิจกรรมในการทำงานของแรงงานก่อสร้าง (n=19)

กิจกรรม		งาน กระเบื้อง	งาน ไฟฟ้า	งาน ฝ้าและสี	งานติดตั้ง บัวภายนอก
1. มือ	ไม่ใช้มือ	1.98	4.36	22.54	2.76
	ใช้มือ 1 ข้าง (หยิบ จับ)	20.11	20.64	17.78	24.02
	ใช้มือ 2 ข้าง (หยิบ จับ)	28.33	17.44	13.65	21.26
	ใช้มือ 1 ข้าง (บีบ กด)	11.33	26.45	15.24	15.35
	ใช้มือ 2 ข้าง (บีบ กด)	15.86	10.17	6.98	17.32
	ใช้มือ 1 ข้าง : อื่นๆ (ผลัก ดัน ดึง)	9.07	14.53	8.57	8.66
	ใช้มือ 2 ข้าง : อื่นๆ (ผลัก ดัน ดึง)	13.31	6.40	15.24	10.63
2. ระดับ การ เคลื่อนไหว ของมือ	มือไม่ได้ใช้งานเกือบตลอดเวลา ไม่ได้ออกแรง สม่ำเสมอ	5.58	3.62	14.25	4.44
	ใช้มือสม่ำเสมอ ชัดเจน และได้หยุดนาน	29.44	18.12	16.41	27.11
	มือเคลื่อนไหวช้าๆ สม่ำเสมอ หยุดเป็นระยะ	20.81	23.55	30.02	19.56
	การเคลื่อนไหวคงที่ หยุดไม่บ่อย	16.24	26.81	4.75	24.89
	การเคลื่อนไหวที่รวดเร็วและสม่ำเสมอ ไม่มีการ หยุดเป็นระยะ	24.37	21.74	25.92	21.78
	การเคลื่อนไหวที่รวดเร็วมากและสม่ำเสมอ ต่อเนื่อง	3.55	6.16	8.64	2.22
3. การ สั่นสะเทือน	ไม่มี	78.63	80.00	41.76	83.23
	เป็นบางส่วน	21.37	20.00	32.94	16.77
	ทั้งร่างกาย	0.00	0.00	25.29	0.00
4. ระดับ เสียง	สามารถได้ยินเสียงบุคคลใกล้เคียงด้วยเสียงปกติ	69.12	62.87	49.48	75.66
	คนที่อยู่บริเวณใกล้เคียงต้องส่งเสียงให้ดังจึงจะได้ยิน	27.21	29.94	22.68	22.37
	คนที่อยู่บริเวณใกล้เคียงต้องตะโกนเพื่อให้ได้ยิน	3.68	7.19	27.84	1.97
5. งานย่อย	วาง นั่ง พัก รอ ดู	4.16	4.54	9.40	0.00
	เดิน	12.01	12.89	13.25	15.06
	ใช้เครื่องมือ (hand tool)	17.32	16.52	7.40	21.23
	ใช้เครื่องจักร (power tool)	5.77	9.07	5.70	8.64
	ถือเครื่องมือ (ไม่ได้ใช้งาน)	6.00	6.35	10.94	9.14
	เอื้อม หยิบ/จับ	13.86	10.89	5.08	16.30
	วัดระยะ	7.62	11.80	6.63	6.67
	ตัด ตัด	9.47	5.44	8.17	5.43



กิจกรรม	งาน กระเบื้อง	งาน ไฟฟ้า	งาน ฝ้าและสี	งานติดตั้ง บัวภายนอก
จัดเรียง แยก แบ่ง (Sort)	10.39	7.26	3.39	0.00
ปิ่น/ไต่	4.62	3.99	9.40	17.53
แกะ/แงะ	3.70	6.35	13.25	0.00
สวมถุงมือ	5.08	4.90	7.40	0.00

4.2.3 ด้านเครื่องมือที่ใช้ในการทำงาน พบว่า แรงงานก่อสร้างทั้ง 4 กลุ่มงานมีสัดส่วนเวลาของการใช้แรงเพื่อการยก แยก ลาก วัสดุ/อุปกรณ์ไม่หนักกว่า 50 กิโลกรัม ส่วนมากใช้แรงไม่เกิน 5 กิโลกรัม และใช้เครื่องมือเพื่อการทำงานที่แตกต่างตามลักษณะของกิจกรรม แสดงรายละเอียดตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สัดส่วนร้อยละเวลาของการใช้แรงและเครื่องมือที่ใช้ในการทำงานของแรงงานก่อสร้าง (n=19)

	เครื่องมือ	งาน กระเบื้อง	งาน ไฟฟ้า	งาน ฝ้าและสี	งานติดตั้งบัว ภายนอก
1. การใช้แรง	ไม่เกิน 5 กิโลกรัม	43.80	51.85	52.38	55.93
(ยก แยก ลาก)	มากกว่า 5-10 กิโลกรัม	29.93	29.63	30.16	29.66
	มากกว่า 10-20 กิโลกรัม	21.17	16.30	17.46	14.41
	มากกว่า 20-50 กิโลกรัม	5.11	2.22	0.00	0.00
	มากกว่า 50 กิโลกรัม	0.00	0.00	0.00	0.00
2. เครื่องมือที่ใช้	บันได	8.06	15.24	22.40	28.98
	เกรียงฉาบปูน	28.39	0.00	30.40	11.02
	ตลับเมตร	11.94	19.82	0.00	14.29
	ระดับน้ำ	9.35	0.00	10.80	20.41
	เลื่อย	2.26	0.00	0.00	0.00
	สว่าน	6.45	21.65	19.20	16.33
	คีม	1.61	15.24	0.00	0.00
	ไขควง	0.00	21.34	0.00	0.00
	ถังปูน	18.06	0.00	0.00	0.00
	แปรงทาสี แปรงน้ำ	0.00	0.00	17.20	0.00
	กระบะปูน	13.87	0.00	0.00	0.00
	ค้อน	0.00	6.71	0.00	8.98

4.2.4 ด้านการขนย้ายวัสดุ/อุปกรณ์ พบว่าแรงงานก่อสร้างทั้ง 4 กลุ่มงานมีสัดส่วนเวลาการเคลื่อนไหวเพื่อกิจกรรมการขนย้าย และการเคลื่อนย้ายด้วยมือ ลักษณะเดียวกัน มีเพียงกลุ่มงานกระเบื้องที่มีการขนย้ายวัสดุโดยใช้สองมือด้วยสัดส่วนเวลามากกว่าครึ่งหนึ่งของเวลาทั้งหมด (ร้อยละ 53.93) แสดงรายละเอียดตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สัดส่วนร้อยละเวลาของการขนย้ายในการทำงานของแรงงานก่อสร้าง (n=19)

การขนย้าย		งาน กระเบื้อง	งาน ไฟฟ้า	งาน ฝ้าและสี	งานติดตั้งบัว ภายนอก
1. การขนย้าย วัสดุด้วยมือ	ไม่มีการขนย้ายวัสดุด้วยมือ	10.11	27.54	27.43	29.07
	ใช้มือเดียว	35.96	43.48	34.86	35.47
	ใช้สองมือ	53.93	28.99	37.71	35.47
2. การ เคลื่อนย้าย วัสดุด้วยมือ	ไม่มี	5.96	25.00	16.17	17.68
	จับ ถือ	39.74	37.79	9.36	8.59
	ดัน ดึง	27.15	20.35	20.43	25.25
	ลาก เลื่อน	16.56	9.88	25.96	30.81
	หย่อน	10.60	6.98	28.09	17.68

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 ผลการศึกษาการบาดเจ็บของแรงงานก่อสร้าง พบว่า แรงงานก่อสร้างส่วนใหญ่มีอาการบาดเจ็บของระบบกล้ามเนื้อและกระดูกจากการทำงาน โดยบริเวณที่พบการบาดเจ็บมากที่สุด ได้แก่ มือ/ข้อมือ หลังส่วนล่าง หลังส่วนบน คอ และไหล่ ตามลำดับ สาเหตุสำคัญเกิดจากพฤติกรรมการทำงานที่มีผลต่อการเกิดการบาดเจ็บที่แรงงานต้องใช้มือหรือแขนเคลื่อนไหวซ้ำกันอย่างต่อเนื่อง ร่วมกับพฤติกรรมสนับสนุนอื่นๆ ได้แก่ ต้องเพ่งสายตาดูจ่อเป็นอย่างมากต่อเนื่อง ทำงานในที่ที่มีสภาพแวดล้อมและอากาศไม่ปกติ ต้องเอื้อมมือหยิบจับสิ่งของหรือเครื่องมือเป็นประจำอยู่เสมอ ต้องบิดตัวหรือเอี้ยวตัวเป็นประจำอยู่เสมอ ต้องใช้มือหรือแขนเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็ว และมีการยกของที่มีน้ำหนักมากกว่า 10 กิโลกรัมบ่อยๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ศึกษาอาการบาดเจ็บของแรงงานผูกเหล็กในโครงการก่อสร้าง ที่พบว่าแรงงานส่วนใหญ่มีอาการบาดเจ็บบริเวณหลังส่วนล่างและคอเป็นหลัก โดยมีสาเหตุจากการทำงานในท่าก้มงอและท่าซ้ำๆ เป็นเวลานาน (ศรัณยู และสิทธิชัย, 2024)

หากพิจารณาการเกิดอาการบาดเจ็บของแรงงานก่อสร้างในช่วง 7 วันที่ผ่านมา ที่พบว่าแรงงานในกลุ่มงานปูกระเบื้องและงานฝ้าและสี ได้รับการบาดเจ็บที่มือ/ข้อมือสูงที่สุด (ร้อยละ 75 และ

ร้อยละ 80 ของจำนวนแรงงานในกลุ่มงานนั้นๆ) โดยทั้งสองกลุ่มงานมีส่วนร้อยละเวลาของการขนย้ายในการทำงานด้วยสองมือสูงที่สุด ด้วยการจับ ถือ ลาก และเลื่อนวัสดุ มีการเคลื่อนไหวของมือที่รวดเร็วและสม่ำเสมอ ไม่มีการหยุดเป็นระยะ การเกิดอาการผิดปกติของระบบกล้ามเนื้อ เส้นเอ็น เส้นประสาท และข้อต่อ ที่เกิดจากการทำงานหรือมีอาการแย่ลงเนื่องจากสภาพแวดล้อม และลักษณะท่าทางในการทำงานนี้เรียกว่ากลุ่มโรค WMSDs (Work-related musculoskeletal disorders) ซึ่งเป็นอันตรายที่พบได้บ่อยที่สุดในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง โดยประเภทของ WMSDs ที่พบบ่อยที่สุดได้แก่ กลุ่มอาการอุโมงค์ข้อมือ (Carpal tunnel syndrome) เอ็นอักเสบ และถุงน้ำข้อมืออักเสบ โดยส่วนของร่างกายที่ได้รับผลกระทบจากอาการบาดเจ็บของระบบกล้ามเนื้อและกระดูกมากที่สุด ได้แก่ ไหล่ หลังส่วนล่าง คอ กระดูกสันหลัง และลำตัว (Vijayakumar & Choi, 2022)

มีผลการศึกษาเกี่ยวกับการบาดเจ็บของระบบกล้ามเนื้อและกระดูกของแรงงานก่อสร้างในหลายประเทศที่มีข้อค้นพบสอดคล้องกัน เช่น ในประเทศอินเดีย (Gayathri *et al.*, 2025) ได้ประเมินความชุกของโรคเกี่ยวกับระบบกล้ามเนื้อและกระดูก (WMSDs) ในกลุ่มแรงงานก่อสร้าง ที่พบว่าแรงงานอายุ 25-34 ปี มีอัตราการเกิดโรคเกี่ยวกับระบบกล้ามเนื้อและกระดูกสูงที่สุดโดยเฉพาะบริเวณคอ (ร้อยละ 28.5) และหลัง (ร้อยละ 22.5) งานที่ทำซ้ำๆ การยืนเป็นเวลานาน และท่าทางที่ไม่เหมาะสม เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดโรคนี้ และในประเทศอิหร่าน (Jazari *et al.*, 2018) พบว่าอัตราการเกิดการบาดเจ็บจากการทำงานของแรงงานก่อสร้างที่พบบ่อยที่สุดได้แก่ โรคเกี่ยวกับระบบกระดูกและกล้ามเนื้อ ร้อยละ 53.3 โดยความผิดปกติของระบบกล้ามเนื้อและกระดูกส่วนใหญ่พบที่บริเวณหลัง (ร้อยละ 30.5) เข่า (ร้อยละ 28.9) และข้อศอก (ร้อยละ 4.2) ตามลำดับ (Cheraghi *et al.*, 2019)

5.2 ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการยศาสตร์ของแรงงานก่อสร้างด้วยวิธี PATH ด้านท่าทางการทำงาน (Posture) พบว่าแรงงานก่อสร้างมีการใช้ท่าทางผิดธรรมชาติของลำตัว/หลัง ขา เข่นส่วนบน (ไหล่) และท่าทางของคอในสัดส่วนสูง สอดคล้องกับผลการศึกษาของกลุ่มแรงงานก่อสร้างถนน ที่พบว่าแรงงานใช้เวลาทำงานส่วนใหญ่ด้วยท่าทางของลำตัวที่ผิดธรรมชาติ (Buchholz *et al.*, 1996)

สำหรับผลการศึกษาด้านกิจกรรม (Activity) ด้านเครื่องมือที่ใช้ในการทำงาน (Tools) และด้านการขนย้ายวัสดุ/อุปกรณ์ (Handling) พบว่าแรงงานก่อสร้างมีส่วนเวลาลักษณะเดียวกันแบบกระจาย แต่เมื่อพิจารณาพร้อมกับพฤติกรรมการทำงานแล้วอาจกล่าวได้ว่า แม้แรงงานส่วนมากจะใช้แรงไม่เกิน 10 กิโลกรัม เป็นไปตามที่กฎหมายกำหนด (กระทรวงแรงงาน, 2547) แต่อาจอยู่ในท่าทางที่ไม่เหมาะสมหรือผิดธรรมชาติ เช่น ต้องเกร็งกล้ามเนื้อ ออกแรงต่อเนื่อง ยืนทำงาน เอื้อมมือหยิบจับสิ่งของ รวมทั้งการบิดตัวหรือเอี้ยวตัวเป็นประจำ ซึ่งท่าทางที่ไม่เหมาะสมนี้นำไปสู่การเกิดความเมื่อยล้าในการทำงาน และการบาดเจ็บได้ เช่น ผลการศึกษาท่าทางการทำงานโดยใช้พลั่วและจอบสำหรับการทำงานก่อสร้าง ผลการพิจารณาท่าทาง การใช้งาน เครื่องมือ และการจับถือ พบว่าส่วน

ใหญ่ (ร้อยละ 89) ใช้ทำทางที่ไม่ถูกต้อง นำไปสู่ความเมื่อยล้าและอาการปวดหลัง (Ning & Joseph, 2024)

แรงงานก่อสร้างทั้ง 4 กลุ่มงาน ได้แก่ งานกระเบื้อง งานไฟฟ้า งานฝ้าและสี และงานติดตั้งบัวภายนอก เป็นแรงงานของงานด้านสถาปัตยกรรม ที่มีผลวิจัยในการประเมินระดับความเสี่ยงต่อการประสบอันตราย กรณีงานฝ้าเพดาน ที่สอดคล้องกันว่า แรงงานมีความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้จากอุบัติเหตุที่เกิดจากวัตถุหรือสิ่งของตก บาด ทิ่มแทง แผลจากความร้อน อุบัติเหตุจากการโดนวัตถุกระแทก ตกใส่ ชน และอาการผิดปกติทางระบบโครงร่างและกล้ามเนื้อในการทำงาน ส่วนงานทาสี ก่อฉาบ โบกปูน ตกแต่งภายในมีความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้จากอาการผิดปกติทางระบบโครงร่างและกล้ามเนื้อ (วัชรภรณ์ และขวัญแข, 2567)

6. กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานและการเผยแพร่งานวิจัยได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา และบริษัท จัวันเซ็ง มิลเลียนเนียร์ กรุ๊ป จำกัด

7. เอกสารอ้างอิง

- กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน. (2565). รายงานสถิติอุบัติเหตุจากการทำงานของแรงงานก่อสร้างประจำปี 2565. กรุงเทพฯ: กระทรวงแรงงาน.
- กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน. (2566). รายงานสถิติการประสบอันตรายจากการทำงานของลูกจ้าง. ค้นจาก <https://cdn.me-qr.com/pdf/1089bb00-9640-4a12-afd9-c171b53d0186.pdf>
- กระทรวงแรงงาน. (2547). กฎกระทรวงกำหนดอัตราน้ำหนักรายงานจ้างให้ลูกจ้างทำงานได้ พ.ศ. 2547. ราชกิจจานุเบกษา, 121 (ตอนที่ 88 ก).
- งานด้านการยศาสตร์ในประเทศไทย. (2557). หลักการประเมินด้านการยศาสตร์ (Ergonomics). ค้นจาก <https://thai-ergonomic-ssessment.blogspot.com/search/label/Ergonomics>
- บริษัท จัวันเซ็ง มิลเลียนเนียร์ กรุ๊ป จำกัด. (2568). ข้อมูลบริษัท โครงการ และสถิติพนักงาน. สมุทรสาคร: ฝ่ายบุคคล บริษัท จัวันเซ็ง มิลเลียนเนียร์ กรุ๊ป จำกัด.
- บริษัท จัวันเซ็ง มิลเลียนเนียร์ กรุ๊ป จำกัด. (2568). ข้อมูลบริษัท โครงการ และสถิติพนักงาน [เอกสารภายในที่ไม่ได้ตีพิมพ์].

- ศรัณยู คำกลาง และสิทธิชัย สิงห์สุ. (2024). การศึกษาด้านการยศาสตร์เพื่อประเมินความเสี่ยงและอัตราการเกิดความผิดปกติของระบบกล้ามเนื้อและกระดูกในคนงานตอกเหล็กในโครงการก่อสร้างแห่งหนึ่งในจังหวัดชลบุรี. *วารสารความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม*, 7(1), 41-48.
- สำนักงานประกันสังคม. (2567). *รายงานสถิติการบาดเจ็บและการเสียชีวิตจากการทำงาน*. กรุงเทพฯ: กระทรวงแรงงาน.
- Adi, H. P., Boogaard, F. C., Schaap, E., & Hatmoko, J. U. D. (2023). Evaluation of working posture of construction workers: A case study on wall construction using lightweight bricks. *Civil Engineering and Architecture*, 11(1), 64-71. Doi: 10.13189/cea.2023.110106
- Anagha, R. & Xavier, A. S. (2022). Working posture analysis of construction workers using ergonomics. *Sustainability Agri Food and Environmental Research*, 10 (1). Doi: 10.7770/safer-V10N1-art2545
- Buchholz, B., Paquet, V., Punnett, L., Lee, D., & Moir, S. (1996). PATH: A work sampling-based approach to ergonomic job analysis for construction and other non-repetitive work. *Applied Ergonomics*, 27(3), 177-187. Doi: 10.1016/0003-6870(95)00078-X.
- Cheraghi, M., Farahani, M.S., & Moussavi-Najarkola, S.A. (2019). Ergonomic risk factors evaluation of work-related musculoskeletal disorders by PATH and MMH in a construction industry. *Iranian Journal of Health, Safety & Environment*, 6(1), 1175-1189.
- Cronbach, L.J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*. 16, 297-334.
- Forde, M. S., & Buchholz, B. (2004). Task content and physical ergonomic risk factors in construction ironwork. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 34(4), 319-333. Doi: 10.1016/j.ergon.2004.04.011
- Gayathri, E., Sakthi D., S., Pandiyan, I. & Doraiswamy Jayakumar, N. (2025). Assessing occupational hazards in the construction industry: risk of orofacial trauma, musculoskeletal injuries and ergonomic challenges with implications for safety and prevention. *Journal of Pioneering Medical Sciences*, 14(S1), 6-14.
- Jazari, D.M., Jahangiri, M., Khaleghi, H., Abbasi, N., Hassanipour, S., Shakerian, M., & Kamalinia, M. (2018). Prevalence of self-reported work-related illness and injuries

- among building construction workers, Shiraz, Iran. **EXCLI Journal**, 17, 724-733. Doi: 10.17179/excli2018-1459
- Jing, X., & Fulmer, S. (2009). Posture, activities, tools, and handling analysis for floor coverers focusing on the knee. **Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting**, 53(18), 1277-1281. Doi: 10.1518/107118109X12524443346950
- Kibria, M. G. (2023). Ergonomic Analysis of Working Postures at a Construction Site Using Rula and Reba Method. **Journal of Engineering Science**, 14(1), 43-52. Doi: 10.3329/jes.v14i1.67634
- Kuorinka, I., Jonsson, B., Kilbom, A., Vinterberg, H., Biering-Sørensen, F., Andersson, G., & Jørgensen, K. (1987). Standardised Nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms. **Applied Ergonomics**, 18(3), 233-237. Doi: 10.1016/0003-6870(87)90010-X.
- Market Research Thailand. (2024). แนวโน้มกำลังแรงงานก่อสร้างของไทยและความท้าทาย. ค น จ ก <https://marketresearchthailand.com/insights/articles/thailand-construction-workforce-trends-and-challenges>
- Mishra, D., & Satapathy, S. (2021). Ergonomic study of construction workers in Odisha (India): A case study in construction sites. In J. L. García-Alcaraz, A. Realyvásquez-Vargas, & E. Z-Flores (Eds.), **Trends in industrial engineering applications to manufacturing process**. Cham, Switzerland: Springer. Doi: 10.1007/978-3-030-71579-3_20
- Ning, T.S. & Joseph, R. (2024). Ergonomic shovel analysis using PATH method and RII. **International Journal of Innovation**, 1(2), 61-67.
- Paquet, V., Punnett, L., & Buchholz, B. (1999). An evaluation of manual materials handling in highway construction work. **International Journal of Industrial Ergonomics**, 24(4), 431-444. Doi: 10.1016/S0169-8141(99)00009-8
- Park, J. K., Boyer, J., Tessler, J., Casey, J., Schemm, L., Gore, R., & Punnett, L. (2009). Inter-rater reliability of PATH observations for assessment of ergonomic risk factors in hospital work. **Ergonomics**, 52(7), 820-829. Doi: 10.1080/00140130802641585



- Rovinelli, R.J. & Hambleton, R.K. (1977). On the use of content specialists in the assessment of criterion-referenced test item validity. **Tijdschr Voor Onderwijs Research**, (2), 49-60.
- Tonchoy, P., Suta, P., Kantow, S., Singkaew, P., & Pudpong, P. (2026). Evaluating ergonomic risks in manual lychee harvesting using PATH and hierarchical task analysis: An observational cross-sectional study. **Journal of UOEH**, 48(2), 71-85. Doi: 10.7888/juoeh.48.71
- Vijayakumar, R., & Choi, J.-h. (2022). Emerging trends of ergonomic risk assessment in construction safety management: A scientometric visualization analysis. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 19(23), 16120. Doi: 10.3390/ijerph192316120.
- Yuan, L., Buchholz, B., Punnett, L. & Kriebel, D. (2016). An integrated biomechanical modeling approach to the ergonomic evaluation of drywall installation. **Applied Ergonomics**, 53, 52-63. Doi: 10.1016/j.apergo.2015.08.012

การปรับปรุงสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยขยะพลาสติกชนิด

HDPE, PP และ PET โดยวิธีการของมาร์แชลล์บนพื้นฐาน

การออกแบบงานทางประเทศไทย

IMPROVEMENT OF ASPHALT CONCRETE PROPERTIES USING HDPE, PP, AND PET PLASTIC WASTES VIA MARSHALL MIX DESIGN BASED ON THAILAND'S PAVEMENT DESIGN

พิชเยศ มารศรี, ปรีวัฒน์ มั่นทอง*, ภาณุวัตร ตุ่นแก้ว, ศศิประภา วัยวุฒิ, วรณิกา ชันคำนัน๊ะ
Pichayet Marasri, Pariwat Manthong*, Panuwat Tunkeaw, Sasiprapha Waiyawut,

Wannika Kancomnanta

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: pariwat.m@psru.ac.th

วันที่เข้ารับ 21 กรกฎาคม 2569

วันที่แก้ไขบทความ 30 สิงหาคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ 31 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำขยะพลาสติกกลับมาใช้เป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์คอนกรีต โดยพิจารณาพลาสติก 3 ประเภท ได้แก่ HDPE จากขวดบรรจุภัณฑ์และถุงขยะ PP จากภาชนะพลาสติกและสายน้ำหยดทางการเกษตร และ PET จากขวดน้ำดื่ม งานวิจัยนี้มีความใหม่ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพลาสติกทั้งสามประเภทภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งต่างจากงานวิจัยส่วนใหญ่ที่มักศึกษาพลาสติกเพียงชนิดเดียว การออกแบบส่วนผสมดำเนินการตามวิธีมาร์แชลล์ตามมาตรฐาน ทล.-ม. 408/2532 โดยใช้มวลรวมหินปูนจากจังหวัดสุโขทัยและแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 อัตราส่วนมวลรวม 50:25:13:12 ปริมาณยางแอสฟัลต์ที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 4.8 โดยน้ำหนักมวลรวม จากนั้นเติมขยะพลาสติกขนาด 2-4 มิลลิเมตร ในสัดส่วนร้อยละ 1 และ 3 โดยน้ำหนักของยางแอสฟัลต์ ทดสอบค่าเสถียรภาพ ค่าการไหล และค่าช่องว่างอากาศ ผลการทดลองพบว่าการเติมพลาสติกร้อยละ 3 ให้ค่าเสถียรภาพสูงกว่าตัวอย่างควบคุมและร้อยละ 1 อย่างชัดเจน โดยเฉพาะกลุ่ม HDPE และ PP ขณะที่ค่าการไหลของกลุ่มดังกล่าวลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติก และค่าช่องว่างอากาศทุกส่วนผสมยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (ร้อยละ 3.7-4.4) ส่วนผสมที่เติมพลาสติกจึงมีแนวโน้มให้ความแข็งแรงและความทนทานสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป อีกทั้งลดปริมาณการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ได้บางส่วน แสดงถึงศักยภาพของการนำขยะพลาสติกมาใช้ในการงานทางเพื่อการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ขยะพลาสติกรีไซเคิล, ความทนทานของผิวทาง, วิธีมาร์แชลล์, แอสฟัลต์คอนกรีต

Abstract

This study aimed to investigate the use of recycled plastic waste as an additive in asphalt concrete mixtures. Three types of plastic waste were examined: high-density polyethylene (HDPE) obtained from packaging bottles and garbage bags, polypropylene (PP) obtained from plastic containers and agricultural drip irrigation tubing, and polyethylene terephthalate (PET) obtained from drinking water bottles. The novelty of this study lies in its comparison of the performance of these three plastic types under identical experimental conditions, whereas most previous studies have focused on only one type of plastic. The mixtures were designed using the Marshall method in accordance with the Department of Highways Standard No. DOH-M. 408/2532. Limestone aggregate from Sukhothai Province and AC 60/70 penetration-grade asphalt cement were used, with an aggregate blend ratio of 50:25:13:12. The optimum asphalt content was determined to be 4.8% by weight of the aggregate. Plastic waste with particle sizes ranging from 2 to 4 mm was then incorporated at dosages of 1% and 3% by weight of the asphalt cement. Marshall stability, flow, and air voids were evaluated. The results indicated that the mixtures containing 3% plastic exhibited substantially higher Marshall stability than both the control mixtures and those containing 1% plastic, particularly in the HDPE- and PP-modified mixtures. Meanwhile, the flow values of these mixtures decreased as the plastic content increased. The air void contents of all mixtures remained within the specified range of 3.7–4.4%. Overall, the plastic-modified mixtures demonstrated the potential to provide greater strength and durability than conventional asphalt concrete while partially reducing asphalt cement consumption. These findings demonstrate the potential of utilizing plastic waste in pavement applications as a sustainable approach to resource management.

Keywords: Asphalt concrete, Marshall mix design, Pavement durability, Recycled plastic waste

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหาการสะสมของขยะพลาสติกและทวีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมและการบริโภค ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในดิน น้ำ และอากาศ เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยากและมีอายุการใช้งานยาวนาน การนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะในงานทางหลวงจึงเป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถช่วยลดปริมาณของเสียควบคู่กับการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุก่อสร้าง แอสฟัลต์คอนกรีตเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในงานผิวทางเนื่องจากมีคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นและสามารถรองรับน้ำหนักจราจรได้ดี อย่างไรก็ตามปัญหาความเสียหายของผิวทาง เช่น การเกิดร่องล้อ (Rutting) และการเสียรูปถาวร ยังคงเป็นข้อจำกัดสำคัญของวัสดุชนิดนี้ ทำให้มีการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวัสดุพอลิเมอร์และวัสดุรีไซเคิล โดยเฉพาะพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก เช่น High Density Polyethylene (HDPE), Polypropylene (PP) และ Polyethylene Terephthalate (PET) ซึ่งสามารถหลอมรวมกับแอสฟัลต์ได้และช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเสียรูปของวัสดุ (Ma *et al.*, 2021) ทั้งนี้ ข้อมูลของกรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม (2566) รายงานว่าประเทศไทยมีปริมาณขยะมูลฝอยเกิดขึ้นประมาณ 26.95 ล้านตันต่อปี แต่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้เพียง 9.31 ล้านตัน โดยขยะพลาสติกเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ยังคงมีอัตราการนำกลับมาใช้ใหม่อยู่ในระดับต่ำ

การเติมขยะพลาสติกในแอสฟัลต์คอนกรีตช่วยเพิ่มค่าเสถียรภาพ Marshall Stability และลดค่าการไหล Flow ซึ่งเป็นการเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการรับน้ำหนักของส่วนผสม (Mashaan *et al.*, 2021) นอกจากนี้ยังสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานความชื้นและการใช้งานระยะยาวได้ (Pan *et al.*, 2025; Biswas *et al.*, 2025) สำหรับปริมาณและประเภทของพลาสติกที่เหมาะสมยังคงเป็นประเด็นที่สำคัญ เนื่องจากการเติมขยะพลาสติกในปริมาณที่สูงเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติด้านความยืดหยุ่นและการเสียรูปของแอสฟัลต์ (Bilema *et al.*, 2024) การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย นิยมใช้วิธีมาร์แชลล์ตามมาตรฐานกรมทางหลวง (ทล.-ม. 408/2532) ซึ่งเป็นวิธีเชิงทดลองที่สามารถประเมินสมบัติสำคัญ ได้แก่ ค่าเสถียรภาพและค่าการไหล งานวิจัยในประเทศรายงานว่า การเติมพลาสติก โดยเฉพาะ PET สามารถเพิ่มค่าเสถียรภาพของส่วนผสมได้อย่างมีนัยสำคัญ และยังเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง (Thienthong *et al.*, 2025)

งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาพลาสติกเพียงชนิดเดียว หรือศึกษาในช่วงอัตราส่วนที่จำกัด โดยยังขาดการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพลาสติกหลายประเภทภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยเฉพาะ HDPE, PP และ PET ซึ่งเป็นพลาสติกที่พบได้ทั่วไปในขยะชุมชนและภาคการเกษตร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเติมขยะพลาสติกทั้งสามประเภtdังกล่าวในอัตราส่วนร้อยละ 1

และร้อยละ 3 ต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยออกแบบส่วนผสมตามวิธีมาร์แชลล์ตามมาตรฐานกรมทางหลวง (ทล.-ม. 408/2532) และประเมินผลผ่านค่าความเสถียรภาพ ค่าการไหล และค่าช่องว่างอากาศ เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพการใช้งาน ในการพัฒนาวัสดุผิวทางที่มีสมรรถนะสูง และสอดคล้องกับแนวทางการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน ผลจากการเปรียบเทียบดังกล่าวจะช่วยตอบช่องว่างงานวิจัยข้างต้นได้โดยตรง และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการเลือกชนิดและปริมาณพลาสติกที่เหมาะสมสำหรับงานถนนต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาผลของการนำขยะพลาสติกประเภท HDPE, PP และ PET มาใช้เป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์คอนกรีต โดยออกแบบส่วนผสมตามวิธีมาร์แชลล์ (Marshall mix design) ตามมาตรฐานกรมทางหลวง (ทล.-ม. 408/2532)

2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณขยะพลาสติกที่ร้อยละ 1 และร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ต่อสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต และประเมินสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ ค่าเสถียรภาพ (Marshall stability) ค่าการไหล (Flow) และค่าช่องว่างอากาศ (Air voids)

2.3 เพื่อประเมินศักยภาพของการนำขยะพลาสติกมาใช้ในการผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ทั้งในด้านสมรรถนะทางวิศวกรรมและการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง (Experimental study) เพื่อประเมินผลของการนำขยะพลาสติกมาใช้เป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์คอนกรีต โดยศึกษาผลกระทบของพลาสติกประเภท High Density Polyethylene (HDPE), Polypropylene (PP) และ Polyethylene Terephthalate (PET) ต่อสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผิวทาง การดำเนินงานวิจัยครอบคลุมตั้งแต่การคัดเลือกและเตรียมวัสดุ การออกแบบส่วนผสม การผลิตตัวอย่างทดสอบ และการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.1 วัสดุ (Material)

3.1.1 วัสดุมวลรวมหินปูน (Limestone aggregate)

สำหรับงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้วัสดุมวลรวมหินปูน จากแหล่งโรงโม่หิน จังหวัดสุโขทัย โดยได้คัดขนาดเพื่อนำมาทำการออกแบบอัตราส่วนผสม ได้แก่ 3/4", 1/2", 3/8" และหินฝุ่นเป็นวัสดุมวลรวมสำหรับออกแบบ Cold Bin



ภาพที่ 1 วัสดุมวลรวมหินปูน (Limestone)

3.1.2 วัสดุประสาน (Asphalt cement)

วัสดุประสานที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ ชนิด AC 60/70



ภาพที่ 2 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60/70)

3.1.3 ขยะพลาสติก

ผู้วิจัยเลือกใช้ขยะพลาสติกประเภท High Density Polyethylene (HDPE) จากขวดบรรจุภัณฑ์และถุงขยะ, Polypropylene (PP) จากภาชนะพลาสติกและสายน้ำหยดทางการเกษตร และ Polyethylene Terephthalate (PET) จากขวดน้ำดื่ม ย่อยขยะพลาสติกให้มีขนาด 2-3 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3 ขยะพลาสติกประเภท HDPE, PP และ PET



3.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

3.2.1 ทำการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม เพื่อนำค่าข้อมูลไปออกแบบอัตราส่วนผสม สำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ดังนี้

- การทดสอบการหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง อ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.-ท. 204/2516 เพื่อหาขนาดเม็ด (Particle size distribution) ของ Aggregate ทั้งชนิดเม็ดละเอียดและหยาบ โดยให้ผ่านตะแกรงจากขนาดใหญ่ ถึงขนาดเล็ก มีขนาดช่องผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) แล้วเปรียบเทียบมวลของตัวอย่าง ที่ผ่านหรือค้างตะแกรงขนาดต่างๆ กับมวลทั้งหมดของตัวอย่าง
- การทดสอบดัชนีความแบนและความยาวของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM D4791-19 ใช้เพื่อประเมินรูปร่างของเม็ดหิน โดยตรวจสอบสัดส่วนของเม็ดที่มีลักษณะแบนและยาวซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของวัสดุผิวทาง ผลการทดสอบแสดงเป็นร้อยละของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด โดยค่าที่ต่ำบ่งชี้ถึงคุณภาพมวลรวมที่เหมาะสมต่อการใช้งานในแอสฟัลต์คอนกรีต
- การทดสอบหาการสึกหรอของวัสดุมวลรวมหยาบโดยใช้เครื่อง Los Angeles วิธีการทดสอบนี้ครอบคลุมถึงการหาค่าความสึกหรอของวัสดุมวลรวมหยาบ โดยใช้เครื่องทดสอบหาความสึกหรอ ลอสแอนเจลิส
- การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวมหยาบ วิธีการทดสอบนี้เป็นวิธีการทดสอบเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวมหยาบที่มีขนาดเม็ดโตกว่าตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) มาตรฐานอ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.-ท. 207/2517
- การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวมหยาบ วิธีการทดสอบนี้เป็นวิธีการทดสอบเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวมหยาบที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) มาตรฐานอ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.-ท. 209/2518

3.3 การออกแบบอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

นำข้อมูลจากการทดสอบวัสดุมวลรวม มาออกแบบอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ดำเนินการตามวิธีมาร์แชล (Marshall mix design) ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ม. 408/2532 โดยได้เตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ ตัวอย่างควบคุม (Virgin), HDPE 1 (ขูดบรรจุภัณฑ์), HDPE 2 (ถุงขยะ), PP1 (ภาชนะพลาสติก), PP2 (สายน้ำหยดทางการเกษตร) และ PET (ขวดน้ำดื่ม) ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 1 และร้อยละ 3

3.4 การเตรียมตัวอย่างและการผสมพลาสติก

ในการเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต นำมวลรวมหินอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 160–180°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นเตรียมขยะพลาสติก 5 ชนิด ได้แก่ HDPE 1 จากขวดบรรจุภัณฑ์ HDPE 2 จากถุงขยะ PP 1 จากภาชนะต่าง ๆ PP 2 จากสายน้ำหยดการเกษตร และ PET โดยควบคุมขนาดเศษพลาสติกให้อยู่ในช่วง 2–4 มิลลิเมตร และใช้ในสัดส่วนร้อยละ 1 และ 3 โดยน้ำหนักของแอสฟัลต์ซีเมนต์ นำพลาสติกผสมกับมวลรวมหินร้อนด้วยวิธีผสมแบบแห้ง (Dry process) แล้วอบที่อุณหภูมิ 160–180°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้พลาสติกอ่อนตัวและเคลือบผิวมวลรวมอย่างทั่วถึง จากนั้นเติมแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 ที่อุณหภูมิ 150–160°C และผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องมาร์แชล โดยทำ 75 ครั้งต่อด้าน (75 blows/side) ตามมาตรฐานงานทางสำหรับงานจราจรหนัก และนำตัวอย่างไปทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมต่อไป

3.5 การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต

ทดสอบประสิทธิภาพของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ม. 408/2532 โดยประกอบด้วยการทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Marshall stability) เพื่อประเมินความสามารถในการรับแรง และค่าการไหล (Flow) เพื่อประเมินการเปลี่ยนรูปของวัสดุภายใต้แรงกด

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

4.1.1 การทดสอบการกระจายขนาดเม็ดของวัสดุโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงแบบไม่วาง พบว่าส่วนผสมมีลักษณะเป็น ขนาดละเอียดต่อเนื่อง (Dense gradation) ที่มีการกระจายตัวของขนาดเม็ดอย่างต่อเนื่องและสมดุล โดยมีสัดส่วนมวลรวมส่วนละเอียดอยู่ในระดับที่เหมาะสม

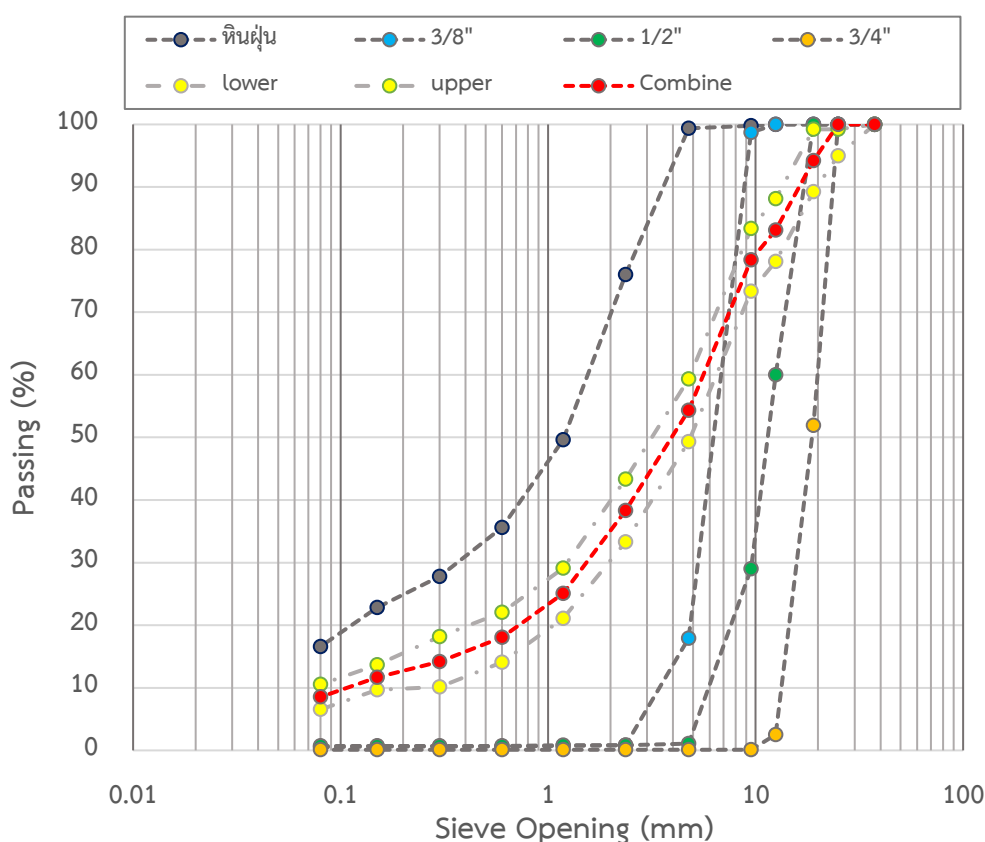
4.1.2 การทดสอบดัชนีความแบนและความยาวของมวลรวมเพื่อใช้ประเมินรูปร่างของเม็ดหิน พบว่า มวลรวมมีค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index: F.I.) เท่ากับร้อยละ 42.25 และค่าดัชนีความยาว (Elongation Index: E.I.) เท่ากับร้อยละ 36.27 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่ามวลรวมมีส่วนประกอบของอนุภาคที่มีรูปร่างแบนและยาวในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง

4.1.3 การทดสอบค่าการสึกหรอของวัสดุมวลรวมหยาบโดยใช้เครื่อง Los Angeles พบว่า มีค่าการสึกหรอเท่ากับร้อยละ 24.25 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานงานทาง แสดงให้เห็นว่ามวลรวมมีความสามารถในการต้านทานการขัดสีและการเสียดสีระหว่างการใช้งานได้ดี อันเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความคงทนและอายุการใช้งานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

4.1.4 การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวม พบว่า วัสดุมวลรวมหยาบขนาด 3/4 นิ้ว, 1/2 นิ้ว และ 3/8 นิ้ว มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.668, 2.699 และ 2.640 ตามลำดับ ขณะที่วัสดุมวลรวมละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.687 ซึ่งอยู่ในช่วงที่

เหมาะสมสำหรับงานแอสฟัลต์คอนกรีต และสะท้อนถึงคุณภาพของมวลรวมที่มีความหนาแน่นดีและสามารถใช้เป็นส่วนประกอบในส่วนผสมได้อย่างเหมาะสม

4.2 การออกแบบอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต พบว่าเมื่อเปรียบเทียบการกระจายขนาดของมวลรวมกับเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง (ทล. -ม. 408/2532) สำหรับผิวทางประเภท Wearing Course ส่วนผสมที่ออกแบบมีค่าการผ่านตะแกรงอยู่ในช่วงเกณฑ์ที่กำหนดในทุกขนาดเม็ด แสดงให้เห็นว่าการออกแบบมวลรวมมีความเหมาะสมและเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ลักษณะการกระจายขนาดของมวลรวมเป็นแบบ dense gradation ซึ่งมีการกระจายตัวอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้โครงสร้างภายในของแอสฟัลต์คอนกรีตมีความหนาแน่นและสามารถถ่ายแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ปริมาณวัสดุที่ผ่านตะแกรง #200 เท่ากับร้อยละ 8.5 มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวม รวมถึงช่วยลดช่องว่างอากาศภายในส่วนผสม ดังนั้น gradation ที่ได้จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ร่วมกับการปรับปรุงด้วยขยะพลาสติก และเป็นปัจจัยสนับสนุนให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีสมบัติด้านความแข็งแรงและความทนทานที่ดีขึ้น โดยใช้อัตราส่วนมวลรวมเท่ากับ 50 : 25 : 13 : 12 ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 Aggregate mix combination

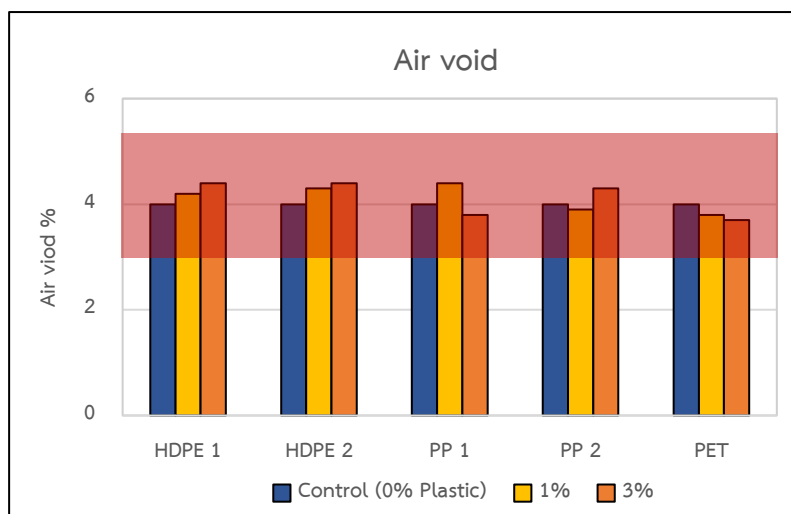
4.3 การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางที่ 1 สรุปผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ ค่าการไหลและค่าช่องว่างอากาศของแอสฟัลต์คอนกรีต

ตัวอย่าง (Sample)	Stability (lb)	Flow (0.01 in.)	Air Voids (%)
Control (0%)	3623	14.2	4.0
HDPE 1 (1%)	3732	14.2	4.2
HDPE 2 (1%)	3384	15.9	4.3
PP 1 (1%)	3526	15.6	4.4
PP 2 (1%)	3718	15.7	3.9
PET (1%)	3485	13.7	3.8
HDPE 1 (3%)	3989	14.0	4.4
HDPE 2 (3%)	3538	13.5	4.4
PP 1 (3%)	3938	11.7	3.8
PP 2 (3%)	3906	12.5	4.3
PET (3%)	3834	15.7	3.7

4.3.1 ผลการทดสอบช่องว่างอากาศ (Air Voids)

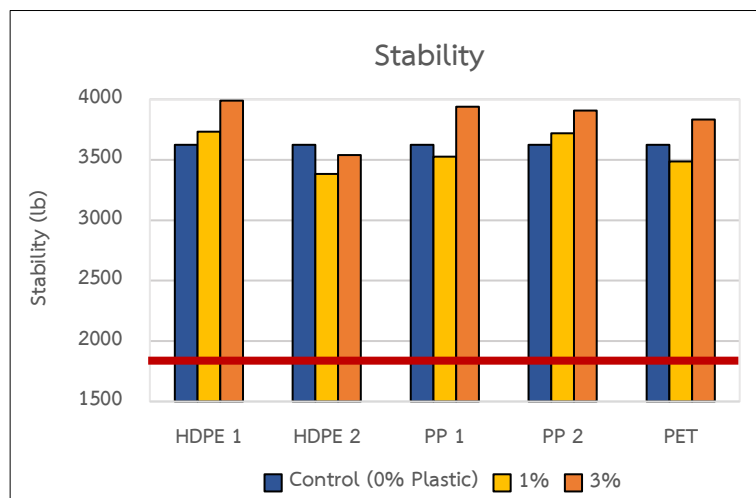
จากภาพที่ 5 ผลการทดสอบค่าช่องว่างอากาศ (Air voids) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมขยะพลาสติกประเภท HDPE, PP และ PET พบว่าค่าช่องว่างอากาศของทุกตัวอย่างอยู่ในช่วงประมาณ 3.5–4.5% ซึ่งอยู่ภายในช่วงเกณฑ์มาตรฐานสำหรับงานแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทาง (โดยทั่วไปประมาณ 3–5%) เมื่อพิจารณาผลของปริมาณพลาสติก พบว่าแนวโน้มของค่า Air Voids มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกจากร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 3 โดยในบางกรณีค่าช่องว่างอากาศมีแนวโน้มลดลง เช่น ในกลุ่ม PP และ PET ซึ่งอาจเกิดจากการที่พลาสติกช่วยเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้าง ทำให้ส่วนผสมมีความแน่นมากขึ้น ค่า Air Voids ของทุกส่วนผสมยังคงอยู่ในช่วงที่เหมาะสม แสดงให้เห็นว่าการเติมขยะพลาสติกไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต และยังสามารถรักษาสมดุลระหว่างความแน่นและช่องว่างอากาศได้อย่างเหมาะสม ซึ่งส่งผลต่อความทนทานและอายุการใช้งานของผิวทาง



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศ (Air voids) กับชนิดและปริมาณขยะพลาสติก

4.3.2 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ (Marshall stability)

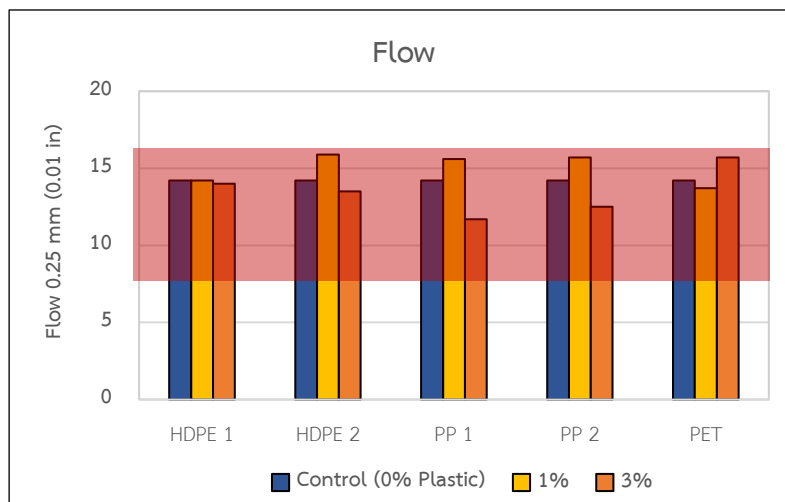
แสดงผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ (Marshall stability) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมขยะพลาสติกประเภท HDPE, PP และ PET พบว่าทุกส่วนผสมมีค่าเสถียรภาพสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 1,800 ปอนด์ แสดงถึงความสามารถในการรับแรงและความแข็งแรงของส่วนผสมที่อยู่ในระดับดี เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนการเติมพลาสติก พบว่าการเติมพลาสติกในอัตราร้อยละ 3 ให้ค่าเสถียรภาพสูงกว่าทั้งตัวอย่างควบคุมและการเติมที่ร้อยละ 1 โดยเฉพาะในกลุ่ม HDPE และ PP ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณพลาสติกสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการรับน้ำหนักของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับกลไกที่พลาสติกเทอร์โมพลาสติกอ่อนตัวและเคลือบผิวมวลรวมในกระบวนการผสมแบบแห้ง ทำให้เกิดฟิล์มพลาสติกที่ช่วยเพิ่มความหนืดและความแข็ง (Stiffness) ของวัสดุประสานรอบมวลรวม (Bualuang *et al.*, 2025) โดย HDPE และ PP ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) และมีความแข็งแรงเชิงกลสูงกว่า PET ในสถานะอุณหภูมิผสมที่ใช้ จึงให้ผลเพิ่มค่าเสถียรภาพได้ชัดเจนกว่า สอดคล้องกับผลการศึกษาการผสมขยะพลาสติกแบบแห้งในแอสฟัลต์ผสมร้อนที่พบว่าชนิดของพอลิเมอร์ มีผลโดยตรงต่อระดับการยึดเกาะและความแข็งแรงของส่วนผสม (Bualuang *et al.*, 2025) ในขณะที่การศึกษาเปรียบเทียบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนทั่วไป กับที่ปรับปรุงด้วยขยะพลาสติกยังชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นแปรผันตามชนิดและปริมาณของพลาสติกที่ใช้เช่นกัน (Lohatepanont *et al.*, 2026)



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพ (Marshall stability) กับชนิดและปริมาณขยะพลาสติก

4.3.3 ผลการทดสอบการไหล (Flow)

จากภาพที่ 7 ผลการทดสอบค่าการไหล (Flow) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมขยะพลาสติกประเภท HDPE, PP และ PET พบว่าค่าการไหลของทุกส่วนผสมอยู่ในช่วงประมาณ 11–16 หน่วย (0.25 mm) ซึ่งอยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 8–16 หน่วย แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมทั้งหมดมีความสามารถในการเสียรูปภายใต้แรงกดที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาผลของปริมาณพลาสติกพบว่า การเติมพลาสติกในอัตราร้อยละ 1 มีแนวโน้มทำให้ค่าการไหลสูงขึ้นเล็กน้อยในบางชนิด โดยเฉพาะในกลุ่ม PP และ PET ซึ่งสะท้อนถึงการเพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนรูปของส่วนผสม อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกเป็นร้อยละ 3 พบว่าค่าการไหลมีแนวโน้มลดลงในหลายกรณี โดยเฉพาะใน HDPE และ PP ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มความแข็ง (stiffness) ของส่วนผสมและความสามารถในการต้านทานการเสียรูปที่ดีขึ้น ทั้งนี้ ค่า Flow ของทุกส่วนผสมยังคงอยู่ภายในช่วงมาตรฐานที่กำหนด แสดงให้เห็นว่าการเติมขยะพลาสติกไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรม การเสียรูปของแอสฟัลต์คอนกรีต และยังสามารถควบคุมสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของวัสดุได้อย่างเหมาะสม



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหล (Flow) กับชนิดและปริมาณขยะพลาสติก

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากการศึกษาการนำขยะพลาสติกประเภท HDPE, PP และ PET มาใช้เป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์คอนกรีต โดยออกแบบส่วนผสมตามวิธีมาร์แชลล์ตามมาตรฐานกรมทางหลวง (ทล.-ม. 408/2532) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 การออกแบบอัตราส่วนมวลรวมที่ 50: 25: 13: 12 ให้ลักษณะการกระจายขนาดแบบ dense gradation ซึ่งมีความต่อเนื่องและอยู่ภายในเกณฑ์มาตรฐานทุกขนาดเม็ด ส่งผลให้โครงสร้างของแอสฟัลต์คอนกรีตมีความหนาแน่นดีและสามารถถ่ายแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะปริมาณวัสดุผ่านตะแกรง #200 ที่ร้อยละ 8.5 ซึ่งช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะและลดช่องว่างอากาศภายในโครงสร้างมวลรวมที่ดีเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเสริมให้ผลของการเติมพลาสติกแสดงออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักที่รองรับแรง

5.2 ผลการทดลองพบว่า ส่วนผสมทุกชุดมีค่าเสถียรภาพสูงกว่าค่ามาตรฐาน 1,800 ปอนด์ อย่างชัดเจน และการเติมพลาสติกในอัตราร้อยละ 3 ให้ค่าความเสถียรสูงกว่าตัวอย่างควบคุมและการเติมที่ร้อยละ 1 โดยเฉพาะในกลุ่ม HDPE และ PP การเพิ่มขึ้นของค่าเสถียรภาพเกิดจากคุณสมบัติของพลาสติกที่ช่วยเพิ่มความแข็ง (Stiffness) ของวัสดุประสาน ส่งผลให้ส่วนผสมสามารถรับน้ำหนักและต้านทานการเสียรูปได้ดีขึ้น โดย HDPE และ PP ให้ผลชัดเจน เนื่องจากมีพฤติกรรมเป็นพอลิเมอร์ที่ช่วยเสริมความแข็งแรงของระบบแอสฟัลต์

5.3 ค่าการไหลของทุกส่วนผสมอยู่ในช่วงมาตรฐานที่กำหนด (8-16 หน่วย) โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกเป็นร้อยละ 3 ค่าการไหลมีแนวโน้มลดลงในหลายกรณี โดยเฉพาะใน HDPE และ PP แนวโน้มการลดลงของค่า Flow สะท้อนถึงการเพิ่มความแข็งของส่วนผสม ทำให้ความสามารถในการ

เสียรูปภายใต้แรงกดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของค่า Stability ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่า Flow ยังคงอยู่ในช่วงที่เหมาะสม แสดงว่าวัสดุยังไม่เกิดความเปราะ (Brittleness)

5.4 ค่าช่องว่างอากาศของทุกส่วนผสมอยู่ในช่วงประมาณ 3.5–4.5% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติก การลดลงของค่า Air Voids อาจเกิดจากการที่พลาสติกช่วยเติมเต็มช่องว่างในโครงสร้าง ทำให้ส่วนผสมมีความแน่นมากขึ้น ซึ่งส่งผลดีต่อความทนทานและลดความเสี่ยงต่อการแทรกซึมน้ำ

5.5 ถึงวัสดุผสมจะมีค่าดัชนีความแบนและความยาวค่อนข้างสูง แต่ค่าการสึกหรอ (Los Angeles abrasion) และค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมพลาสติกสามารถช่วยชดเชยข้อจำกัดบางประการของมวลรวม เช่น รูปร่างที่ไม่เหมาะสม โดยช่วยเพิ่มความแข็งแรงของส่วนผสมโดยรวม ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้ตรวจสอบค่าดัชนีความแบนและความยาวที่รายงานอีกครั้ง เพื่อยืนยันความถูกต้องและความสอดคล้องของค่าที่ใช้อ้างอิงในบทความ กับผลการทดสอบจริงของมวลรวมแต่ละขนาดก่อนสรุปเป็นค่าที่ใช้เป็นตัวแทนของส่วนผสม

การนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ในแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเฉพาะที่อัตราส่วนร้อยละ 3 สามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะทางวิศวกรรมของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านความแข็งแรงและความทนทาน โดยยังคงรักษาคุณสมบัติด้านปริมาตรให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน จึงมีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานถนน เพื่อส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 ควรศึกษาผลกระทบในระยะยาวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมขยะพลาสติก เช่น ความต้านทานต่อการแตกร้าวจากความล้า (Fatigue resistance) และความต้านทานต่อการลอกตัว (Stripping resistance) เพื่อประเมินอายุการใช้งานจริงของผิวทาง

6.2 ควรมีการทดสอบเพิ่มเติมในระดับสนาม (Field test) เพื่อยืนยันผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ และศึกษาพฤติกรรมของวัสดุภายใต้สภาพจราจรและสภาพอากาศจริง

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัท ทรัพย์ ส.ประทีป จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์วัสดุขยะพลาสติกแปรรูปสำหรับใช้ในการทดลอง รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์ในการถ่ายทอดความรู้ทางวิชาการ และเปิดโอกาสให้เข้าเยี่ยมชมกระบวนการผลิตภายในโรงงาน

ขอขอบพระคุณ บริษัท ทิปโก้แอสฟัลท์ จำกัด (มหาชน) ที่กรุณาอนุเคราะห์วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งเป็นวัสดุสำคัญในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่กรุณาอนุเคราะห์สถานที่
ห้องปฏิบัติการ รวมถึงเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับใช้ในการทดสอบและวิเคราะห์ผล
คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณทุกหน่วยงานที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้เป็นอย่างยิ่งมา ณ
โอกาสนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- กรมทางหลวง. (2516). **วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง (ทล.-ท. 204/2516)**. กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. (2517). **การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวม หยาบ (ทล.-ท. 207/2517)**. กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. (2518). **การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวมละเอียด (ทล.-ท. 209/2518)**. กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. (2531). **วิธีการทดสอบหาการสึกหรอของวัสดุมวลรวมหยาบโดยใช้เครื่อง ลอสแอนเจลิส (ทล.-ท. 202/2531)**. กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. (2532). **มาตรฐานการออกแบบส่วนผสมตามวิธีมาร์แชลล์ (Marshall Mix Design) (ทล.-ม. 408/2532)**. กรมทางหลวง.
- ฐานทัพ เทียนทอง, สุขสันต์ หอพิบูลสุข, อภิชาติ สุดดีพงษ์, และคงศักดิ์ อัครวงศ์วัฒนา. (2568). **สมบัติมาร์แชลล์ของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเย็นที่ปรับปรุงด้วยขยะพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลต**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 30, ประจวบคีรีขันธ์.
- ASTM International. (2019). **Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate (ASTM D4791-19)**. West Conshohocken, PA: Author.
- Bilema, M., Mohamed, A., Atiq, I., Maftah, S., & Alsaiti, A. M. (2024). Incorporating waste plastic bottles as an additive in asphalt mixtures through a dry method. **Slovak Journal of Civil Engineering**, 32(4), 42–49. Doi: 10.2478/sjce-2024-0024
- Bualuang, T., Jitsangiam, P., Jakrawatana, N., Teeratitayangkul, P., Vongruang, P., Thienchai, C., Wongchana, P., & Prommarin, J. (2025). Utilization of plastic waste in hot mix asphalt using dry mixing processes: Laboratory assessment of airborne microplastics. **Results in Engineering**, 25, 104464. Doi: 10.1016/j.rineng.2025.104464

- Lohatepanont, M., Thienchai, C., Jitsangiam, P., Nusit, K., Pansuk, W., Wongweeranimit, W., . . . Bualuang, T. (2026). **A comparative performance study of conventional hot mix asphalt concrete and plastic waste-modified hot mix asphalt concrete**. Cham, Switzerland: Springer. Doi: 10.1007/978-3-032-08476-7_72
- Mashaan, N., Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2021). Laboratory properties of waste PET plastic-modified asphalt mixes. **Recycling**, 6(3), 49. Doi: 10.3390/recycling6030049
- Pan, J., Li, J., Shan, B., Yao, Y., & Huang, C. (2025). A comprehensive review of applications and environmental risks of waste plastics in asphalt pavements. **Materials (Basel)**, 18(15), 3441. Doi: 10.3390/ma18153441
- Polaczyk, P., Huang, Q., Shu, X., & Habib, A. (2021). The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review. **Cleaner Materials**, 2, 100031. Doi: 10.1016/j.clema.2021.100031

IDENTIFICATION OF FACTORS INFLUENCING VEGETABLE GROWING-AREA SITE SELECTION: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW AND FRAMEWORK FOR TONGHAI COUNTY, CHINA

Xinyu Zhou¹, Jessada Pochan^{1,2*}, Boonsub Panichakarn^{1,2}, Sareeyapon Prasertsri^{1,2}

¹Faculty of Logistics and Digital Supply Chain, Naresuan University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

²ASEAN Logistics Academic Network (ALA), Naresuan University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: jessadapo@nu.ac.th

Submitted: 7 August 2026

Revision received: 31 August 2026

Accepted: 31 August 2026

Abstract

Vegetable growing-area site selection in Tonghai County should account for both natural production conditions and supply-chain accessibility. This systematic review followed the PRISMA 2020 guidelines and employed two complementary Scopus searches covering agricultural land suitability, GIS-based multi-criteria decision-making, cold-chain facilities, logistics hubs, and market accessibility. A total of 139 records were identified, of which 45 full-text studies were included in the final synthesis. Among the factors examined, slope received the strongest direct support in the literature, followed by travel time to major export markets, access to county-level wholesale markets or logistics hubs, and proximity to cold-storage, pre-cooling, or processing facilities. Based on the literature and the specific production and distribution conditions of Tonghai County, the proposed framework comprises three natural factors, four economic factors related to supply-chain accessibility, two social factors, and three categories of ecological and policy constraints. This framework provides a systematic basis for subsequent AHP-based weight determination and GIS-based land-suitability assessment.

Keywords: Vegetable growing-area site selection, PRISMA, Land suitability, GIS, Multi-criteria decision making

1. Introduction

Agricultural growing-area selection integrates natural, economic, social, and policy conditions. GIS and multi-criteria decision-making methods allow terrain, climate, soil, and accessibility factors to be evaluated within a common spatial framework, while AHP is widely used to determine factor weights (Akinci *et al.*, 2013; Sengupta *et al.*, 2022; Yalew *et al.*, 2016).

For commercial vegetable production, however, natural suitability alone is insufficient because perishable and time-sensitive vegetables depend on timely access to road networks, wholesale and logistics hubs, cold-chain facilities, and external markets. Long travel times may increase transport costs, delay postharvest handling, and increase product losses even where soil and climatic conditions are otherwise favorable (Abhinav *et al.*, 2022; Aljohani & Thompson, 2018). Vegetable growing-area selection should therefore consider both production suitability and supply-chain accessibility.

Tonghai County, located in central Yunnan Province, China, is an important commercial vegetable-producing and export-oriented area. Its agricultural landscape includes a relatively concentrated lake-basin production area and surrounding mountainous terrain, creating spatial differences in slope, cultivation conditions, road access, and transport convenience. Vegetable production in the county is strongly connected with external markets, and products are distributed to major cities outside the local area. These characteristics mean that locations with suitable natural production conditions may still face disadvantages if they are poorly connected to transport routes, logistics facilities, cold-chain services, or major markets.

For perishable and market-oriented vegetables, production suitability and postharvest accessibility are closely linked. Growing areas with shorter travel times to roads, logistics hubs, cold-chain facilities, and core export markets may have advantages in postharvest handling and market distribution; therefore, Tonghai County requires a framework that considers both natural suitability and supply-chain accessibility.

Existing reviews have examined GIS-based multi-criteria decision making and agricultural land-suitability assessment (Abdullah *et al.*, 2025; Malczewski, 2006;

Mugiyo *et al.*, 2021), but logistics, cold-chain accessibility, and market access have not always been integrated into the same site-selection framework. This systematic literature review therefore identifies relevant factors, classifies them into natural, economic and supply-chain, and social scoring indicators together with ecological and policy constraints, and develops a framework for vegetable growing-area site selection in Tonghai County.

2. Research Objectives

To identify the key influencing factors and develop a comprehensive site-selection framework for vegetable growing areas in Tonghai County, China, through a systematic literature review.

3. Systematic Literature Review Method

3.1 Data Sources and Search Strategy

This review followed PRISMA 2020 (Page *et al.*, 2021), and two Scopus searches were conducted on 2 August 2026 using the Article title, Abstract, and Keywords fields. The main search focused on agricultural land suitability, crop suitability, agricultural site selection, and GIS-based multi-criteria decision making, while the supplementary search focused on fruit and vegetable cold chains, wholesale and logistics facilities, and market accessibility. Scopus was selected as the sole formal database because of its broad multidisciplinary coverage relevant to agriculture, GIS, logistics, and supply-chain research.

Both searches were limited to English-language peer-reviewed journal articles to maintain consistency in screening and data extraction; no publication-year restriction was applied, and the retrieved records were published between 2007 and 2026. The searches were conducted separately because GIS, AHP, and MCDM terms are not always used in cold-chain and market-accessibility studies and combining all terms could exclude relevant supply-chain studies. The complete search strategy is shown in Table 1.

3.2 Literature Screening

The two searches identified 139 records, including 77 from the main search and 62 from the supplementary search, with no duplicates found. After title and abstract screening, 92 records were excluded and 47 reports were sought for full-text



retrieval. Two unavailable reports were excluded from the formal synthesis and frequency calculations, leaving 45 full-text studies for inclusion (Table 2; Figure 1).

Table 1. Scopus Search Strategy and Search Results

Search	Purpose	Search String	Search Limits	Records Identified
Main search	Agricultural land suitability, crop suitability, agricultural site selection, and GIS-based multi-criteria decision making	("agricultural land suitability" OR "crop suitability" OR "agricultural site selection" OR "crop site selection" OR "agricultural suitability assessment") AND (GIS OR "geographic information system") AND (AHP OR MCDM OR "multi-criteria decision making" OR "multi-criteria analysis" OR "multicriteria analysis")	Scopus; Article title, Abstract, and Keywords; peer-reviewed journal article; English	77
Supply-chain supplementary search	Fruit and vegetable cold chains, logistics nodes, and market accessibility	(vegetable* OR "fresh produce" OR horticulture*) AND ("cold chain" OR "cold storage" OR "pre-cooling" OR "processing facility" OR "wholesale market" OR "logistics center" OR "distribution center") AND (accessibility OR "travel time" OR distance OR proximity)	Scopus; Article title, Abstract, and Keywords; peer-reviewed journal article; English	62

Note: No publication-year restriction was applied. The retrieved records were published between 2007 and 2026. Both searches were conducted on 2 August 2026.

Table 2. Literature Inclusion and Exclusion Criteria

Item	Inclusion Criteria	Exclusion Criteria
Research topic	Studies addressing agricultural land suitability, crop or agricultural site selection, agricultural spatial layout, or the accessibility of roads, cold-chain facilities, logistics facilities, and markets in relation to vegetable production areas	Studies limited to pests and diseases, crop-quality experiments, crop identification, internal warehouse operations, or logistics optimization without a direct connection to agricultural spatial layout or growing-area selection
Document type	Peer-reviewed journal research articles	Conference abstracts, editorials, book reviews, duplicate publications, and non-research materials
Language	English-language articles	Non-English publications
Information completeness	Full text available, with sufficient information for factor and method extraction	Full text unavailable; excluded from the formal synthesis and frequency calculations
Result content	At least one relevant site-selection factor, measurement approach, spatial effect, constraint treatment, or validation method could be extracted	No information relevant to framework construction was clearly reported

A coding sheet recorded study context, research method, natural, economic and supply-chain, and social factors, constraints, indicator measurement, and validation information. Title and abstract screening, full-text assessment, and data extraction were conducted by the first author using predefined criteria and the coding sheet; extracted information and factor classifications were rechecked against the full texts for consistency. Similar indicators representing the same site-selection meaning were combined, such as distance, accessibility, or travel time to roads and markets. Each article was counted once per combined indicator, although one article could support several indicators. Frequency represents the number of supporting studies, not indicator weight. Because the included studies used heterogeneous research designs, a single formal risk-of-bias tool was not applied. Methodological transparency was instead descriptively checked across factor reporting, measurement or spatialization, analytical method, and validation where applicable. The study-level evidence and methodological characteristics of the 45 included full-text studies are reported in Appendix A.

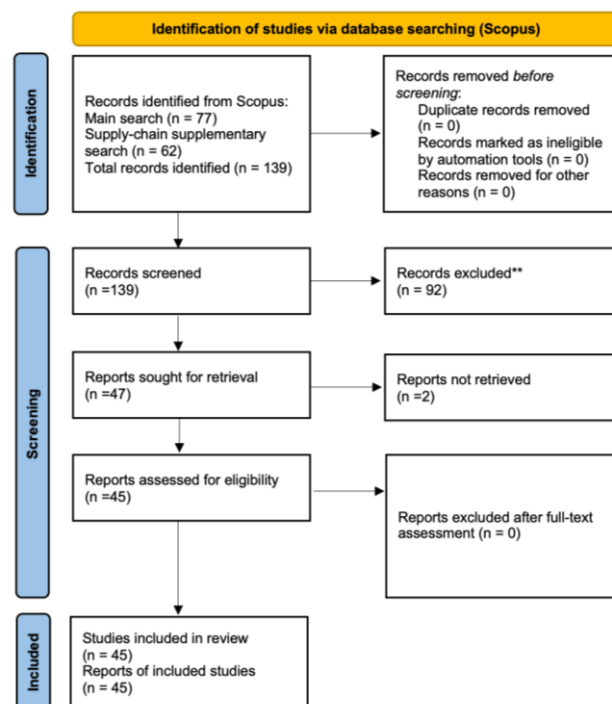


Figure 1. Identification and Screening of Studies Based on PRISMA 2020

3.3 Factor Classification and Framework Development

Following data extraction, the identified factors were synthesized in three steps. First, factors with equivalent site-selection meanings were standardized and grouped; for example, distance, accessibility, network distance, and travel time to the same destination were treated as a common accessibility concept. Second, the number of studies directly supporting each grouped factor was recorded as descriptive evidence rather than indicator weight. Third, candidate factors were assessed using five considerations: literature support, relevance to vegetable production and distribution, applicability to Tonghai County, feasibility of GIS-based spatial representation, and data availability. These considerations were applied jointly rather than as mandatory thresholds, allowing locally relevant and spatially measurable factors with limited direct support to be retained.

Based on this assessment, the retained factors were classified as natural, economic and supply-chain, or social scoring indicators, while legally or environmentally restricted areas were treated separately as ecological and policy constraints to prevent compensation by higher scores from other factors. This synthesis produced nine scoring indicators and three categories of ecological and policy constraints. Permanent Basic Farmland was retained as a policy layer because its treatment depends on the research objective and type of agricultural activity.

4. Literature Screening Results and Factor Identification

4.1 Screening and Methodological Characteristics

The final sample included 33 land-suitability studies and 12 supply-chain studies. The main search provided evidence on slope, temperature, soil conditions, and GIS-based multi-criteria decision making, while the supplementary search added evidence on cold-chain facilities, wholesale and logistics hubs, and export-market accessibility. The smaller number of supply-chain studies reflects the narrower scope of the supplementary search, which focused specifically on spatial accessibility relevant to growing-area selection. Therefore, the reported frequencies were interpreted as descriptive evidence rather than as directly comparable measures of factor importance.

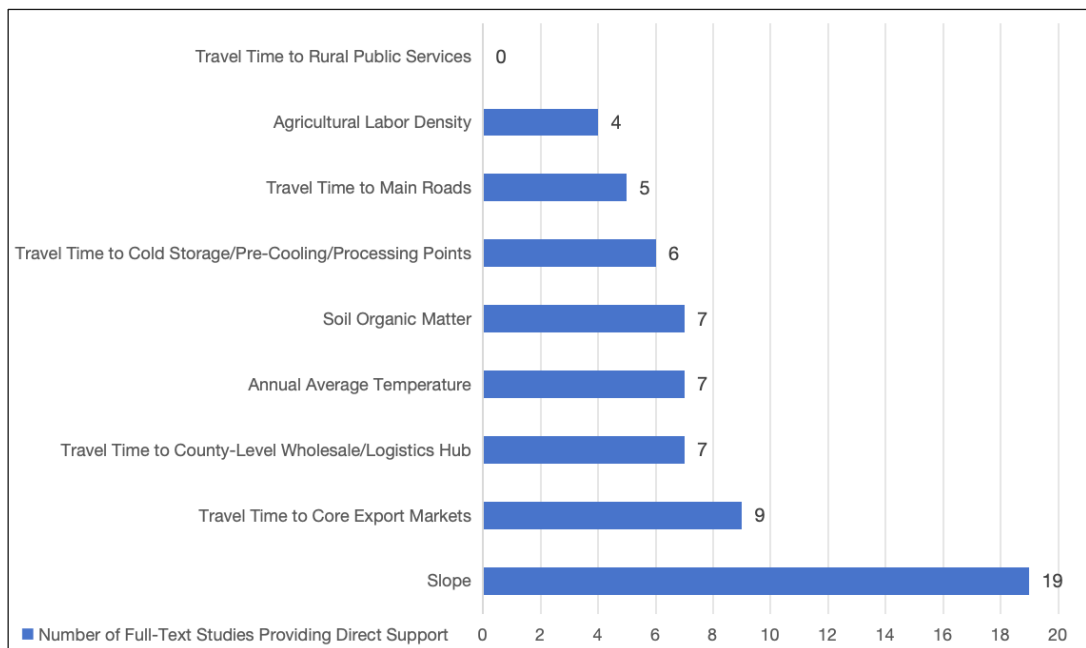
GIS combined with AHP, Fuzzy AHP, TOPSIS, WLC, and other multi-criteria methods was the dominant approach. Studies generally involved factor selection, weighting, spatial standardization, overlay, classification, and validation. Accessibility was measured using Euclidean distance, road-network distance, or travel time, while restricted areas were commonly treated using Boolean masks or other non-compensatory methods.

4.2 Natural Factors

Natural factors were widely used in the land-suitability studies. Slope appeared in 19 studies and was generally treated as a cost indicator because increasing slope may restrict cultivation and mechanization and increase erosion and infrastructure costs (Akinci *et al.*, 2013; Wotlolan *et al.*, 2021; Yalew *et al.*, 2016). Annual average temperature was supported by 7 studies and was treated as an interval indicator because temperatures below or above the suitable range may limit crop growth (Jayathilaka *et al.*, 2012; Sathiyamurthi *et al.*, 2024). Soil organic matter was also supported by 7 studies and was treated as a benefit indicator reflecting soil fertility, structure, and water-retention capacity (Sawant *et al.*, 2025; Sengupta *et al.*, 2022).

4.3 Economic and Supply-Chain Factors

Travel time to main roads was supported by 5 studies, county-level wholesale or logistics hubs by 7, cold-storage/pre-cooling/processing points by 6, and core export markets by 9 (**Figure 2**). Road-network travel time is preferable to straight-line distance because it reflects road class, connectivity, detours, and travel speed. Shorter travel times can reduce collection and postharvest delays and improve market access. Previous studies also show that facility location and transport distance affect logistics costs, service coverage, product loss, and economic returns (Abhinav *et al.*, 2022; Aljohani & Thompson, 2018; Ash *et al.*, 2017; Kamruzzaman & Takeya, 2008).



Note: Frequencies are based on the 45 included full-text studies. One study could support multiple indicators. Travel Time to Rural Public Services received no direct support and was retained based on local applicability and spatial measurability.

Figure 2. Direct Literature Support for the Nine Scoring Indicators

4.4 Social Factors and Ecological-Policy Constraints

Agricultural labor density or agricultural employment ratio was supported by 4 studies and treated as a benefit indicator reflecting labor availability for vegetable production and postharvest activities (Bose & Halder, 2023; Ozsahin & Ozdes, 2022; Zhu *et al.*, 2022). Travel Time to Rural Public Services received no direct full-text support but was retained as a locally applicable cost indicator reflecting access to agricultural extension and production services.

Three ecological and policy constraints were identified: Ecological Conservation Red Lines and Protected Areas, Drinking-Water Source Protection Zones and Buffer Areas, and Permanent Basic Farmland. Ecological and water-protection areas may be treated using Boolean masks or zoning rules. Permanent Basic Farmland requires treatment according to the research objective rather than automatic exclusion from agricultural suitability assessment. Separating constraints from scoring indicators prevents restricted areas from receiving high suitability through score compensation.



4.5 Framework for Tonghai County

After factor harmonization and application of the considerations described in Section 3.3, overlapping factors with the same site-selection function were merged, while highly crop-specific, duplicated, or insufficiently spatializable factors were not retained. The remaining candidates were assessed using literature support, relevance to vegetable production and distribution, applicability to Tonghai County, GIS-based spatial representation, and data availability.

This synthesis resulted in three natural factors, four economic and supply-chain factors, two social factors, and three categories of ecological and policy constraints. Table 3 summarizes their attributes, functions, GIS expressions, and evidence bases. Study-level evidence is provided in Appendix A.

Table 3. Factors Influencing Vegetable Growing-Area Site Selection in Tonghai County

Category	Indicator	Attribute/ Treatment	Main Function	GIS Expression	Evidence Basis
Natural	Slope	Cost	Cultivation, mechanization, erosion	DEM-derived slope raster	19 studies
	Annual Average Temperature	Interval optimum	Growth cycle and development	Climate raster/station interpolation	7 studies
	Soil Organic Matter	Benefit	Fertility, structure, water retention	Soil raster/sample interpolation	7 studies
Economic and supply-chain	Travel Time to Main Roads	Cost	Regional network access	Shortest road-network time	5 studies
	Travel Time to County-Level Wholesale/ Logistics Hubs	Cost	Collection, trading, distribution	Road-network time	7 studies
	Travel Time to Cold-Storage/Pre-Cooling/ Processing Points	Cost	Postharvest handling and preservation	Road-network time	6 studies
	Travel Time to Core Export Markets	Cost	Transport cost, timeliness, price transmission	Cross-regional road-network time	9 studies
Social	Agricultural Labor Density or Agricultural	Benefit	Production and postharvest labor support	Township statistics spatialization	4 studies



Category	Indicator	Attribute/ Treatment	Main Function	GIS Expression	Evidence Basis
	Employment Ratio				
	Travel Time to Rural Public Services	Cost	Production services and long-term support	Road-network time to service nodes	Local applicability
Ecological and policy constraints	Ecological Conservation Red Lines and Protected Areas	Boolean/ zoning	Prevent prohibited areas from score compensation	Official boundary mask	Studies + Chinese policy
	Drinking-Water Source Protection Zones and Buffer Areas	Boolean/ zoning	Control water-source risks	Official boundaries/buffers	Regulatory basis
	Permanent Basic Farmland	Policy layer	Land-use control; treatment varies by objective	Official boundaries	Chinese policy basis

The framework integrates natural production conditions with supply-chain accessibility and social support, while ecological and policy constraints are treated separately. It provides the factor basis for subsequent AHP weighting, GIS-based suitability evaluation, and constraint-layer processing in Tonghai County.

5. Discussion

5.1 Integration of Production and Supply-Chain Factors

Natural conditions remain the foundation of vegetable growing-area selection but do not fully represent the location requirements of perishable and market-oriented vegetables. Conventional land-suitability frameworks mainly emphasize biophysical production conditions, whereas the proposed framework also incorporates access to main roads, logistics hubs, cold-chain facilities, and core export markets. Conceptually, this extends site selection from a production-only perspective toward a production–distribution perspective. Methodologically, these supply-chain dimensions are expressed as GIS-compatible accessibility indicators, allowing production suitability and distribution accessibility to be evaluated within the same spatial framework.

5.2 Value of Travel-Time Indicators

Straight-line distance does not reflect road hierarchy, network connectivity, detours, or travel speed. This is particularly relevant in Tonghai County, where vegetable-growing areas are distributed across basin and mountainous terrain. Road-network travel time is therefore a more practical accessibility measure. Previous studies also demonstrate its importance: relocation of Melbourne's wholesale market increased retailer travel distance by 31% and wholesaler travel by 14.1 km per delivery (Aljohani & Thompson, 2018), while GIS-based cold-storage planning in Kolar District reduced the maximum distance to the nearest facility from 50.97 km to 13.98 km (Abhinav *et al.*, 2022). These findings support the use of travel-time indicators in vegetable growing-area selection.

5.3 Local Applicability and Policy Constraints

The framework is locally relevant to Tonghai County because its perishable and market-oriented vegetable production is distributed across a basin–mountain landscape, making access to roads, logistics hubs, cold-chain facilities, and external markets important for postharvest handling and distribution. Literature frequency was not the sole basis for factor retention. Travel Time to Rural Public Services received no direct full-text support but was retained because it represents spatially measurable access to agricultural extension and production services. The ecological and policy constraints were retained mainly according to Chinese regulatory and planning requirements rather than international literature frequency.

Scoring indicators were separated from ecological and policy constraints because restricted areas should not be compensated by higher scores from other factors. Boolean masks or zoning rules are therefore more appropriate for such restrictions. Permanent Basic Farmland requires separate treatment because its interpretation depends on the planning objective and type of agricultural activity.

5.4 Limitations

This review used Scopus as the sole formal database and may have omitted relevant Chinese-language or local studies. Two potentially relevant reports were unavailable in full text and were excluded from the formal synthesis. Literature frequency reflects direct support rather than indicator weight, which requires separate

expert judgment and AHP. Locally specific social and policy factors also require verification using official planning and spatial data.

6. Conclusions

Two Scopus searches identified 139 records, of which 45 full-text studies were included. Slope was the most frequently supported natural factor, while the four supply-chain accessibility indicators received 27 direct-support occurrences, confirming the relevance of roads, logistics facilities, cold-chain services, and market access to vegetable growing-area selection.

The final framework contains nine scoring indicators and three categories of ecological and policy constraints. It integrates production suitability with Tonghai-relevant supply-chain accessibility and separates compensatory scoring indicators from non-compensatory spatial constraints. The framework provides a basis for AHP weighting and GIS-based suitability evaluation in Tonghai County and may also inform commercially oriented and externally connected vegetable-producing areas where topographic variation and access to roads, logistics hubs, cold-chain facilities, and external markets are important site-selection considerations.

7. Acknowledgments

This research work was partially supported by Faculty of Logistics and Digital Supply Chain, Naresuan University, including ASEAN Logistics Academic Network (ALA), Thailand.

8. References

- Abdullah, N., Zolkafli, A., & Omar, M. (2025). Advancements and integration of biophysical, socio-economic, and local knowledge in agricultural land suitability assessments: A systematic literature review. *Mesopotamia Journal of Agriculture*, 53(1), 168–192. Doi: 10.33899/mja.2025.156944.1531
- Abhinav, A., Chethan, V. A., Pancholi, S., Mohan, P. D., Rayyan, S. M., & Pandey, K. (2022). GIS-based infrastructure planning of cold storages for crop preservation: A case

- study of Kolar District, Karnataka. **Spatial Information Research**, 30(4), 489–495.
Doi: 10.1007/s41324-022-00446-5
- Akinci, H., Özalp, A. Y., & Turgut, B. (2013). Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. **Computers and Electronics in Agriculture**, 97, 71–82.
Doi: 10.1016/j.compag.2013.07.006
- Aljohani, K., & Thompson, R. G. (2018). The impacts of relocating a logistics facility on last food miles: The case of Melbourne’s fruit and vegetable wholesale market. **Case Studies on Transport Policy**, 6(2), 279–288. Doi: 10.1016/j.cstp.2018.03.007
- Ash, A., Gleeson, T., Hall, M., Higgins, A., Hopwood, G., MacLeod, N., . . . Wilson, P. (2017). Irrigated agricultural development in northern Australia: Value-chain challenges and opportunities. **Agricultural Systems**, 155, 116–125. Doi: 10.1016/j.agry.2017.04.010
- Bose, S., & Halder, S. (2023). Identification of crop suitable land using geospatial techniques and assessment with socio-economic factors—Case study from India. **Asia-Pacific Journal of Regional Science**, 7(1), 229–253. Doi: 10.1007/s41685-023-00274-x
- Jayathilaka, P. M. S., Soni, P., Perret, S. R., Jayasuriya, H. P. W., & Salokhe, V. M. (2012). Spatial assessment of climate change effects on crop suitability for major plantation crops in Sri Lanka. **Regional Environmental Change**, 12(1), 55–68.
Doi: 10.1007/s10113-011-0235-8
- Kamruzzaman, M., & Takeya, H. (2008). Influence of technology responsiveness and distance to market on capacity building. **International Journal of Vegetable Science**, 14(3), 216–231. Doi: 10.1080/19315260802164848
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, 20(7), 703–726. Doi: 10.1080/13658810600661508
- Mugiyo, H., Chimonyo, V. G. P., Sibanda, M., Kunz, R., Masemola, C. R., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2021). Evaluation of land suitability methods with reference to neglected and underutilised crop species: A scoping review. **Land**, 10(2), 125.
Doi: 10.3390/land10020125

- Özşahin, E., & Özdeş, M. (2022). Agricultural land suitability assessment for agricultural productivity based on GIS modeling and multi-criteria decision analysis: The case of Tekirdağ Province. **Environmental Monitoring and Assessment**, 194(1), 41. Doi: 10.1007/s10661-021-09663-1
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., . . . Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, 372, n71. Doi: 10.1136/bmj.n71
- Sathiyamurthi, S., Saravanan, S., Karuppannan, S., Balakumbahan, R., Sivasakthi, M., Praveen Kumar, S., . . . Tariq, A. (2024). Agricultural land suitability of Manimutha Nadhi watershed using AHP and GIS techniques. **Discover Sustainability**, 5(1), 270. Doi: 10.1007/s43621-024-00471-4
- Sawant, N., Das, B., Mahajan, G., Desai, S., Raizada, A., Kumar, P., & Singh, P. (2025). Crop suitability analysis for the coastal region of India through fusion of remote sensing, geospatial analysis and multi-criteria decision making. **Scientific Reports**, 15(1), 8727. Doi: 10.1038/s41598-025-90754-1
- Sengupta, S., Mohinuddin, Sk., Arif, M., Sengupta, B., & Zhang, W. (2022). Assessment of agricultural land suitability using GIS and fuzzy analytical hierarchy process approach in Ranchi District, India. **Geocarto International**, 37(26), 13337–13368. Doi: 10.1080/10106049.2022.2076925
- Wotlolan, D. L., Lowry, J. H., Wales, N. A., & Glencross, K. (2021). Land suitability evaluation for multiple crop agroforestry planning using GIS and multi-criteria decision analysis: A case study in Fiji. **Agroforestry Systems**, 95(8), 1519–1532. Doi: 10.1007/s10457-021-00661-3
- Yalew, S. G., Van Griensven, A., & Van Der Zaag, P. (2016). AgriSuit: A web-based GIS-MCDA framework for agricultural land suitability assessment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 128, 1–8. doi:10.1016/j.compag.2016.08.008
- Zhu, X., Xiao, G., & Wang, S. (2022). Suitability evaluation of potential arable land in the Mediterranean region. **Journal of Environmental Management**, 313, 115011. Doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115011

Appendix A

Table A1. Study-Level Evidence Matrix for the 45 Included Full-Text Studies

Study	Study Context	Method / Measurement	Supported Indicator(s)	Methodological Characteristics
Bozdağ <i>et al.</i> (2016) AHP and GIS based land suitability analysis for Cihanbeyli (Turkey) County	Cihanbeyli County, Turkey; dryland and irrigated agriculture.	GIS-AHP; soil, land use, climate, topography, irrigation-water quality, groundwater depth; slope classes.	N1	Separate dryland and irrigated suitability models; AHP hierarchy and comparison with current land use.
Sengupta <i>et al.</i> (2022) Assessment of agricultural land suitability using GIS and fuzzy analytical hierarchy process approach in Ranchi District, India	Ranchi District, India; agricultural land suitability.	GIS-fuzzy AHP; climatic, topographic, soil and road/river accessibility factors; membership functions.	N1, N2, N3, E1	Weighted overlay with fuzzy standardization; MAE and RMSE used for model evaluation.
Sathiyamurthi <i>et al.</i> (2024) Agricultural land suitability of Manimutha Nadhi watershed using AHP and GIS techniques	Manimutha Nadhi watershed, India; agricultural land suitability.	GIS-AHP; 57 soil samples; 20-year climate data; kriging; SRTM-derived slope.	N1, N2, N3	AHP consistency ratio = 0.028; weighted overlay and FAO five-class suitability mapping.
Akinci <i>et al.</i> (2013) Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique	Turkey; agricultural land-use suitability.	GIS-AHP; nine parameters; weighted overlay; post-overlay exclusion of restricted land.	N1	AHP CR = 0.0674; 1-10 subclass scoring; forests, grassland and reservoir areas excluded from final map.
Bose & Halder (2023) Identification of crop suitable land using geospatial techniques and assessment with socio-economic factors—case study from India	India; multiple crops including vegetables.	GIS-AHP; natural, road-network and socio-economic factors.	N1, E1, S1	RMSE validation (about 11%); agricultural productivity and labor compared with suitability results.
Shawon <i>et al.</i> (2025) Land suitability Analysis for Sustainable Agriculture Development using Multi-Criteria Analysis and Machine Learning Techniques: Case Study of Shibpur Upazila	Shibpur Upazila; sustainable agricultural land suitability.	Multi-criteria analysis and machine-learning techniques; slope, elevation, land cover, flood risk and soil conditions.	N1	Three suitability classes and parcel-level land information system; public full text provides limited weighting/standardization detail.
Wotlolan <i>et al.</i> (2021) Land suitability evaluation for multiple crop agroforestry planning using GIS and multi-criteria decision analysis: A case study in Fiji	Sigatoka Valley, Fiji; multi-crop agroforestry planning.	Single-crop land-suitability models; GIS-MCDA; AHP for benefit objectives; Weighted Maximum model.	S1	Scenario-based multi-crop spatial allocation integrating crop requirements, expert judgment and planning objectives.



Study	Study Context	Method / Measurement	Supported Indicator(s)	Methodological Characteristics
Sathiyamurthi <i>et al.</i> (2024) Assessment of crop suitability analysis using AHP-TOPSIS and geospatial techniques: A case study of Krishnagiri District, India	Krishnagiri District, India; crop suitability assessment.	GIS; AHP-TOPSIS; climate, soil and topographic criteria.	N1, N2, N3	AHP used for weighting and TOPSIS for crop ranking; supports combined multi-method suitability assessment.
Paul <i>et al.</i> (2020) Assessment of agricultural land suitability for irrigation with reclaimed water using geospatial multi-criteria decision analysis	Agricultural land suitability for irrigation with reclaimed water.	GIS-MCDA and AHP; agricultural land, climate, water policy, irrigation status and distance to wastewater-treatment facilities.	—	One-at-a-time +10% weight sensitivity analysis; supports facility-distance/accessibility as a spatial criterion.
Jayathilaka <i>et al.</i> (2012) Spatial assessment of climate change effects on crop suitability for major plantation crops in Sri Lanka	Six agro-ecological regions in Sri Lanka; tea, rubber and coconut.	GIS-AHP; 45 experts; annual rainfall, humidity, annual average temperature, evapotranspiration and yield; IDW interpolation.	N2	Two climate periods compared; climate and suitability maps used to assess spatial change.
Abdullah <i>et al.</i> (2025) ADVANCEMENTS AND INTEGRATION OF BIOPHYSICAL, SOCIO-ECONOMIC, AND LOCAL KNOWLEDGE IN AGRICULTURAL LAND SUITABILITY ASSESSMENTS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW	Systematic review of agricultural land-suitability assessment studies.	PRISMA; Scopus and Web of Science; review of GIS-MCDM, machine learning, hybrid models and socio-economic/local knowledge.	—	Synthesized 34 studies and highlighted methodological gaps in validation, parameter standardization and socio-economic integration.
Karaelmas <i>et al.</i> (2026) GIS and AHP-Based Agricultural Land-Use Suitability Analysis in Semi-Arid Regions of Southeastern Türkiye	Semi-arid southeastern Türkiye; agricultural land-use suitability.	GIS-AHP; eight ecological criteria; FAO five-class suitability.	N1	Expert weighting and weighted overlay; ROC validation with AUC = 0.815.
Ezz & Abdel-Wahab (2025) Land Suitability Mapping for Sustainable Agriculture in Egypt's Western Desert: A GIS-AHP Framework	Egypt's Western Desert; sustainable agricultural land suitability.	FAO framework, GIS-AHP and weighted overlay; soil, slope, evapotranspiration, precipitation and land use.	N1	Integrated FAO land-suitability logic with AHP-GIS for dryland agricultural planning.
Leila <i>et al.</i> (2026) Integrated multi-criteria decision analysis and GIS for sustainable agricultural land use planning: the Saf Saf Basin, Northeastern Algeria	Saf Saf Basin, northeastern Algeria; sustainable agricultural land-use planning.	GIS-AHP and weighted linear combination; nine physical criteria including slope and road distance.	N1, E1	Expert AHP weighting (CR = 0.0993); 1-9 subclass scoring and five-class suitability mapping.

Study	Study Context	Method / Measurement	Supported Indicator(s)	Methodological Characteristics
Zhu <i>et al.</i> (2022) Suitability evaluation of potential arable land in the Mediterranean region	Mediterranean region; potential arable land.	AHP, CRITIC and artificial neural network; 15 natural and socio-economic factors.	N2, N3	Extreme aridity without irrigation excluded; results validated against mean yield and harvested-area relationships.
Hussain <i>et al.</i> (2024) Agricultural land suitability analysis of Southern Punjab, Pakistan using analytical hierarchy process (AHP) and multi-criteria decision analysis (MCDA) techniques	Southern Punjab, Pakistan; agricultural land suitability.	AHP and MCDA; terrain, soil, climate, irrigation and land-use factors.	—	Hierarchical pairwise comparison and multi-factor integration; about 43% of the study area classified as highly suitable.
Ozsahin & Ozdes (2022) Agricultural land suitability assessment for agricultural productivity based on GIS modeling and multi-criteria decision analysis: the case of Tekirdağ province	Tekirdağ Province, Türkiye; agricultural productivity suitability.	GIS-MCDA; six criterion groups and 37 variables including temperature, soil properties, water access and farmer-related variables.	N1, S1	Model calibration/validation used NSE, RSR, PBIAS and R ² .
Nungula <i>et al.</i> (2024) Multicriteria land suitability assessment for cassava and bean production using integration of GIS and AHP	Cassava and bean production; crop-specific land suitability.	GIS-AHP; topographic, climatic and soil criteria; separate crop models.	—	AHP used for main/sub-criterion weights and ArcGIS for spatial suitability mapping.
Everest <i>et al.</i> (2021) Determination of agricultural land suitability with a multiple-criteria decision-making method in Northwestern Turkey	Northwestern Turkey; agricultural land suitability.	AHP-GIS; seven land/terrain parameters; exclusion of forest, settlement, water and road areas.	N1	Weighted suitability mapping combined with post-overlay hard exclusions.
Saha & Gayen (2025) Identification of suitable land for sustainable agricultural practices in Koch Bihar district, West Bengal: A RS-GIS based MCDA approach	Koch Bihar District, West Bengal, India; sustainable agriculture.	Remote sensing, GIS and MCDA; 15 terrain, soil, hydrologic, climate and land-use variables.	N1	Integrated multi-factor suitability assessment with weighted spatial layers and final suitability mapping.
Baja <i>et al.</i> (2007) Spatial based compromise programming for multiple criteria decision making in land use planning	Land-use planning; multiple spatial criteria.	GIS-MCDM; fuzzy standardization; compromise programming; road accessibility and water-body proximity.	E1	Explored compensatory to non-compensatory decision settings and sensitivity; road proximity derived from nearest-road distance.
Baite <i>et al.</i> (2024) Agricultural land suitability analysis in Manipur, India using GIS and AHP	Manipur, India; agricultural land suitability.	GIS-AHP and remote sensing; eight terrain, soil, climate and land-use variables.	N1	AHP pairwise weighting and five-class suitability mapping.

Study	Study Context	Method / Measurement	Supported Indicator(s)	Methodological Characteristics
Sawant <i>et al.</i> (2025) Crop suitability analysis for the coastal region of India through fusion of remote sensing, geospatial analysis and multi-criteria decision making	Coastal India; rice and coconut suitability.	Remote sensing, GIS and AHP; elevation, slope, soil properties, rainfall, temperature and LULC constraint.	N1, N3	Crop-specific suitability mapping; land use/land cover treated as a constraint layer.
Esomchukwu Chinagorom <i>et al.</i> (2025) A GIS-based analytical hierarchy process modeling for agricultural-land suitability in Awka South local government area	Awka South local government area; agricultural land suitability.	GIS-AHP; slope, elevation, soil, temperature, rainfall, drainage network and land use.	N1	Factor reclassification, standardization, AHP consistency testing and weighted suitability mapping.
Bayar & Karabacak (2026) Assessment of agricultural land suitability using GIS-based fuzzy logic and multi-criteria decision analysis: a case study of Silifke district, Türkiye	Silifke District, Türkiye; agricultural land suitability.	GIS-based fuzzy logic and MCDA; physical, human and economic factors.	—	AHP weighting and fuzzy treatment of spatial uncertainty; suitability compared with current agricultural land use.
Abate & Anteneh (2024) Assessment of agricultural land suitability for cereal crops based on the analysis of soil physico-chemical characteristics	Rainfed cereal crops (barley, wheat and teff); agricultural land suitability.	MCDM; climate, slope and field/laboratory soil physico-chemical measurements.	N1, N3	Crop-specific matching using observed soil and environmental properties.
Elsheikh <i>et al.</i> (2013) Agriculture Land Suitability Evaluator (ALSE): A decision and planning support tool for tropical and subtropical crops	Tropical and subtropical crops; decision-support tool.	ALSE system integrating FAO-SYS, GIS and expert knowledge for mango, banana, papaya, citrus and guava.	—	Reusable rule/knowledge-based land-suitability evaluator for multiple crops.
Kaur <i>et al.</i> (2024) Agro-Eco-Resource Zonation (AERZ) for sustainable agriculture using GIS and AHP techniques in Indian Punjab	Indian Punjab; agro-eco-resource zonation.	GIS-AHP; temperature, rainfall, soil organic carbon, soil properties and groundwater; IDW spatialization.	N3	Hierarchical AHP with consistency checks; final zones compared with rice and wheat yield maps.
Xu <i>et al.</i> (2024) Agricultural Land Suitability Assessment at the County Scale in Taiyuan, China	Taiyuan, China; county-scale agricultural land suitability.	GIS-AHP at 1-km resolution; natural and social criteria; urban land and nature-reserve constraints.	C1	Weighted suitability assessment followed by removal of urban-construction and protected areas.

Study	Study Context	Method / Measurement	Supported Indicator(s)	Methodological Characteristics
Xue <i>et al.</i> (2023) Agricultural land suitability analysis for an integrated rice–crayfish culture using a fuzzy AHP and GIS in central China	Central China; integrated rice–crayfish culture.	Fuzzy AHP and GIS; accumulated temperature, water distance, slope, land use and soil texture.	N1, N2	Crop-system-specific suitability weighting and spatial mapping.
Yalew <i>et al.</i> (2016) AgriSuit: A web-based GIS-MCDA framework for agricultural land suitability assessment	AgriSuit web-GIS-MCDA framework; Abbay Basin demonstration.	Google Earth Engine, QGIS and webAHP; land cover, slope, elevation, soil/water stress and proximity factors.	N1, C1	FAO S1-S3/N reclassification; AHP consistency demonstration; protected areas, forest and water included in unsuitable class.
Dutta <i>et al.</i> (2024) Land capability assessment of Sali watershed for agricultural suitability using a multi-criteria-based decision-making approach	Sali watershed; agricultural land capability and crop planning.	MCDM integrating climate, soil fertility, topography and socio-economic factors.	—	Land-capability assessment used to identify potential agricultural areas and support crop-layout planning.
Rahman & Saha (2008) Remote sensing, spatial multi criteria evaluation (SMCE) and analytical hierarchy process (AHP) in optimal cropping pattern planning for a flood prone area	Flood-prone agricultural area; multi-crop planning.	Remote sensing, spatial multi-criteria evaluation and AHP; flood, land use and crop-suitability layers.	—	Combined hazard and crop-specific suitability information to derive an optimal cropping pattern.
Addressing the location problem of a perishables redistribution center in the middle of Europe (2021)	Central Europe; perishables redistribution-center location.	Facility-location models including center-of-gravity, p-median and p-center approaches.	E2	Compared alternative redistribution-center locations to reduce transport burden and perishability-related loss.
Modeling the carbon footprint of fresh produce: effects of transportation, localness, and seasonality on US orange markets (2020)	U.S. orange markets; fresh-produce supply chain.	Life-cycle/carbon-footprint modeling of transportation, localness and seasonality.	E4	Quantified how transport and market connection influence fresh-produce supply-chain impacts.
The impacts of relocating a logistics facility on last food miles – The case of Melbourne's fruit & vegetable wholesale market (2018)	Melbourne's fruit and vegetable wholesale market, Australia.	Before/after relocation analysis using retailer telephone survey and semi-structured interviews with 19 wholesalers.	E2, E4	Relocation increased retailer vehicle-kilometers by 31% and wholesaler travel by 14.1 km per delivery; supports wholesale-market accessibility.

Study	Study Context	Method / Measurement	Supported Indicator(s)	Methodological Characteristics
Management of Postharvest Losses and Wastages in the Indian Tomato Supply Chain—A Temperature-Controlled Storage Perspective (2023)	Indian tomato supply chain; postharvest losses.	Temperature-controlled storage perspective on postharvest loss and wastage.	N2, E3	Demonstrates the role of refrigerated/temperature-controlled storage in preserving vegetable value.
Irrigated agricultural development in northern Australia: Value-chain challenges and opportunities (2017)	Northern Australia; irrigated agricultural development and value chains.	Systems/value-chain scenario analysis covering production potential, margins, transport, processing, storage, labor, services and markets.	E2, E3, E4, S1	Long transport distances (1,500-3,000 km) reduced margins for high-volume/low-value crops; nearer markets and local processing improved returns.
Urban transportation network design for fresh fruit and vegetables using gis-the case of bangkok (2019)	Bangkok; urban transport network for fresh fruit and vegetables.	GIS-based transport-network design incorporating time windows, delivery routes and cold-chain conditions.	E2, E3, E4	Shows how logistics-node and market connections can be represented through urban network design.
Winter is coming: the battle over cold chain logistics in the global agriculture (2025)	Murcia, Spain; export-oriented agricultural cold chain.	Qualitative interviews with logistics quality staff and transport practitioners; supporting official trade/statistical databases.	E3, E4	Highlights long-distance refrigerated transport, storage and specialized perishable-goods management as conditions for export-market access.
GIS based infrastructure planning of Cold Storages for Crop Preservation: a case study of Kolar District, Karnataka (2022)	Kolar District, Karnataka, India; cold-storage infrastructure.	GIS planning using agricultural cover, villages, road network, existing cold stores and production data; buffering, overlay and spatial clustering.	E1, E3	Proposed 50 new cold stores; maximum village-to-cold-store distance reduced from 50.97 km to 13.98 km.
A Multi-Objective Model to Find the Sustainable Location for Citrus Hub (2022)	Citrus supply chain; hub-location problem.	Multi-objective location model integrating farms, collection points, distribution centers and transport cost.	E2, E4	Optimizes hub location under multiple supply-chain objectives.

Study	Study Context	Method / Measurement	Supported Indicator(s)	Methodological Characteristics
Influence of technology responsiveness and distance to market on capacity building (2008)	Vegetable producers in Bangladesh; market access and capacity building.	Producer survey and multiple regression; market distance, technology responsiveness, age and farm size.	E2, E4	Market distance had a standardized coefficient of -0.41; producers nearer wholesale markets showed stronger capacity-building outcomes.
The role of fuel prices in spatial price transmission between horticultural markets: Empirical analysis from a developing country (2021)	Horticultural-market network in a developing-country context.	Spatial price-transmission analysis linking market distance and fuel/transport costs.	E2, E4	Shows that transport cost influences the strength and efficiency of market connections.
A Deep Reinforcement Learning-Based Algorithm for Multi-Objective Agricultural Site Selection and Logistics Optimization Problem (2024)	Agricultural site selection and logistics optimization.	Deep-reinforcement-learning multi-objective model integrating cold storage, market demand, infrastructure and delivery routes.	E3, E4	Jointly optimizes agricultural location and logistics decisions.

Note: N1 = Slope; N2 = Annual Average Temperature; N3 = Soil Organic Matter; E1 = Travel Time to Main Roads; E2 = Travel Time to County-Level Wholesale/Logistics Hubs; E3 = Travel Time to Cold-Storage/Pre-Cooling/Processing Points; E4 = Travel Time to Core Export Markets; S1 = Agricultural Labor Density or Agricultural Employment Ratio; S2 = Travel Time to Rural Public Services; C1 = Ecological Conservation Red Lines and Protected Areas; C2 = Drinking-Water Source Protection Zones and Buffer Areas; C3 = Permanent Basic Farmland.

การลดของเสียในกระบวนการปั๊มขึ้นรูปฝาคอบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์โดย ประยุกต์ใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 ประการ WASTE REDUCTION IN THINNER CONTAINER CAP STAMPING PROCESS USING 7 QC TOOLS

อิทธิพล เนคมานุรักษ์, ณัฐวุฒิ ศรีดี, อีรศักดิ์ แยมอ่วม, ดาราวรรณ วีรานันต์*

Itthipol Nekmanurak, Nattawut Sridee, Teerasak Yaemaum, Darawan Weeranant*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10800

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bang Sue, Bangkok, Thailand, 10800

*Corresponding author e-mail: Darawan.w@rmutp.ac.th

วันที่รับระบบ 23 กรกฎาคม 2569

วันที่แก้ไขบทความ 31 สิงหาคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ 31 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัญหา สาเหตุ และแนวทางในการลดของเสียในกระบวนการปั๊มขึ้นรูปฝาคอบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์ของโรงงานกรณีศึกษา จากการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2568 พบว่ากระบวนการผลิตฝาคอบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์สร้างความสูญเสียทางต้นทุนสูงที่สุดเป็นเงิน 68,112.45 บาท ผู้วิจัยจึงได้นำเครื่องมือควบคุมคุณภาพ (7 QC Tools) มาใช้ในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหา ผลการวิเคราะห์พบว่า ขั้นตอนการตัดขอบและขั้นตอนการเจาะเป็นจุดวิกฤตที่ทำให้เกิดของเสียรวมกันถึงร้อยละ 88.47 ของของเสียทั้งหมด โดยมีลักษณะของเสียหลักคือ ชิ้นงานบุบ ชิ้นงานปั๊มซ้อน และชิ้นงานปั๊มขาด แนวทางการแก้ไขดังนี้ ปรับปรุงวิธีการปฏิบัติงานโดยลดจำนวนการเรียงชิ้นงานในเสาบรรจุจากเดิม 80 ชิ้น เหลือไม่เกิน 32 ชิ้น เพื่อลดแรงกดทับ และ กำหนดอายุการใช้งานและระยะเวลาการเปลี่ยนวาล์วลมควบคุมการเป่าชิ้นงานทุก ๆ 7 วัน หรือทุก 160,000 ชิ้น ผลการดำเนินงานพบว่า สามารถลดของเสียจากปัญหาชิ้นงานบุบจากเดิม 11,468 ชิ้น (ร้อยละ 1.05) เหลือเพียง 2,401 ชิ้น (ร้อยละ 0.2) และลดของเสียจากปัญหาชิ้นงานปั๊มซ้อนและชิ้นงานปั๊มขาดจากเดิม 6,520 ชิ้น (ร้อยละ 2.37) เหลือเพียง 1,354 ชิ้น (ร้อยละ 0.77) ส่งผลให้สถานการณ์ผลิตรวมอยู่ภายใต้การควบคุมทางสถิติอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เครื่องมือคุณภาพ 7 ประการ, แผนภูมิแก๊งปลา, แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย, การปั๊มขึ้นรูป, การลดของเสีย

Abstract

This study aimed to investigate the problems and root causes of defects in the stamping process for thinner-container caps at a case-study factory and to develop appropriate defect-reduction measures. Data collected from February to May 2025 revealed that the production of thinner-container caps incurred the highest defect-related cost, amounting to THB 68,112.45. The seven basic quality control tools (7 QC Tools) were therefore applied to analyze and address the identified problems. The analysis showed that the trimming and piercing operations were the critical stages, together accounting for 88.47% of all defects. The principal defect types were dented parts, double-stamped parts, and incompletely stamped parts. Two corrective measures were implemented. First, the operating procedure was revised by reducing the number of parts stacked in each loading column from 80 to no more than 32 to minimize compressive force. Second, a preventive replacement interval was established for the pneumatic valve controlling the part-ejection airflow, requiring replacement every seven days or after the production of 160,000 parts. Following implementation, the number of dented parts decreased from 11,468 (1.05%) to 2,401 (0.20%). The combined number of double-stamped and incompletely stamped parts decreased from 6,520 (2.37%) to 1,354 (0.77%). These improvements effectively reduced the number of defects and brought the production process back under statistical control.

Keywords: 7 QC tools, Fishbone diagram, P-chart, Stamping process, Defect reduction

1. บทนำ

ในสภาวะเศรษฐกิจปัจจุบันที่มีการแข่งขันสูงในอุตสาหกรรมการผลิต ความอยู่รอดและการสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันขององค์กรขึ้นอยู่กับความสามารถในการผลิตสินค้าให้ตรงตามความต้องการของตลาดและสร้างความพึงพอใจสูงสุดแก่ลูกค้า การปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการผลิตเพื่อลดต้นทุนและการลดของเสีย (Defect) จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง โดยโรงงานกรณีศึกษา เป็นโรงงานผลิตฝาเกลียวบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์ โดยการนำแผ่นเหล็กมาทำการปั๊มขึ้นรูปเป็นฝาเกลียวชนิด



ต่างๆ โดยมีผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 4 ประเภทคือ ฝาเกลียวปิดบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์ ฝาในรูเปิดบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์ ฝาบัดกรี และฝาคอบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์ ซึ่งจากระยะเวลาที่ผ่านมาทางโรงงานกรณีศึกษาได้พบปัญหาต่างๆ เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เช่น ปัญหาในการตรวจสอบวัตถุดิบก่อนเข้ากระบวนการผลิต เครื่องจักรไม่ได้รับการบำรุงรักษา เป็นต้น ซึ่งปัญหาของเสียระหว่างกระบวนการผลิตนั้นเป็นอีกปัญหาที่เกิดขึ้นอยู่บ่อยครั้ง จากการศึกษากระบวนการทำงานและข้อมูลของเสีย

ตารางที่ 1 ข้อมูลปริมาณของเสีย ราคาและต้นทุน ในเดือนกุมภาพันธ์ ถึง พฤษภาคม

ชนิดของฝาที่ผลิต	ราคาขาย (บาท)	ต้นทุน (บาท)	ของเสีย (ชิ้น)	สูญเสียต้นทุน (บาท)
ฝาคอบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์	0.60	0.35	194,607	68,112.45
ฝาในบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์	0.30	0.18	284,870	51,276.6
ฝาเกลียวปิดบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์	0.62	0.32	70,005	22,401.6
ฝาบัดกรี	0.60	0.35	11,898	4,164.3
รวม		1.20	561,380	145,954.95

โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตฝาเกลียวบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์ ซึ่งมีผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 4 ประเภท จากการรวบรวมข้อมูลปริมาณของเสียและต้นทุนความสูญเสียในรอบ 4 เดือน (กุมภาพันธ์ – พฤษภาคม พ.ศ. 2568) พบว่าโรงงานสูญเสียต้นทุนรวมทั้งสิ้น 145,954.95 บาท โดยผลิตภัณฑ์ประเภท "ฝาคอบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์" มีปริมาณของเสียสูงถึง 194,607 ชิ้น คิดเป็นมูลค่าความสูญเสีย 68,112.45 บาท ซึ่งถือเป็นต้นทุนความสูญเสียที่สูงที่สุดในบรรดาผลิตภัณฑ์ทั้งหมด จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาปัญหาและสาเหตุของการเกิดของเสียที่เกิดจากขั้นตอนป้อนชิ้นรูปในการผลิตฝาคอบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์

2.2 เพื่อเสนอแนะแนวทางในการลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์

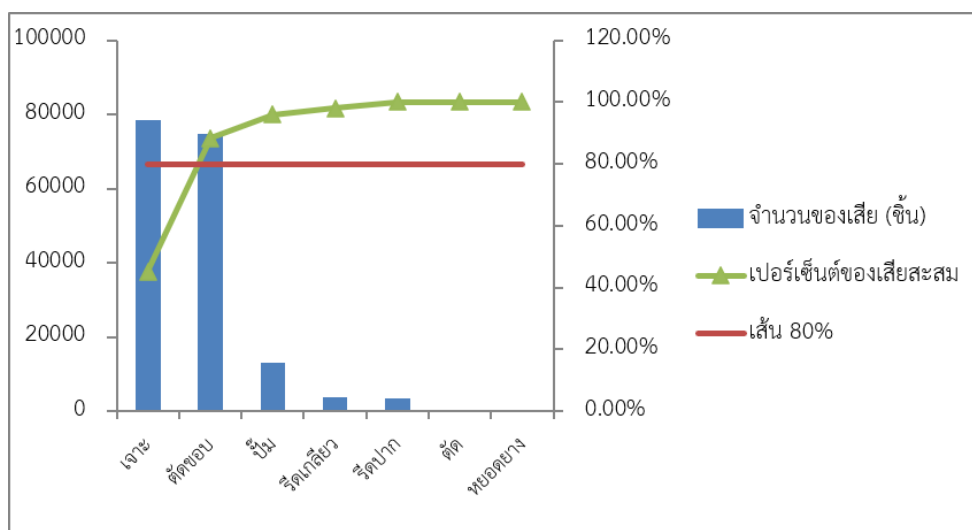
3. วิธีดำเนินงานวิจัย

เนื้อหาในส่วนนี้ผู้วิจัยแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 4 ส่วนหลัก ดังนี้

3.1 ศึกษากระบวนการผลิต กระบวนการผลิตฝาคอबरจุภัณฑ์ทินเนอร์มีทั้งหมด 7 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนตัดเหล็กแผ่น ปั่น ตัดขอบ รีดปาก รีดเกลียว หยอดยางและสุดท้ายคือขั้นตอนการเจาะ

3.2 การวิเคราะห์แยกแยะปัญหาด้วยแผนภูมิพาเรโต

จากการเก็บข้อมูลปริมาณของเสียรวม 4 เดือน (จำนวนของเสียรวม 128,205 ชิ้น) ผู้วิจัยได้นำสถิติมาจัดลำดับชั้นความสำคัญ พบว่า ขั้นตอนที่มีสัดส่วนของเสียมากที่สุดคือ ขั้นตอนตัดขอบ เจาะ ปั่น รีดเกลียว รีดปาก ตัดและหยอดยาง โดยสามารถนำข้อมูลที่ได้มาสร้างเป็นแผนภูมิพาเรโต เพื่อวิเคราะห์ขั้นตอนที่ต้องการแก้ไขได้ดัง ภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนภูมิพาเรโต

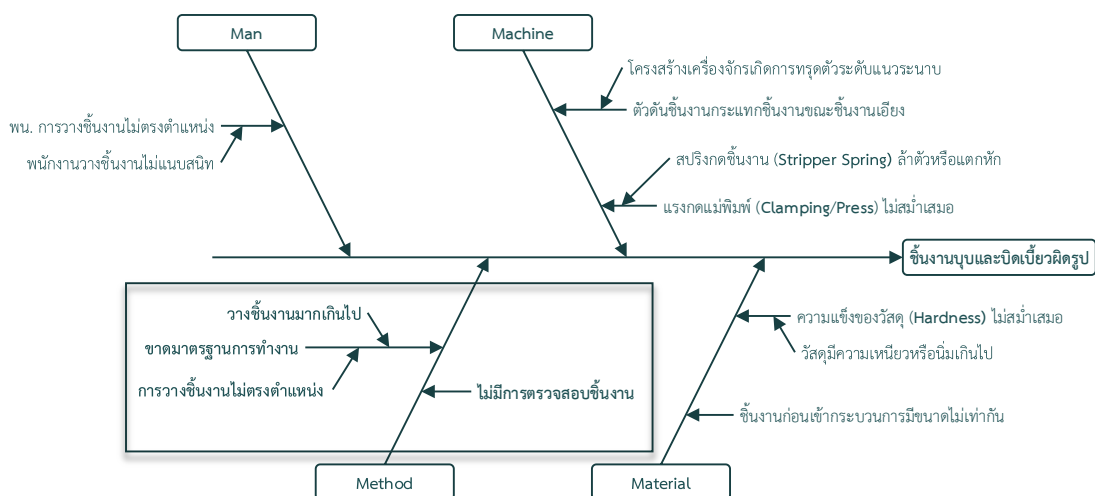
จากแผนภูมิพาเรโต พบว่า ของเสียในขั้นตอนการตัดขอบและขั้นตอนการเจาะ คิดเป็น 88.47% ของปัญหาทั้งหมด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกที่จะนำปัญหาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการตัดขอบ และขั้นตอนการเจาะ มาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุและวิธีแก้ไข จากการรวบรวมข้อมูลของเสียที่เกิดขึ้น ในขั้นตอนการตัดขอบ และขั้นตอนการเจาะ พบว่าลักษณะของเสียเกิดขึ้น 3 รูปแบบ คือ ชิ้นงานบุบ การปัมชิ้นงานซ้อน และการปัมชิ้นงานแหง



ภาพที่ 2 ลักษณะของเสียในขั้นตอนการตัดขอบและขั้นตอนการเจาะ

3.3 วิเคราะห์สาเหตุของการเกิดของเสียของโรงงานกรณีศึกษา

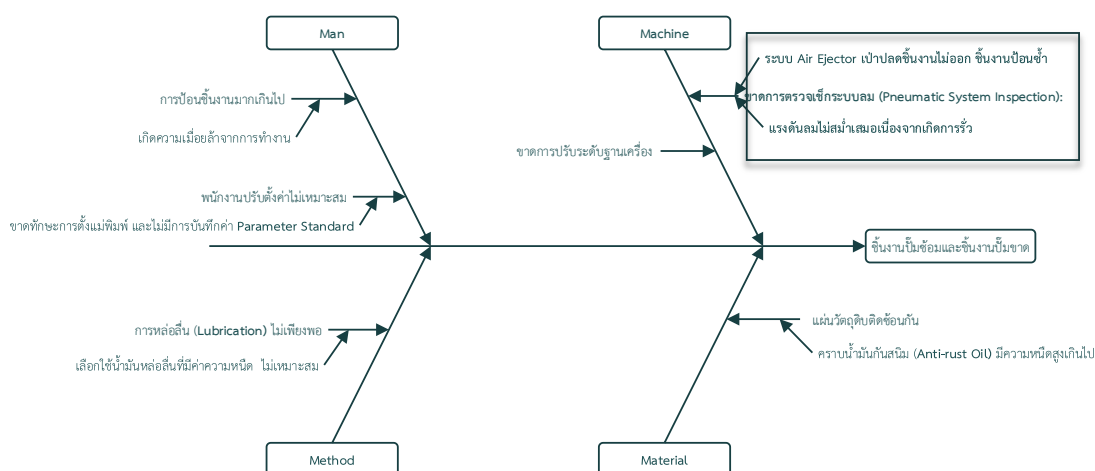
จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยแผนผังก้างปลา(Fishbone diagram) โดยใช้เทคนิคการระดมสมอง (Brainstorming) จากผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง พบว่า สาเหตุของเสียที่เป็นสาเหตุของปัญหาในกระบวนการทำงาน โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 3 และภาพที่ 4



ภาพที่ 3 แผนผังก้างปลาสาเหตุของปัญหาขึ้นงานบวบและบิดเบี้ยวผิดรูป

จากภาพที่ 3 สาเหตุของปัญหาขึ้นงานบวบและบิดเบี้ยวผิดรูปของกระบวนการตัดขอบและกระบวนการเจาะ มีสาเหตุของปัญหาเหมือนกันเนื่องจากกระบวนการผลิตของทั้งสองกระบวนการเริ่มต้นด้วยพนักงานนำชิ้นงานเรียงใส่อุปกรณ์จับยึด (Fixture) ชิ้นงาน แล้วเหยียบสวิตช์ค้างไว้ ที่เครื่องจักรจะมีตัวแยกชิ้นงาน ทำให้ชิ้นตกครั้งละ 1 ชิ้น แล้วตัวดันชิ้นงาน จะดันชิ้นงานไปยังรางเลื่อน และชิ้นงานจะถูกส่งไปยังแท่นปั๊มเพื่อตัดขอบ และเจาะโดยเครื่องจักรจะทำงานเป็นระบบ อัตโนมัติ

ทั้งสองกระบวนการ ดังนั้นจากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาพบว่าสาเหตุหลักของทั้งสองกระบวนการมาจากวิธีการในการทำงานของพนักงานที่ไม่มีตามมาตรฐาน คือมีการนำชิ้นงานเรียงใส่อุปกรณ์จับยึด (Fixture) มากเกินไป และไม่ตรงตำแหน่งส่งผลให้ชิ้นงานตกลงสู่รางเลื่อนไม่ตรงตำแหน่ง



ภาพที่ 4 แผนผังก้างปลาสาเหตุของปัญหาชิ้นงานป้อนไม่ตรงตำแหน่งและชิ้นงานป้อนขาด

จากภาพที่ 4 สาเหตุของปัญหาชิ้นงานป้อนไม่ตรงตำแหน่งและชิ้นงานขาดในกระบวนการตัดขอบและกระบวนการเจาะ สามารถสรุปสาเหตุหลักของปัญหาเกิดจากขาดการเช็คระบบลมที่ทำงานไม่สม่ำเสมอ จนทำให้เสื่อมสภาพจากระยะเวลาการใช้งาน จึงทำให้ไม่สามารถควบคุมการปล่อยลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.4 เสนอแนวทางแก้ไข

จากที่ผู้วิจัยได้ศึกษาและวิเคราะห์ พบว่าปัญหาชิ้นงานบุบเกิดจากการเรียงชิ้นงานที่มากเกินไป ทั้งในกระบวนการตัดขอบ กระบวนการเจาะ สาเหตุของปัญหาชิ้นงานป้อนไม่ตรงตำแหน่ง และชิ้นงานขาด เกิดจากระยะเวลาในการเปลี่ยนวาล์วลม ผู้วิจัยจึงนำปัญหานี้มาทั้ง 2 กระบวนการ และปัญหาชิ้นงานป้อนไม่ตรงตำแหน่ง ชิ้นงานขาด ทั้ง 2 กระบวนการมารวมกัน โดยแบ่งเป็นขั้นตอนจะนำมาปรับปรุงแก้ไขดังนี้

3.4.1 ปัญหาชิ้นงานบุบ ปรับปรุงวิธีการเรียงชิ้นงานน้อยลง จากการเก็บข้อมูลพบว่าแบบเดิมพนักงานทำการเรียงชิ้นงานเต็มเสาบรรจุชิ้นงาน โดยในเสาบรรจุชิ้นงานมีชิ้นงานจำนวน 80 ชิ้น มีน้ำหนัก 724.8 กรัม ทำให้ชิ้นงานที่อยู่ด้านล่างไม่สามารถพยุงได้เนื่องจากน้ำหนักที่กดลงมา ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการหาปริมาณชิ้นงานที่เหมาะสม พบว่าปริมาณชิ้นงานที่เหมาะสม กำหนดให้เรียง

ชิ้นงานไม่เกิน 32 ชิ้น มีน้ำหนัก 289.92 กรัม ให้พนักงานลดจำนวนชิ้นงานลงมาให้ ชิ้นงานด้านล่างสามารถยับได้ ดังภาพที่ 5



การเรียงชิ้นงานแบบก่อนปรับปรุง



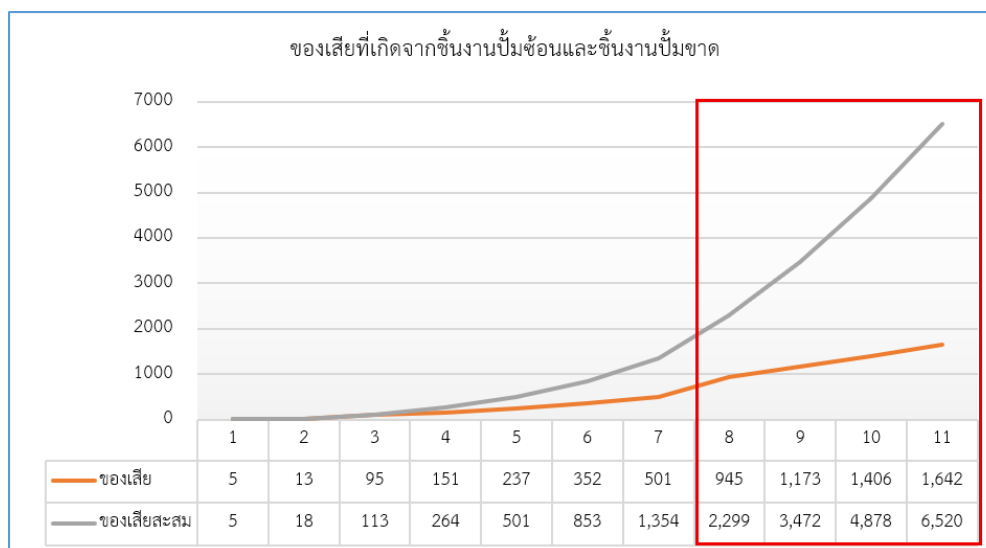
การเรียงชิ้นงานแบบหลังปรับปรุง

ภาพที่ 5 การเรียงชิ้นงานในกระบวนการ ก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

3.4.2 ปัญหาชิ้นงานปัมซ้อนและชิ้นงานปัมขาด ผู้วิจัยใช้ใบตรวจสอบ (Check Sheet) ติดตามอายุการใช้งานวาล์วลม ดังภาพที่ 6 ในช่วงวันที่ 1-5 อัตราการเพิ่มของเสียอยู่ในระดับต่ำและคงที่ (เพิ่มเฉลี่ยวันละ 10 - 80 ชิ้น) แสดงว่าวาล์วลมยังทำงานได้ดี ในช่วงวันที่ 6-7 จำนวนของเสียเริ่มไต่ระดับสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยวันที่ 6 เพิ่มขึ้น +115 ชิ้น และวันที่ 7 เพิ่มขึ้นถึง +149 ชิ้น หรือเมื่อผ่านการผลิตไปแล้ว 175,000 ชิ้น ตัวเลขที่ไต่ระดับนี้เป็นสัญญาณเตือนทางเทคนิคว่า วาล์วลมเริ่มเกิดอาการล้า ตอบสนองช้าหรือแรงดันลมเริ่มไม่เสถียร ส่งผลให้กลไกการปัมชิ้นงานเริ่มผิดพลาดจนเกิดของเสียสะสม หากไม่มีการเปลี่ยนวาล์วลมในวันที่ 7 เมื่อเข้าสู่วันที่ 8 จำนวนของเสียจะพุ่งสูงแบบก้าวกระโดดทันทีเป็น 945 ชิ้น (คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นสูงถึง +444 ชิ้น ภายในวันเดียว) ดังนั้นจึงได้กำหนดมาตรฐานรอบการบำรุงรักษาเชิงป้องกันให้โรงงานกรณีศึกษาทำการเปลี่ยนวาล์วลมใหม่ทุก ๆ 7 วัน หรือทุกระยะการผลิต 160,000 ชิ้น โดยความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ต้นทุนการเปลี่ยนวาล์วลม คือราคาของวาล์วและการหยุดกระบวนการชั่วคราวเพื่อเปลี่ยนอะไหล่มีมูลค่าต่ำกว่าต้นทุนค่าของเสียสะสมในวันที่ 8 ที่พุ่งจาก 1,354 ชิ้น เป็น 2,299 ชิ้น

4. ผลการวิจัย

ผลการดำเนินการลดของเสียในขั้นตอนการผลิตผาคอบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์ด้วยผลการเปรียบเทียบของเสียที่เกิดขึ้น ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง โดยการประเมินผลของวิธีการลดของเสีย มีรายละเอียดดังนี้

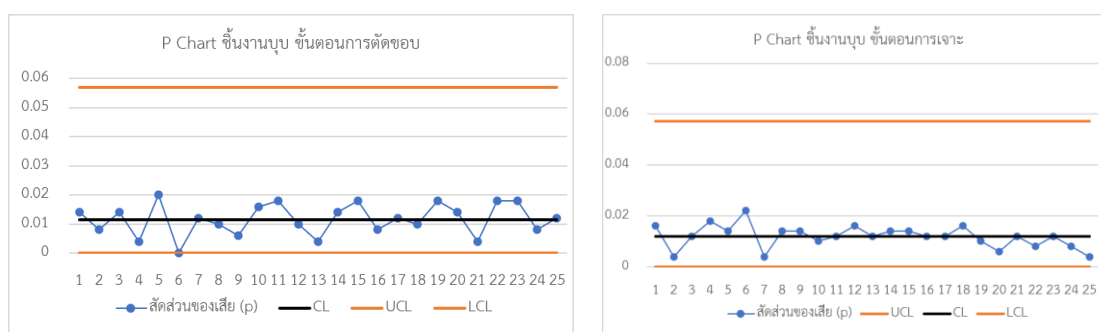


ภาพที่ 6 จำนวนของเสียชิ้นงานปั๊มซ้อนและชิ้นงานปั๊มขาด

4.1 ปัญหาชิ้นงานบุบของทั้งกระบวนการตัดขอบและกระบวนการเจาะ

ปรับปรุงวิธีการเรียงชิ้นงานน้อยลง โดยกำหนดให้เรียงชิ้นงานไม่เกินเส้นที่กำหนด หรือ ไม่เกิน 32 ชิ้น ทั้งขั้นตอนการตัดขอบ และขั้นตอนการเจาะ เพื่อให้ชิ้นงานด้านล่างสามารถยับได้เมื่อ ชิ้นงานวางไม่ตรงตำแหน่ง

หลังจากการปรับปรุงมาตรการแก้ไข ผู้วิจัยได้ทำการสุ่มเก็บข้อมูลกลุ่มตัวอย่าง (25 กลุ่มย่อย กลุ่มละ 50 ชิ้น) เพื่อสร้างแผนภูมิควบคุมสัดส่วนผลิตภัณฑ์เสีย (P-Chart) ผลปรากฏดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แผนภูมิ P Chart ของกระบวนการตัดขอบและกระบวนการเจาะ

ผลการสัดส่วนผลิตภัณฑ์เสีย (P-Chart) เส้นพิสัยควบคุมขีดจำกัดบน (UCL) และ ขีดจำกัดล่าง (LCL) ของทุกกระบวนการหลังปรับปรุงมีค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์เสียอยู่ภายใต้ข้อกำหนด และจุดพล็อตค่า P ของทั้งขั้นตอนตัดขอบและขั้นตอนเจาะ ไม่มีจุดใดตกอยู่นอกขีดจำกัดควบคุม (Out of

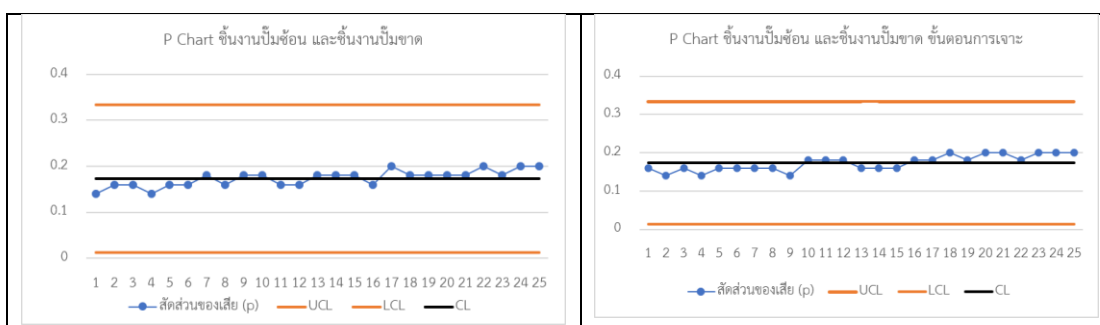
Control) แสดงให้เห็นว่ากระบวนการผลิตกลับมามีความเสถียรภาพและอยู่ภายใต้การควบคุมทางสถิติ จากการเก็บข้อมูลหลังจากการปรับปรุงกระบวนการทั้งหมดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปปัญหาชิ้นงานบุบ

ปัญหาชิ้นงานบุบขั้นตอนตัดขอบ ก่อนปรับปรุง เดือน มิถุนายน						
และหลังปรับปรุง เดือน กันยายน พ.ศ. 2568						
ขั้นตอน	ก่อนการปรับปรุง			หลังการปรับปรุง		
	ชิ้นงาน (ชิ้น)	ของเสีย (ชิ้น)	สัดส่วน ของเสีย	ชิ้นงาน (ชิ้น)	ของเสีย (ชิ้น)	สัดส่วน ของเสีย
ตัดขอบ	553,145	5,899	1.07%	621,540	1,215	0.20%
เจาะ	537,409	5,569	1.04%	606,936	1,186	0.20%

4.2 ปัญหาชิ้นงานปมซ้อนและ ชิ้นงานปมขาด

กำหนดระยะเวลาการเปลี่ยนวาล์วลม จากการเก็บข้อมูลด้วยใบตรวจสอบ ได้นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ พบว่าเมื่อใช้วาล์วลมไปได้ 7 วัน หรือใช้งานไปแล้ว 160,000 ชิ้น จะมีปริมาณของเสียที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก ผู้วิจัยจึงเห็นว่า ทางโรงงานควรจะเปลี่ยนวาล์วลมทุกๆ 7 วัน หรือใช้งานไปแล้ว 160,000 ชิ้น หลังจากผู้วิจัยได้กำหนดวันเปลี่ยนวาล์วให้กับทางโรงงานกรณีศึกษา ได้ทำการสุ่มเก็บข้อมูล ตั้งแต่วันแรกที่ทำกรเปลี่ยนวาล์วลมจนถึงวันที่ 7 หรือใช้งานวาล์วลมไปแล้ว 160,000 ชิ้น เพื่อนำมาสร้างแผนภูมิควบคุมสัดส่วนผลิตภัณฑ์เสีย P Chart เพื่อหาว่าหลังจากการแก้ไข มีความผันแปรเกิดขึ้นมากจนอยู่นอกการควบคุม (Out of Control) หรือไม่ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แผนภูมิ P Chart ของกระบวนการตัดขอบและกระบวนการเจาะ

จากการสร้างแผนภูมิ P Chart เมื่อพิจารณาจากแผนภูมิ P พบว่าจุดของค่า P ไม่มีจุดใดตกอยู่นอกการควบคุม (Out of Control) ดังนั้นแสดงว่ากระบวนการผลิตอยู่ภายใต้การควบคุม และส่งผลให้กระบวนการดังกล่าวมีของเสียลดลงจากเดิมถึง 50 %

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การสรุปผลการวิจัยการลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตฝาคอบรรจุภัณฑ์ทินเนอร์ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนของโรงงานการศึกษา โดยทางผู้วิจัยเลือกที่จะแก้ไขปัญหาในขั้นตอนการตัดขอบ และขั้นตอนการเจาะ จากการใช้แผนภูมิก้างปลา (Fish-Bone Diagram) หาสาเหตุของปัญหา พบว่าลักษณะของเสียในขั้นตอนการตัดขอบ และขั้นตอนการเจาะมีสาเหตุที่คล้าย เนื่องจากลักษณะเครื่องจักรของทั้ง 2 กระบวนการคล้ายกับ ต่างกันตรงแม่พิมพ์ของเครื่องจักรนั้นๆ ผู้วิจัยจึงรวมปัญหาของ 2 กระบวนการด้วยกัน โดยผู้วิจัยได้แก้ไขปัญหาขึ้นงานบุบ ด้วยการกำหนดการเรียงชิ้นงานให้น้อยลง ส่วนปัญหาขึ้นงานบีมซ้นและปัญหาขึ้นงานบีมขาด ผู้วิจัยได้กำหนดระยะเวลาการเปลี่ยนวาล์วลมให้กับทางโรงงานการศึกษาและนำการประยุกต์ใช้เครื่องมือ 7 QC Tools ร่วมกับการปรับปรุงวิธีการทำงานและการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน สามารถแก้ไขปัญหาของเสียในโรงงานการศึกษาได้อย่างเป็นรูปธรรม มาตรการลดจำนวนการจัดเรียงชิ้นงานเหลือ 32 ชิ้น และการกำหนดเปลี่ยนวาล์วลมตามรอบการผลิตทุก 160,000 ชิ้น ช่วยลดปริมาณของเสียโดยรวมลงได้มากกว่าร้อยละ 70-80 ส่งผลให้ลดต้นทุนความสูญเสียจากวัตถุดิบเสียหายได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทำให้กระบวนการผลิตมีความเสถียรภาพอย่างยั่งยืน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

7. เอกสารอ้างอิง

- ชัชฎาภา ดีวุ่น, และเปรมพร เขมาวุฒม์. (2560). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม, 18(1), 19–30.
- ฐานันตร์ เขียวสังข์. (2554). การลดของเสียในกระบวนการผลิตการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติก. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์, กรุงเทพฯ.

- ณฐาพัชร วรพงศ์พัชร, และไตรทิพย์ สีจัน. (2566). การลดของเสียในกระบวนการผลิต: กรณีศึกษาสายการผลิตโครงสร้างของรถแทรกเตอร์ บริษัท CCC จำกัด. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช**, 3(2), 1-11.
- ธนภุช ชุ่นเซ่ง. (2557). การลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติก: กรณีศึกษาของเสียประเภทจุดดำ. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, กรุงเทพฯ.
- ธิดาเดียว มยุรีสุวรรณ. (2553). **การควบคุมคุณภาพในอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ: ศูนย์ผลิตตำราเรียนสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- นายาทานิ โยชิโนบุ, โอเกะ โทรุ, ฟุตามิ เรียวจิ, และมียากาวะ ฮิโรยูกิ. (2546). **7 New QC Tools: เครื่องมือสู่คุณภาพยุคใหม่**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- รัชต์วรรณ กาญจนปัญญาคม. (2562). **การศึกษางานอุตสาหกรรม (Industrial work study)**. กรุงเทพฯ: ท้อป.
- วิวัฒน์ วงศ์วิวัฒน์. (2550). **การศึกษาแนวทางในการลดของเสียในกระบวนการป้อนขึ้นรูป: กรณีศึกษา บริษัท ไทยสแตนเลสสตีล จำกัด**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.
- อินทิพร กิติโสภาคกุล. (2546). **การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนภูมิพี (P-chart) แผนภูมิคิว (Q-chart) และแผนภูมิจีออเมตริก (G-chart) ในการตรวจจับความเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนของเสีย**. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.
- Sonkiya, S. (2014, April 16). **Pareto chart—An effective graphical tool to resolve problems**. Retrieved from <https://www.izenbridge.com/blog/pareto-analysis-as-a-component-of-seven-basic-quality-tool/>