



JOURNAL OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND

ENGINEERING

PIBULSONGKRAM RAJABHAT UNIVERSITY



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



วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

ปีที่ 6 ฉบับที่ 3

กันยายน - ธันวาคม ปี2567





ข้อกำหนดมาตรฐาน วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

เพื่อให้วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เป็นวารสารที่มีคุณภาพได้มาตรฐานทางกองบรรณาธิการจึงมีข้อกำหนดของวารสารดังต่อไปนี้

1. วัตถุประสงค์

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

2. ครอบคลุมสาขาที่เกี่ยวข้อง

2.1 สาขาวิชาเทคโนโลยี เน้น เทคโนโลยีอุตสาหกรรมและนวัตกรรม ได้แก่ เทคโนโลยีไฟฟ้า เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ เทคโนโลยีพลังงาน / พลังงานทดแทน เทคโนโลยีก่อสร้าง / โยธา เทคโนโลยีการผลิต มาตรฐานวิทยา 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 ต่อบทความในรูปแบบพิชยพิจารณา (Peer-Reviewed) ก่อนลงตีพิมพ์ และเป็นการประเมินแบบการปกปิดสองทาง (Double blinded)



ขั้นตอนการประเมินบทความมีกระบวนการดังต่อไปนี้

1. ผู้เขียนส่งไฟล์บทความไปยังระบบวารสารอิเล็กทรอนิกส์ของวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
2. กองบรรณาธิการดำเนินการแจ้งให้ผู้เขียนทราบ เมื่อกองบรรณาธิการได้รับไฟล์บทความเรียบร้อยแล้ว
3. กองบรรณาธิการดำเนินการตรวจสอบหัวข้อ บทคัดย่อ และเนื้อหาของบทความ รูปแบบการจัดพิมพ์บทความ ประเด็นทางจริยธรรม ตรวจสอบการคัดลอกบทความ (Plagiarism Checker) และความเหมาะสมและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของวารสาร รวมถึงประโยชน์ในเชิงทฤษฎี และเชิงปฏิบัติ 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) ก็จะทำเนินการส่งกลับไปยังผู้เขียนให้แก้ไข และตรวจสอบผลการแก้ไข จนกว่าจะมีเนื้อหาบทความสมบูรณ์

- กรณีมีความเห็นให้ ปฏิเสธการรับตีพิมพ์ (Decline Submission) กองบรรณาธิการ จะส่งจดหมายแจ้งผลดังกล่าวให้ผู้เขียนรับทราบ พร้อมทั้งเหตุผลของการปฏิเสธการรับ

- กรณีมีความเห็นให้ ตอรับการตีพิมพ์ (Accept Submission) กองบรรณาธิการ จะแจ้งผู้เขียนให้ทราบ และดำเนินการส่งไฟล์บทความเข้าสู่ขั้นตอนการปรับแก้ต้นฉบับ 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 อุตสาหกรรม การผลิต การจัดการและโลจิสติกส์ เป็นต้น วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นวัตกรรมเซรามิกส์ 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 และติดต่อผู้นิพนธ์หลักทันทีเพื่อขอคำชี้แจง เพื่อประกอบการ ตอบรับ หรือ ปฏิเสธ การตีพิมพ์บทความนั้น ๆ
13. บรรณาธิการวารสารต้องไม่ตีพิมพ์บทความที่เคยตีพิมพ์ที่อื่นมาแล้ว
14. บรรณาธิการวารสารต้องมีระบบในการจัดการที่ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้นิพนธ์และผู้ประเมินบทความรวมทั้งกองบรรณาธิการ
15. บรรณาธิการวารสารต้องสนับสนุนเสรีภาพในการแสดงความคิดเห็น และคงไว้ซึ่งความถูกต้องของผลงานทางวิชาการ อีกทั้งปกป้องมาตรฐานของทรัพย์สินทางปัญญา

9. บทบาทและหน้าที่ของผู้ประเมินบทความ (Duties of Reviewers)

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



6. ผู้ประเมินบทความ ควรประเมินบทความในสาขาวิชาที่ตนมีความเชี่ยวชาญ โดยพิจารณาความสำคัญของเนื้อหาในบทความที่จะมีต่อสาขาวิชานั้น ๆ คุณภาพของการวิเคราะห์ และความเข้มแข็งของผลงาน
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 ต้องได้รับอนุญาตจากกองบรรณาธิการวารสารอย่างเป็นทางการเป็นลายลักษณ์อักษร

- 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

บทความจากงานวิจัยที่ส่งเข้ามารับการตีพิมพ์และเกี่ยวข้องกับการทำวิจัยในมนุษย์ 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 อย่างเป็นทางการ ลายลักษณ์อักษร 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 : 3057-0093, E-ISSN : 3057-0107 ฉบับนี้เป็นปีที่ 6 ฉบับที่ 3 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

รองศาสตราจารย์ ดร.สนธิ ปิ่นสกุล
บรรณาธิการ



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อน พรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชรเอกสิทธิ์ เทียนนาศ, มาณพ ต้นเคน, พัชรรัตน์ หารไชย, ศิริวัฒน์ แสนธรรมา, ประภัสสรฯ ห่อทอง	288-301
การศึกษากำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ใ้ก้านเตาทดแทนมวลรวมละเอียด กรณีศึกษา ส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่และค่าการยุบตัวคงที่จิรา ธรรมนิยม, สุรเชษฐ์ วรรณฯ	302-316
ผลของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ต่อการปรากฏ สีของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียสจุมพฏ พงศ์ศักดิ์ศรี	317-334
การประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการบำรุงรักษา เครื่องจักรเพื่อการผลิตหินเจียร ฤดี นิยมรัตน์, เบญจลักษณ์ เมืองมีศรี, ไสว ศิริทองถาวร, สมเกียรติ กอบัวแก้ว, พงศระพี แก้วไทรฮะ, ภูภัส ภาณณภานุมิษ	335-353
การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุรองพื้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าเป็นส่วนผสมขวัญชัย เทศฉาย, บำรุง บัวชื่น	354-364
การเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอไนต์ เฟอร์ริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิกเกิลออกไซด์ต่อลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศา เซลเซียสจุมพฏ พงศ์ศักดิ์ศรี, ปิยธิดา บุญเพชร, ศุภวิษญ บัวทอง, อุษา อินทร์ประสิทธิ์	365-381
DEVELOPING A DATA VISUALIZATION DASHBOARD FOR DECISION SUPPORT IN MULTI-BRANCH SHOP ORDERING: A CASE STUDY OF A DRUGSTORE IN PHITSANULOK, THAILAND Woramol C. Watanabe, Chiraphat Khamhinlat, Natnicha Kornsootwong, Suchanya chanraksa, Thanyada Wongthanyakorn, Titaya Luechakam, Sunun Tati	382-394



การจัดเส้นทางและตารางเวลาเดินรถสำหรับการจัดส่งไข่ไก่ศักดิ์ดีดา คำจันทร์, หทัยชนก ศรีบุญเรือง, วิเรชา คำจันทร์	395-408
การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าและความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์สรวิศ สอนสารี, สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์	409-424
การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคำสั่งซื้อในธุรกิจค้าส่ง อาหารสดวัชระ กลางกระโทก, ชิตณรงค์ เฟื่องแดง, พันธุ์ธิดา ลิ้มศรีประพันธ์, วชิระ ลิ้มศรีประพันธ์	425-434



กระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อน พรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชร
ARTIFICIAL SANDSTONE TILES FROM MARBLE POWDER PHRAN
KRATAI KAMPHAENG PHET PROVINCE

เอกสิทธิ์ เทียนมาศ^{1*}, มาณพ ต้นเคน¹, พัชรรัตน์ ทารไชย¹,
ศิริวัฒน์ แสนธรรมมา¹, ประภัสสร ห่อทอง²

Aekasit Thianmas^{1*}, Manop Tonken¹, Patchareerat HaraChai¹,
Siriwat Saenthamma¹, Prapatsara Hothong²

¹ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร อ.เมือง จ.กำแพงเพชร ประเทศไทย 62000

² คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร อ.เมือง จ.กำแพงเพชร ประเทศไทย 62000

¹ Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University, Muang, Kamphaeng Phet, Thailand, 62000

² Faculty of Humanities and Social Sciences, Kamphaeng Phet Rajabhat University,

Muang, Kamphaeng Phet, Thailand, 62000

*Corresponding author e-mail: muznui33@gmail.com

วันที่เข้ารับ 24 พฤศจิกายน 2566

วันที่แก้ไขบทความ 14 พฤษภาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 22 พฤษภาคม 2567

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อ 1) เพื่อหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมของกระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อน และ 2) เพื่อตรวจสอบกระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อนตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน โดยผงหินอ่อนที่ใช้เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมหินอ่อน อำเภอพรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชร มีลักษณะเป็นสีขาว มีค่าความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 2.92 และมีองค์ประกอบของธาตุแคลไซต์เป็นหลัก (CaCO_3) ผู้วิจัยได้นำผงหินอ่อนมาอบให้แห้ง และนำมาบด จากนั้นนำมาขึ้นรูปร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว และทรายละเอียด เพื่อทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล ได้แก่ ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ กำลังแรงอัด และกำลังแรงดัด จากนั้นทำขึ้นรูปจริงเป็นกระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อนเพื่อนำไปตรวจสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 194/2546 ผลิตภัณฑ์หินทราย ผลการทดสอบ พบว่า สูตร M - 4 ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว : ผงหินอ่อน : ทรายละเอียด : น้ำ เท่ากับ 1 : 1.5 : 1.5 : 1 ส่วน ตามลำดับ มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 179.25 และ 71.97 กก/ตร.ซม. ตามลำดับ และค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ เท่ากับ 2.63 เมื่อนำไปตรวจสอบจากผู้เชี่ยวชาญตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน พบว่า ได้คะแนนเท่ากับ 3.08 จาก 4 คะแนน โดยกระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อนที่ได้ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง รวมทั้งมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าท้องตลาด ถึงร้อยละ 50 อีกทั้งยังเป็นการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากท้องถิ่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

คำสำคัญ: ผงหินอ่อน, กระเบื้องหินทราย, ผลิตภัณฑ์ชุมชน

Abstract

The purpose of this research is to 1) determine the appropriate mixing proportion of artificial sandstone tiles from marble powder and 2) inspect the produced artificial sandstone tiles against community product standards. The marble powder used is a byproduct from the marble industry in Phran Kratai district, Kamphaeng Phet province, characterized by its white color with a specific gravity of 2.92, primarily composed of calcium carbonate (CaCO_3). The researchers dried and ground the marble powder, then combined it with white Portland cement and fine sand to test its physical and mechanical properties, including density, water absorption, compressive strength, and flexural strength." Subsequently, the researchers actually fabricated the tiles from the marble powder mixture for evaluation based on community product standards (M.Po.Ch. 194/2546). The tests showed that the M-4 formula, which is made up of white Portland cement, marble powder, and fine sand in a ratio of 1:1.5:1.5, had the best properties, with maximum compressive strengths of 179.25 kg/cm² and flexural strengths of 71.97 kg/cm². The water absorption rate found was 2.63%. Expert assessments based on community product standards yielded a score of 3.08 out of 4. The resulting artificial sandstone tiles showed a lightweight design and high strength, with their production costs being fifty percent lower than those found in the market. Furthermore, this also represents the sustainable use of local waste materials for future benefits.

Keywords: Marble powder, Artificial sandstone tiles, Community products

1. บทนำ

หินทรายเป็นวัสดุธรรมชาติได้มาจากการรวมตัวของหินที่อัดแน่นจากเม็ดทรายทับถมกันเป็นเวลานานหลายร้อยล้านปี และเมื่อมีวัสดุสมาน อันเกิดจากธรรมชาติทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนหิน จึงเรียกว่า “หินทราย” สีของหินทรายแตกต่างกันตามแร่ธาตุอื่น ๆ ที่พบในเนื้อทราย เช่น แคลไซต์ ที่ทำให้ออกสีเหลือง หรือเหล็กทำให้หินออกสีแดง เป็นต้น

กระเบื้องหินทราย เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการนำหินทรายมาทำการตัด หรือตกแต่งเพื่อให้ดูมีคุณค่าและสวยงามยิ่งขึ้น มักถูกนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับตกแต่งผนังหรือพื้น เนื่องจากมีผิวสัมผัสที่เป็นเอกลักษณ์ และมีความสวยงามอยู่ในตัว อย่างไรก็ตามกระเบื้องหินทรายจัดเป็นวัสดุธรรมชาติ มีอัตรา

การดูดซึมน้ำสูงถึงร้อยละ 6 ซึ่งทำให้เสี่ยงต่อความเสียหายจากคราบของเหลว เชื้อรา ไมโครแบคทีเรีย และแม้กระทั่งการบิดเบี้ยวในกรณีที่รุนแรง



ภาพที่ 1 กระเบื้องหินทรายตกแต่งเสาที่เกิดความเสียหายจากคราบต่าง ๆ

อำเภอพรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชรเป็นหนึ่งในจังหวัดที่มีหินอ่อนเกิดขึ้นตามธรรมชาติ การนำหินอ่อนมาใช้นั้นเป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากนัก สำหรับเศษหินอ่อนจากการแปรรูป จะทำให้เกิดเศษหินอ่อนขึ้นเป็นจำนวนมากมีทั้งเศษขนาดใหญ่และที่เป็นฝุ่นผงซึ่งเศษหินอ่อนส่วนใหญ่จะนำไปทิ้งไม่ได้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์



ภาพที่ 2 เศษผงหินอ่อนที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมหินอ่อน

อำเภอพรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชร

แนวคิด“เปลี่ยนขยะให้เหลือศูนย์” (Zero waste) กำลังได้รับความสนใจเป็นจำนวนมากและแพร่หลายทั่วโลกเป็นแนวทางในการลดการเกิดขยะตั้งแต่ต้นทาง ทำให้ปริมาณขยะที่ต้องนำไปกำจัดให้ลดเหลือน้อยที่สุดจนเป็นศูนย์ ซึ่งหัวใจสำคัญของแนวคิดขยะเหลือศูนย์ คือ การจัดการขยะที่ต้นทาง เน้นการลดขยะ การใช้ซ้ำ และการตัดแยกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ก่อนนำไปกำจัด ซึ่งแตกต่างจากการจัดการขยะในปัจจุบันที่เน้นการกำจัด หรือจัดการขยะที่ปลายทางมากกว่าการแก้ไขที่ต้นทาง (เนติยา กรีธาชาติ, 2564)



ภาพที่ 3 แนวคิดการจัดการขยะในรูปแบบ 1A3R (ที่มา: Summerteas, 2564)

จากที่กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำแนวคิดการเปลี่ยนขยะให้เหลือศูนย์ โดยนำเศษผงอ่อนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมหินอ่อน อำเภอพรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชร มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยนำมาเป็นวัสดุตั้งต้นร่วมกับปูนซีเมนต์ ทำการขึ้นรูปเป็นกระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของเศษผงหินอ่อนและเป็นการยกระดับอุตสาหกรรมการก่อสร้างต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมของกระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อน
- 2.2 เพื่อตรวจสอบกระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อนตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

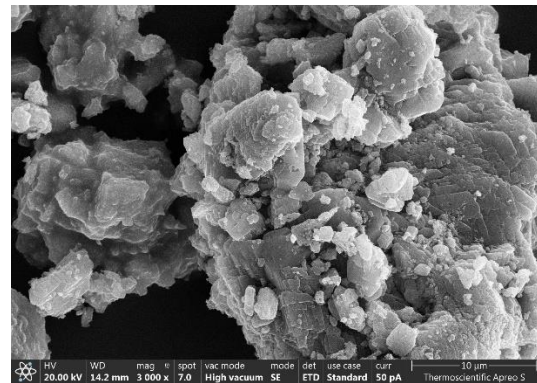
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว ผงหินอ่อน ทรายละเอียด และน้ำสะอาด ดังภาพที่ 4 โดยผงหินอ่อนที่ใช้เป็นวัสดุเหลือทิ้งอุตสาหกรรมหินอ่อน อำเภอพรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชร โดยนำมาอบให้แห้ง จากนั้นนำมาบดให้ละเอียด แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ได้ผงหินอ่อนที่มีลักษณะเป็นสีขาว มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.92 และมีองค์ประกอบของธาตุแคลไซต์เป็นหลัก (CaCO_3) ดังภาพที่ 5 และ 6



ภาพที่ 4 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย



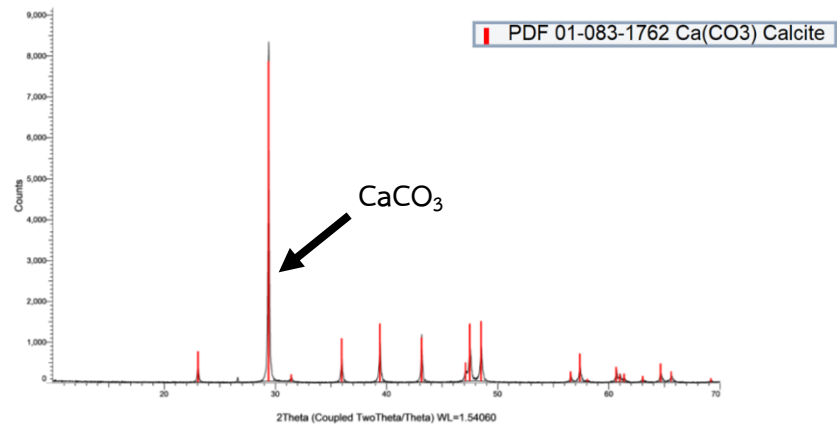
(ก)



(ข)

ภาพที่ 5 ลักษณะของผงหินอ่อนที่ใช้ในงานวิจัย

(ก) ลักษณะทั่วไป (ข) โครงสร้างจุลภาค ด้วยเทคนิค SEM



ภาพที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของผงหินอ่อนด้วยเครื่อง XRD

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

กำหนดสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายละเอียด เท่ากับ 1 ต่อ 3 ส่วน ใช้ผงหินอ่อนแทนที่ทรายละเอียดในสัดส่วนต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 จากนั้นทำการขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบขนาด 5x5x5 ซม. ขนาด 4x4x16 ซม. และขนาดจริง 5x20 ซม. หนาประมาณ 1 – 1.5 ซม. เพื่อรอการทดสอบต่อไป

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบ (ต่อ 4 ส่วน)

ตัวอย่างทดสอบ	ปูนซีเมนต์	ทรายละเอียด	ผงหินอ่อน	น้ำ
M - 1	1.0	3.0	-	1.0
M - 2	1.0	2.5	0.5	1.0
M - 3	1.0	2.0	1.0	1.0
M - 4	1.0	1.5	1.5	1.0
M - 5	1.0	1.0	2.0	1.0
M - 6	1.0	0.5	2.5	1.0



ภาพที่ 7 กระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อนที่ขึ้นรูปจริง



3.3 การทดสอบ

3.3.1 ความหนาแน่น (Density) สามารถหาได้จากการนำตัวอย่างทดสอบมาทำการวัดขนาด ชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาค่าความหนาแน่น ดังสมการที่ (1)

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของตัวอย่างทดสอบ, ก./ลบ.ซม.
 m คือ มวลของตัวอย่างทดสอบ, ก.
 v คือ ปริมาตรที่ได้จากการวัดตัวอย่างทดสอบ, ลบ.ซม.

3.3.2 การดูดซึมน้ำ (Absorption) สามารถบอกถึงความคงทนของตัวอย่างทดสอบ นำตัวอย่างทดสอบที่ได้มาแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเปียก แล้วนำไปอบแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักหลังอบแห้ง ทำการคำนวณหาร้อยละการดูดซึมน้ำ อ้างอิงตามมาตรฐาน มอก.109-2517 และ ASTM C 140-70 ดังสมการที่ (2)

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = \frac{W_w - W_s}{W_s} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_w คือ น้ำหนักหลังแช่น้ำ, กก.
 W_s คือ น้ำหนักที่อบแห้ง, กก.

3.3.3 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างแรงอัดต่อพื้นที่รับแรง มีหน่วยเป็น กก./ตร.ซม. ดังสมการที่ (3)

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3)$$

เมื่อ σ คือ กำลังรับแรงอัด, กก./ตร.ซม.
 P คือ แรงอัดสูงสุด, กก.
 A คือ พื้นที่รับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบ, ตร.ซม.

3.3.4 กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) หมายถึง ความต้านทานการโก่งเมื่อมีแรงกระทำเป็นจุด การทดสอบกำลังรับแรงดัดเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสของการแตกร้า (modulus of rupture) ของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง สามารถคำนวณดังสมการที่ (4)

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (4)$$

เมื่อ	R	คือ กำลังรับแรงดัด, กก./ตร.ซม
	P	คือ แรงกดสูงสุด, กก.
	L	คือ ความยาวของตัวอย่างทดสอบ, ซม.
	b	คือ ความกว้างของตัวอย่างทดสอบ, ซม.
	d	คือ ความหนาของตัวอย่างทดสอบ, ซม.



(ก)



(ข)

ภาพที่ 8 การทดสอบสมบัติทางกล

(ก) การทดสอบกำลังรับแรงอัด (ข) การทดสอบกำลังรับแรงดัด

3.4 การตรวจสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ผลิตภัณฑ์หินทราย

การตรวจสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 194/2546 ครอบคลุมเฉพาะผลิตภัณฑ์หินทรายที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้หินทรายธรรมชาติ และหินทรายเทียมเป็นวัสดุหลัก กำหนดให้ มีการแต่งตั้งคณะผู้ตรวจสอบประกอบด้วยผู้ที่มีความชำนาญ ไม่น้อยกว่า 5 ท่าน (จำนวน 6 ท่าน) แต่ละคนจะแยกกันตรวจและให้คะแนนโดยอิสระ โดยมีรายนามผู้เชี่ยวชาญวิเคราะห์ผลวิจัย ดังนี้

- นางสาวตติกานต์ เรือศรีจันทร์ ตำแหน่งสถาปนิก
- นางสาวกชพรรณ พงษ์พยัคเลิศ ตำแหน่งสถาปนิกชำนาญการ
- อาจารย์มานพ ต้นเคน ตำแหน่งอาจารย์คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ความเชี่ยวชาญด้านวัสดุตกแต่ง และวัสดุประหยัดพลังงาน

- นายชนดล บุญลือ ตำแหน่ง วิศวกรสนาม
- นายสมพงษ์ ประเสริฐศรี ช่างปุกระเบื้อง
- นางสาว ไตรวัชรกุล เจ้าของร้านขายวัสดุก่อสร้าง



ภาพที่ 9 ตัวอย่างการทำแบบประเมินความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ

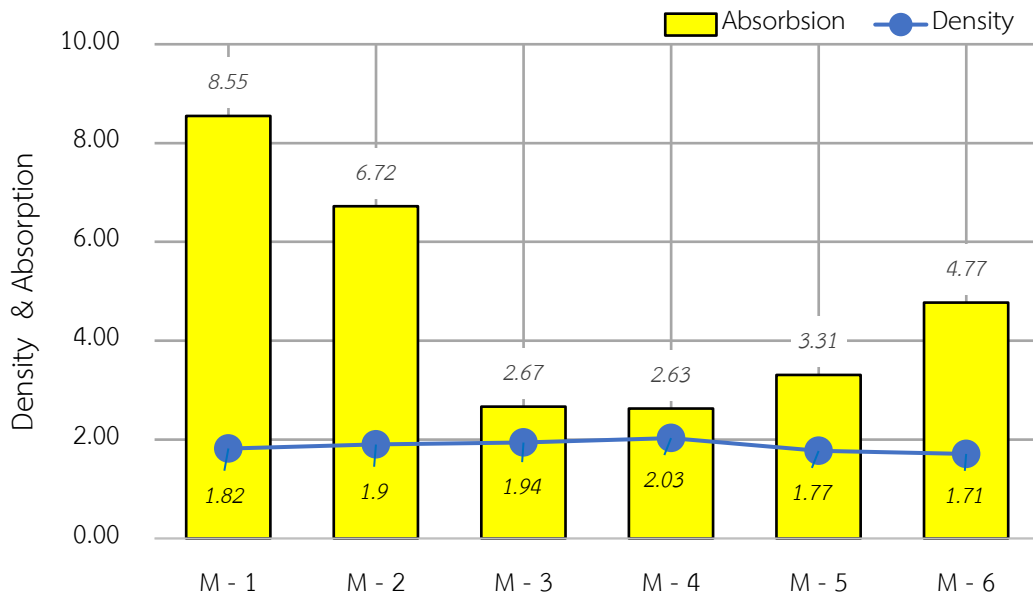
4. ผลการวิจัย

4.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของกระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อน

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของกระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อน โดยใช้ผงหินอ่อนแทนที่ทรายละเอียด ได้ผลการทดสอบ ดังนี้

4.1.1 ความหนาแน่น พบว่า ปริมาณผงหินอ่อนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากผงหินอ่อนมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าทราย เมื่อใส่แทนที่จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าใส่ในปริมาณที่มากเกินไป (มากกว่าร้อยละ 50) จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นที่ได้มีค่าต่ำลง โดยส่วนผสมสูตรที่ 4 (M-4) มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด เท่ากับ 2.03 ก./ลบ.ซม.

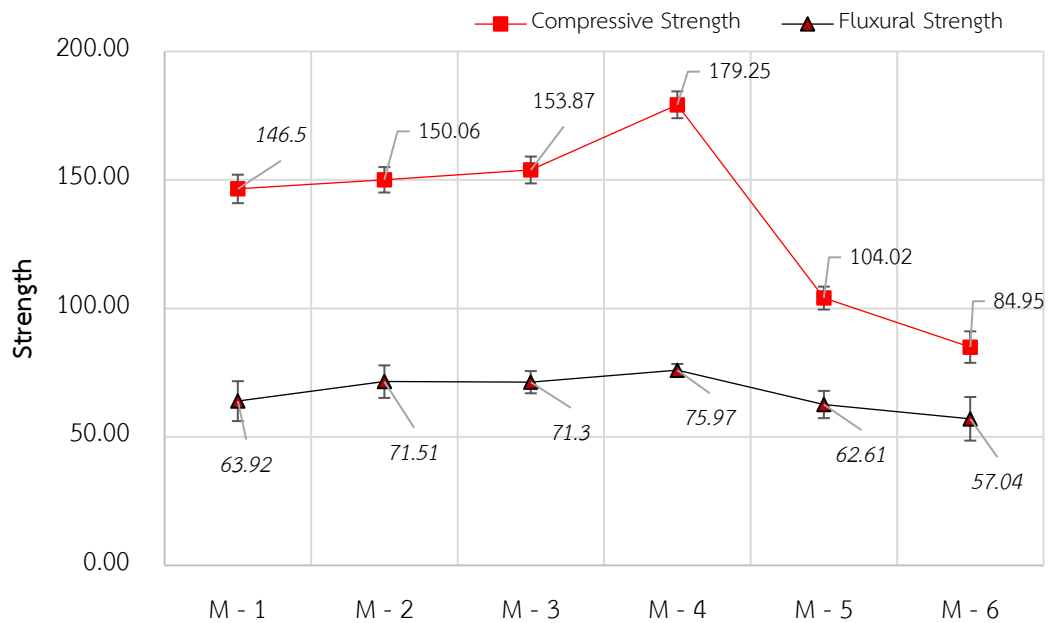
4.1.2 การดูดซึมน้ำ พบว่า ปริมาณผงหินอ่อนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ตัวอย่างทดสอบมีการดูดซึมน้ำที่ลดลง เนื่องจากผงหินอ่อนมีค่าการดูดซึมน้ำค่อนข้างต่ำ (ร้อยละ 0.48 ; สุทธิณี, 2554) เมื่อใช้แทนที่ทรายจึงส่งผลให้การดูดซึมน้ำต่ำลงตามไปด้วย โดยส่วนผสมสูตรที่ 4 (M-4) มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุด เท่ากับ ร้อยละ 2.63



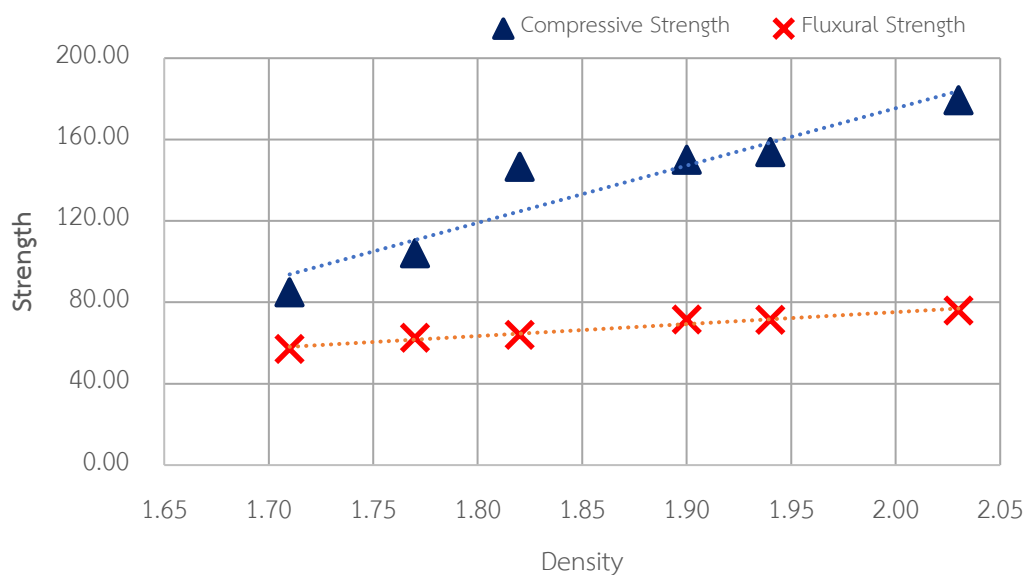
ภาพที่ 10 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

4.1.3 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด พบว่า ปริมาณผงหินอ่อนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากผงหินอ่อนมีอนุภาคขนาดเล็กจึงเข้าไปกระจายตัวในโครงสร้างส่งผลให้ค่ากำลังมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าใส่ผงหินอ่อนในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้ค่ากำลังที่ได้มีค่าต่ำลง สังเกตจากค่ากำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดมีผลการทดสอบที่สอดคล้องกัน โดยส่วนผสมสูตรที่ 4 (M-4) มีค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 179.25 และ 75.97 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 11

ในขณะที่เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด พบว่า ตัวอย่างทดสอบที่มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 11 ผลการทดสอบสมบัติทางกล



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น และค่ากำลังรับแรง

4.2 การตรวจสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ผลิตภัณฑ์หินทราย

การตรวจสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 194/2546 ครอบคลุมเฉพาะผลิตภัณฑ์หินทรายที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้หินทรายธรรมชาติ และหินทรายเทียมเป็นวัสดุหลัก ผลการตรวจสอบแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการตรวจสอบกระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อน

ลำดับ	เกณฑ์ที่กำหนด	คะแนนเฉลี่ย (\bar{X})	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($S.D.$)
1	มีรูปแบบ รูปทรงและสัดส่วนที่เหมาะสม	3.33	0.47
2	ประณีต สวยงาม ไม่มีรอยแตกร้าว	3.17	0.37
3	ลักษณะผิวต้องคล้ายหินทรายธรรมชาติ	2.83	0.69
4	ไม่ปรากฏรอยพิมพ์หรือรอยต่อ	3.17	0.37
5	เนื้อทรายที่ผิวต้องแน่นไม่หลุดออกง่าย	3.00	0.82
6	ต้องประณีต ติดแน่น คงทน	3.00	0.82
7	บริเวณรอยต่อไม่เปราะเปื้อนสารยึดติด	3.00	0.00
8	ติดแน่น คงทน กลมกลืน และเหมาะสมกับชิ้นงาน	3.17	0.37
รวม		3.08	0.49

จากการตรวจสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 194/2546 โดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 6 ท่าน พบว่า ค่าที่ได้มีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 3.08 จาก 4.00 คะแนน เมื่อพิจารณารายประเด็น พบว่า ประเด็นที่มีคะแนนเฉลี่ยสูงสุด คือ มีรูปแบบรูปทรงและสัดส่วนที่เหมาะสม (3.33) รองลงมา มี 3 ประเด็น คือ ประณีตสวยงาม ไม่มีรอยแตกร้าว, ไม่ปรากฏรอยพิมพ์หรือรอยต่อ และ ติดแน่น คงทน กลมกลืนและเหมาะสมกับชิ้นงาน (3.17) รองลงมา คือ เนื้อทรายที่ผิวต้องแน่นไม่หลุดออกง่าย, ต้องประณีต ติดแน่น คงทน และบริเวณรอยต่อไม่เปราะเปื้อนสารยึดติด (3.00) โดยประเด็นที่ได้คะแนนต่ำสุด คือ ลักษณะผิวต้องคล้ายหินทรายธรรมชาติ (2.83) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงต้องนำจุดนี้ไปพัฒนาต่อไป

นอกจากนี้จากผลการทดสอบการนำกระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อนไปใช้งานจริงเป็นระยะเวลา 6 เดือน ยังไม่พบคราบของเหลว หรือเชื้อรา ที่ส่งผลให้ตัวอย่างทดสอบเกิดความเสียหาย



ภาพที่ 13 ตัวอย่างการนำกระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อนไปใช้งานจริง

4.3 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตกระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อน ขนาด 5x20 ซม. ซึ่งราคาขึ้นอยู่กับค่าวัสดุและค่าแรง เมื่อทำการวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์แล้ว พบว่า กระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อนมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าราคาขายที่ขายทั่วไปตามท้องตลาดถึงร้อยละ 50 ขึ้นไป ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ต้นทุนการผลิตกระเบื้องหินทรายเทียมผสมผงหินอ่อน (ต่อ 1 ตร.ม.)

ตัวอย่างทดสอบ	ราคา (บาท)/ตารางเมตร				รวมค่าวัสดุ	ค่าแรง	ต้นทุนการผลิต
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว	ทรายละเอียด	ผงหินอ่อน	อื่น ๆ			
M - 1	60	30	-	10	100	30	130
M - 2	60	20	-	10	90	27	117
M - 3	60	16	-	10	86	26	112
M - 4	60	12	-	10	82	25	107
M - 5	60	8	-	10	78	23	101
M - 6	60	4	-	10	74	22	96

หมายเหตุ : 1) ราคาค่าแรงเท่ากับร้อยละ 30 ของราคาวัสดุ

2) ราคากระเบื้องหินทรายตามท้องตลาด 240 บาท/ตร.ม. (ที่มา: ตราช่างศรีเจริญ)

3) อื่น ๆ ในที่นี้ หมายถึง ราคาแบบหล่อ ค่าน้ำ เป็นต้น

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของกระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อนอำเภอรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชร ในสัดส่วนผสมต่าง ๆ พบว่า กระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อน สูตรที่ 4 ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว 1 ส่วน ผงหินอ่อน 1.5 ส่วน ทรายละเอียด 1.5 ส่วน และน้ำ 1 ส่วน มีความเหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปจริง เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นสูงสุด (2.03 กก./ลบ.ซม.) ร้อยละการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด (ร้อยละ 2.63) ค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดัดสูงที่สุดเท่ากับ 179.25 และ 71.97 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ

เมื่อนำไปทำการตรวจสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 194/2546 พบว่า คะแนนที่ได้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.08 จาก 4.00 คะแนน อยู่ในเกณฑ์ดี โดยกระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อนที่ได้ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง คงทน สามารถนำไปใช้งานได้จริง รวมทั้งมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า

ห้องตลาด ประมาณร้อยละ 50 อีกทั้งยังเป็นการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากท้องถิ่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท สว่างหินอ่อน จำกัด อำเภอพรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชร ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงหินอ่อนสำหรับใช้ในงานวิจัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ที่ให้การสนับสนุนในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการสำหรับการทดสอบ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

- พศวีร์ ศรีวัฒนปิยงกูร. (2559). การพัฒนาหินทรายที่ใช้เถาถอย. (วิทยานิพนธ์). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- สฤกษ์ พรมสายใจ. (2559). การทดลองหาอัตราส่วนผสมระหว่าง ทราย ผงหินอ่อน ปูนซีเมนต์ เพื่อทำผลิตภัณฑ์กระเบื้องหินทราย สำหรับตกแต่งบ้าน. (รายงานการวิจัย). มหาวิทยาลัยราชภัฏ กำแพงเพชร, กำแพงเพชร.
- สุทธิณี โฆษิตานนท์. (2554). การพัฒนาสูตรน้ำเคลือบผลิตภัณฑ์กระเบื้องจากผงหินอ่อนบ้านเขาสว่าง อำเภอพรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชร. (ปริญญาานิพนธ์). มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร, กำแพงเพชร.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2547). ผลิตภัณฑ์หินทราย. กรุงเทพฯ: สมอ.
- เอกสิทธิ์ เทียนมาศ, และสุรเชษฐ์ ตุ่มมี. (2562). การศึกษาสมบัติของแผ่นคอนกรีตปูพื้นทางเท้าผสมผงหินอ่อน. วารสารสักทอง: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 6(1), 73 – 82.
- American Society for Testing and Material. (1996). Annual Book of ASTM Standard, USA: Easton Md.



การศึกษากำลังอัดคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียด
กรณีศึกษา ส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่
และค่าการยุบตัวคงที่

A STUDY OF THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE WITH
BOTTOM ASH AS PARTIAL REPLACEMENT FOR FINE AGGREGATE:
A CASE STUDY WITH A CONSTANT WATER CEMENT RATIO AND
A CONSTANT SLUMP VALUE

จิรา ธรรมนิยม*, สุรเชษฐ์ วรรณ

Jira Tamniyom*, Surachet Wanna

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

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

*Corresponding author e-mail: jira.t@psru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 21 พฤษภาคม 2567

วันที่แก้ไขบทความ 16 กันยายน 2567

วันที่ตอบรับบทความ 23 กันยายน 2567

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษากำลังอัดคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดกรณีศึกษา อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่และค่าการยุบตัวคงที่ โดยออกแบบคอนกรีตอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.55 ใช้เถ้าก้นเตาสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) ทดแทนมวลรวมละเอียดที่ ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 50 และ 100 โดยปริมาตร ทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, และ 28 วัน พบว่า กรณีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ค่าการยุบตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้นแปรผันตามปริมาณเถ้าก้นเตา และกำลังอัดมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่อนำไปทดแทนมวลรวมละเอียดไม่เกินร้อยละ 30 กรณีค่าการยุบตัวของคอนกรีตคงที่ ขณะทำการผสมคอนกรีตจะมีน้ำส่วนเกินที่คายออกมาจากเถ้าก้นเตา ต้องทำการลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต เพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับคอนกรีตควบคุม และจากผลการทดสอบ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตในทุกอัตราส่วนผสมมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม

คำสำคัญ: เถ้าก้นเตา, กำลังอัดคอนกรีต, การบ่มภายใน

Abstract

This research aims to investigate the compressive strength of concrete using coal bottom ash as a replacement for fine aggregate. In this case study, the researchers fixed the water-to-cement ratio and the slump value. They designed concrete with a water-to-cement ratio (W/C) of 0.55 and used coal bottom ash in a saturated surface dry condition to replace fine aggregate at percentages of 0%, 10%, 20%, 30%, 50%, and 100% by volume. The results revealed that when the water-to-cement ratio was fixed, the slump value significantly increased with the increasing percentage of coal bottom ash, and the compressive strength was higher than that of the control concrete when the replacement of fine aggregate did not exceed 30%. In cases where the slump value of the concrete was fixed, excess water flowed out of the coal bottom ash during the mixing process. To achieve a slump value equivalent to the control concrete, reducing the amount of water used in concrete mixing was necessary. From the test results, it was found that the compressive strength of concrete at all replacement percentages was higher than that of the control concrete.

Keywords: Bottom ash, Compressive strength, Internal curing

1. บทนำ

เถ้าลอย (Fly ash) และเถ้าก้นเตา (Bottom ash) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าลอยถูกนำไปใช้ในการผสมคอนกรีตโดยการทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนอย่างแพร่หลาย แต่ในทางกลับกัน เถ้าก้นเตาถูกนำไปใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย ถึงแม้ว่าองค์ประกอบทางเคมีจะมีความใกล้เคียงกับเถ้าลอย เนื่องจากเถ้าก้นเตามีขนาดใหญ่การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ผิวด้านนอกที่สัมผัสน้ำเท่านั้น การนำเถ้าก้นเตาไปทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนนั้นจึงจำเป็นต้องนำไปบดละเอียดให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตให้เพิ่มมากขึ้น

การนำเถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดในงานคอนกรีต เถ้าก้นเตามีลักษณะรูปร่างที่กลวงพรุน ผิวหยาบ ขรุขระ มีค่าการดูดซึมน้ำค่อนข้างสูง เมื่อนำมาผสมคอนกรีตความหนาแน่นของคอนกรีตจะลดต่ำลงและส่งผลกำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าลดต่ำลง ในทางกลับกันหากนำเถ้าก้นเตาที่มีความชื้นเท่ากับค่าการกักเก็บน้ำและนำไปใช้ผสมคอนกรีต เมื่อน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจะหมดไปแล้วน้ำที่ถูกกักเก็บภายในเถ้าก้นเตาจะคายออกมาและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อเนื่องยาวนานเปรียบเสมือนการบ่มคอนกรีตจากภายใน (Internal curing) จากข้อดีข้อเสีย

ดังกล่าวหากใช้เถ้ากั้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดในปริมาณที่เหมาะสมนอกจากจะช่วยให้เกิดการนำของเหลือทิ้งไปใช้ให้เกิดประโยชน์แล้วยังช่วยเพิ่มกำลังอัดให้แก่คอนกรีต

ในการผสมคอนกรีตหากใช้เถ้ากั้นเตาอยู่ในสถานะอิมตัวผิวแห้ง รูปพรุน โพรง ภายในเถ้ากั้นเตาถูกบรรจุด้วยน้ำ นำไปแทนที่ทรายเพื่อประโยชน์ในทางด้านการบ่มตัวภายใน (Internal curing) นั้น ระหว่างการผสมคอนกรีตอาจเกิดการระเหยกันทำให้เถ้ากั้นเตาเกิดการแตกและน้ำภายในถูกคายออกมา ทำให้เกิดปริมาณน้ำส่วนเกินในส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งทำให้คอนกรีตเหลวมากขึ้น ความสามารถการเทได้เพิ่มมากขึ้นและอาจส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษา กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดโดยกำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เป็นค่าคงที่ เปรียบเทียบกับการกำหนดให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump) เป็นค่าคงที่ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำเถ้ากั้นเตาไปทดแทนมวลรวมละเอียดในงานคอนกรีตต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาปริมาณการใช้เถ้ากั้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีต

2.2 เพื่อศึกษาผลของการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดในกรณีที่กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ และ ค่าการยุบตัวคงที่

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตราช้าง

3.1.2 เถ้ากั้นเตา จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

3.1.3 มวลรวมหยาบ ขนาดโตสุด 1 นิ้ว

3.1.4 ทรายแม่น้ำ ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 2.99

3.2 ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้ากั้นเตา

3.2.1 รูปร่างลักษณะของเถ้ากั้นเตา

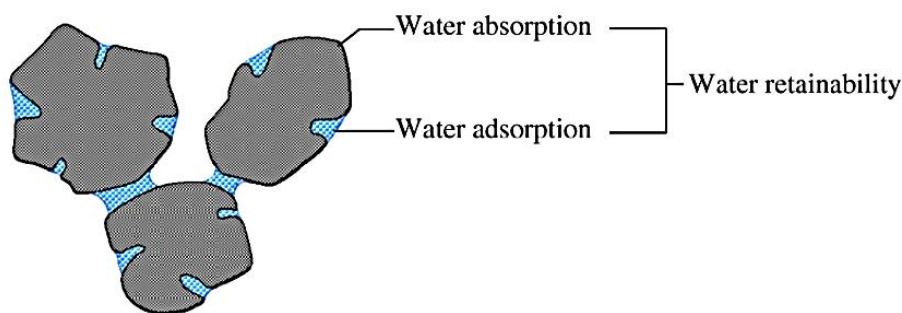
3.2.2 ทดสอบขนาดคละของเถ้ากั้นเตาและค่าโมดูลัสความละเอียดของเถ้ากั้นเตา ตามมาตรฐาน ASTM C136 และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C33-78

3.2.3 หน่วยน้ำหนักและค่าความถ่วงจำเพาะ ของเถ้ากั้นเตา

3.2.4 ค่าการกักเก็บน้ำของเถ้ากั้นเตา (Water retain ability) ของเถ้ากั้นเตาโดยทำตามขั้นตอนของ Kasemchaisiri & Tangtermsirikul (2007)

ในการหาปริมาณความชื้นของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C 128 เป็นการวัดค่าปริมาณความชื้นที่สถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry, SSD) โดยขั้นตอนการทดสอบจะนำมวลรวมละเอียดที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำในสถานะเปียก (Wet, W) มาทำให้ผิวแห้ง แรงยึดเหนี่ยวที่ผิวของมวลรวมละเอียดจะมีค่าลดลง หลังจากนั้นนำไปบรรจุใส่ภาชนะทรงกรวยเพื่อสังเกตุดูลักษณะการพังทลาย เมื่อได้ลักษณะการพังทลายตามมาตรฐานแล้วจะนำทรายนั้นไปหาปริมาณความชื้นของมวลรวมละเอียด แต่ในกรณีที่มวลรวมละเอียดมีความพรุน ผิวสัมผัสหยาบ ขรุขระ แรงยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสของมวลรวมมีปริมาณสูง ปริมาณความชื้นที่ลดลงไม่ได้ส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวของมวลรวมอย่างมีนัยสำคัญ และดังแสดงตามงานวิจัยของ Bucholc & Ghafoori (1996) เมื่อนำปริมาณความชื้นตามมาตรฐาน ASTM C 128 ไปใช้ในการผสมคอนกรีต มวลรวมพรุนจะมีความต้องการน้ำมาก ลักษณะของคอนกรีตสดจะมีความชื้น มีความสามารถในการเทได้ต่ำ

ค่าการกักเก็บน้ำ (Water retainability) หมายถึงปริมาณความชื้นที่ดูดซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุของมวลรวม (Water absorption) รวมกับปริมาณความชื้นที่เกาะอยู่ที่ผิวสัมผัส บรรจุอยู่ในรูพรุน โพรงของมวลรวมภายใต้แรงโน้มถ่วง (Water Adsorption) ดังภาพที่ 1 ซึ่งปริมาณน้ำดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด โดยเฉพาะในด้านความสามารถการเทได้ (Workability) ซึ่งจากผลการทดสอบของ Kasemchaisiri & Tangtermsirikul (2007) พบว่าการใช้ค่าการกักเก็บน้ำ (Water retainability) ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจะให้คุณสมบัติของคอนกรีตสดและกำลังอัดของคอนกรีตที่เหมาะสม มากกว่าการใช้ปริมาณความชื้นตามวิธีการ ASTM C 128



ภาพที่ 1 แสดงลักษณะของความชื้นในการหาปริมาณค่าการกักเก็บน้ำ
ของมวลรวมที่มีความพรุน
(Kasemchaisiri & Tangtermsirikul, 2007)

3.3 ออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีต (Mix design)

กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.55

ในกรณีศึกษา ค่าการยุบตัวคงที่(FS) นั้น จะเริ่มทำการผสม ตัวอย่างคอนกรีตควบคุม W55BA0 และทดสอบหาค่ายุบตัวของคอนกรีต Slump Test ซึ่งผลที่ได้มีค่าการยุบตัวที่ 20 cm. ซึ่งจะใช้ค่ายุบตัวนี้เป็นค่าควบคุมของทุกตัวอย่างในกรณีศึกษาค่าการยุบตัวคงที่(FS)

3.4 การเตรียมตัวอย่าง

3.4.1 มวลรวมละเอียด (ทราย) อยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) จะทำการปรับปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตตามสภาพความชื้นจริงขณะผสมคอนกรีต

3.4.2 มวลรวมละเอียด(แฉ่ำกันเตา) มีปริมาณความชื้นเท่ากับค่าการกักเก็บน้ำของแฉ่ำกันเตา (Water Retain ability) โดยจะนำแฉ่ำกันเตาไปอบให้อยู่ในสถานะแห้ง (Oven dry) $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำแฉ่ำกันเตาใส่ถุงพลาสติกหนา เติมน้ำเท่ากับปริมาณค่าการกักเก็บ (Water Retainability) ของแฉ่ำกันเตา คลุกเคล้าให้เข้ากันมัดปากถุงพลาสติกให้แน่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้งานจะทำการตรวจสอบปริมาณความชื้นของแฉ่ำกันเตาอีกครั้งเปรียบเทียบกับค่าการกักเก็บน้ำ และปรับปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตต่อไป

3.4.3 มวลรวมหยาบ(หิน) อยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง โดยจะนำหินแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำขึ้นจากน้ำ เช็ดผิว ผึ่งให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

3.4.4 การผสมคอนกรีตเพื่อให้ตัวอย่างคอนกรีตมีความสม่ำเสมอ จะทำการจับเวลาแต่ละขั้นตอนการผสมให้เท่ากันทุกอัตราส่วนผสม

3.4.5 การทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test) ตามมาตรฐาน ASTM C143

ในกรณีศึกษาที่กำหนดให้ค่าการยุบตัวคงที่ (FS) เมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยแฉ่ำกันเตา ปริมาณน้ำส่วนเกินจะเพิ่มมากขึ้น การผสมคอนกรีตจะเริ่มใส่น้ำที่ร้อยละ 70 และทำการทดสอบค่าการยุบตัว โดยค่าการยุบตัวควบคุมเท่ากับ 20 cm หากค่าการยุบตัวน้อยกว่า 20 cm จะค่อยๆเพิ่มปริมาณน้ำและทดสอบค่าการยุบตัวจนกระทั่งได้ค่าการยุบตัวเท่ากับ 20 cm และบันทึกปริมาณน้ำที่ใช้จริงเป็นไปตามตารางที่ 1 และหากทดสอบค่าการยุบตัวแล้วปรากฏว่า มีค่าการยุบตัวมากกว่า 20 cm จะยกเลิกการผสมคอนกรีตตัวอย่างนั้นและเริ่มทำการผสมใหม่อีกครั้ง

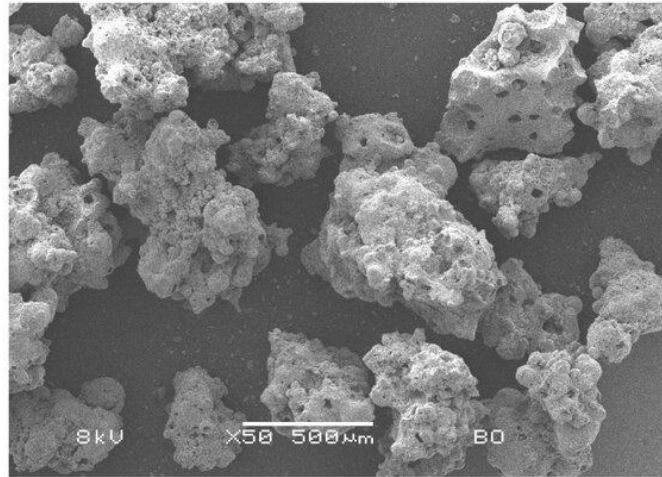
3.4.6 เก็บตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C192 โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. อัตราส่วนผสมละ 3 ตัวอย่าง แยกออกจากแบบหล่อที่อายุ 1 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างบ่มในอากาศ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1 วัน , 3 วัน , 7 วัน , 14 วัน และ 28 วัน

3.4.6 ทดสอบกำลังอัดคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C39

4. ผลการวิจัย

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าก้นเตา

4.1.1 รูปร่างลักษณะของเถ้าก้นเตา มีเหลี่ยมมุม ผิวยรุขระ พรุณ มีฟองอากาศเป็นจำนวนมาก มีความเปราะ เมื่อมีแรงมากระทบสามารถแตกหักได้



ภาพที่ 2 ภาพขยายเถ้าก้นเตา จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ กำลังขยาย 50 เท่า
(Onprom *et al.*, 2015)

4.1.2 ตารางที่ 2 แสดงขนาดคละของเถ้าก้นเตาจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ ผลปรากฏว่าขนาดคละไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 โดยร้อยละสะสมน้ำหนักเถ้าก้นเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 มีค่าเท่ากับ 72.76 มีค่ามากกว่ามาตรฐานที่ต้องอยู่ในช่วงร้อยละ 25 – 60 และ ร้อยละสะสมน้ำหนักเถ้าก้นเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 มีค่าเท่ากับ 38.52 มีค่ามากกว่ามาตรฐานที่ต้องอยู่ในช่วงร้อยละ 10 – 30 และค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย (F.M.) มีค่าเท่ากับ 2.22 ซึ่งโมดูลัสความละเอียดของทรายควรมีค่าอยู่ระหว่าง 2.3–3.2 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงขนาดคละให้ได้ตามมาตรฐานก่อนนำไปใช้งาน

จากภาพที่ 3 จะเห็นว่าร้อยละสะสมน้ำหนักผ่านตะแกรงเบอร์ 16 เริ่มมีแนวโน้มที่ใกล้กับค่าขีดจำกัดบนของมาตรฐาน และมีค่ามากกว่ามาตรฐานที่ร้อยละสะสมน้ำหนักผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และ เบอร์ 50 ซึ่งแสดงว่าปริมาณมีเถ้าก้นเตาขนาดใหญ่ที่น้อยเกินไป ซึ่งสอดคล้องกับค่าโมดูลัสของเถ้าก้นเตาที่มีค่าเท่ากับ 2.22 แสดงให้เห็นว่าเถ้าก้นเตามีขนาดเล็ก ควรเพิ่มสัดส่วนเถ้าก้นเตาที่มีขนาดใหญ่ ผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงเถ้าก้นเตา ดังนี้

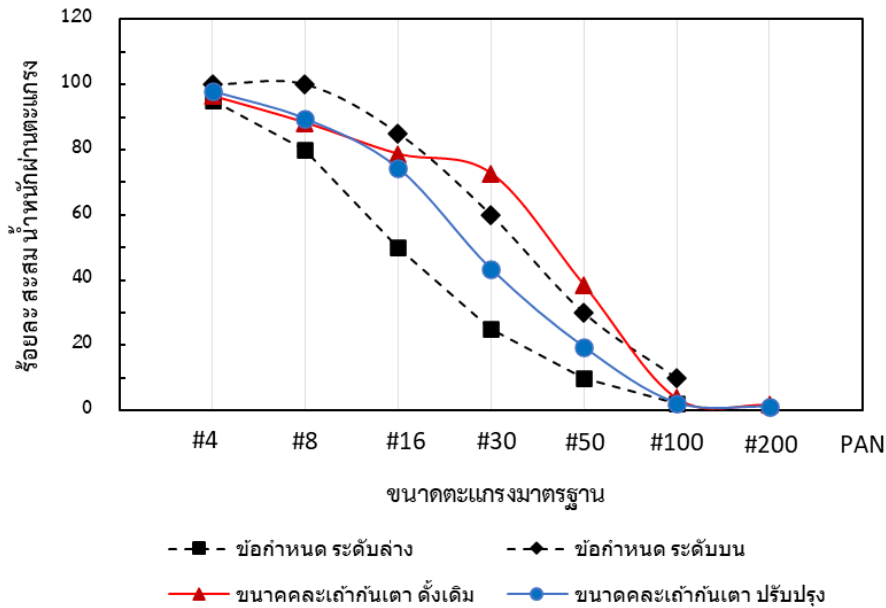
เพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 8-ค้ำตะแกรงเบอร์ 16 20 กรัมต่อเถ้าก้นเตาเดิม 100 กรัม และเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 16-ค้ำตะแกรงเบอร์ 30 48 กรัมต่อเถ้าก้นเตาเดิม 100 กรัม ทำการคลุกเคล้าให้เข้ากันเป็นอย่างดีและทำการทดสอบหาขนาดคละของเถ้าก้นเตาที่ผ่านการปรับปรุงแล้วอีกครั้ง โดยได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3 และ ภาพที่ 3 และมีค่าโมดูลัสความละเอียดของเถ้าก้นเตาเมื่อปรับปรุงขนาดคละแล้ว เท่ากับ 2.74

ตารางที่ 2 ขนาดคละของเถ้าก้นเตาโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

ขนาด ตะแกรง	น้ำหนักค้ำ ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละ น้ำหนักค้ำ ตะแกรง	ร้อยละ สสม น้ำหนักค้ำ ตะแกรง	ร้อยละ สสม น้ำหนักผ่าน ตะแกรง	ร้อยละสสม ASTM C33
No.4	10.56	3.52	3.52	96.48	95 - 100
No.8	24.60	8.20	11.72	88.28	80 - 100
No.16	28.68	9.56	21.28	78.72	50 - 85
No.30	17.88	5.96	27.24	72.76	25 - 60
No.50	102.72	34.24	61.48	38.52	10 - 30
No.100	104.28	34.76	96.24	3.76	2 - 10
No.200	6.12	2.04	98.28	1.72	-
PAN	5.16	1.72	100.00	0.00	-
รวม	300.00				
FM	2.22				

ตารางที่ 3 ขนาดคละของเถ้าก้นเตาโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ที่ผ่านการปรับปรุงขนาดคละ

ขนาด ตะแกรง	น้ำหนักค้ำ ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละ น้ำหนักค้ำ ตะแกรง	ร้อยละ สสม น้ำหนักค้ำ ตะแกรง	ร้อยละ สสม น้ำหนักผ่าน ตะแกรง	ร้อยละสสม ASTM C33
No.4	6.29	2.10	2.10	97.90	95 - 100
No.8	25.36	8.45	10.55	89.45	80 - 100
No.16	45.64	15.21	25.76	74.24	50 - 85
No.30	92.79	30.93	56.69	43.31	25 - 60
No.50	71.86	23.95	80.65	19.35	10 - 30
No.100	51.36	17.12	97.77	2.23	2 - 10
No.200	3.64	1.21	98.98	1.02	-
PAN	3.06	1.02	100.00	0.00	-
รวม	300.00				
FM	2.74				



ภาพที่ 3 เปรียบเทียบขนาดคละของเก่ากันเตาก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

หน่วยน้ำหนักของทรายในสภาพแห้งที่ใช้ในการทดสอบ มีค่าเท่ากับ $1,673 \text{ kg/m}^3$ ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง มีค่าเท่ากับ 2.59 และหน่วยน้ำหนักของเก่ากันเตาในสภาพแห้ง มีค่าเท่ากับ $1,037 \text{ kg/m}^3$ ค่าความถ่วงจำเพาะของเก่ากันเตาในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 1.83

4.1.3 ค่าการกักเก็บน้ำ(Water retainability)ของเก่ากันเตา มีค่าเท่ากับร้อยละ 30.82

4.2 นำข้อมูลต่างๆ มาออกแบบส่วนผสมคอนกรีต การคิดร้อยละของเก่ากันเตาคำนวณโดยปริมาตร ก่อนการผสมคอนกรีตจะทำการตรวจสอบปริมาณความชื้นของมวลรวมและปรับแก้ปริมาณน้ำที่ใช้ผสม ซึ่งปริมาณน้ำที่ปรากฏในตารางเป็นปริมาณน้ำที่ใช้จริงในการหล่อตัวอย่างคอนกรีต รายละเอียดอัตราส่วนผสมคอนกรีตต่างๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีต (อัตราส่วนของคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม.)

No.	Mix Id	Cement Type I (kg.)	Water (L.)	Coarse Aggregate (kg.)	Fine Aggregate (kg.)	Bottom Ash (kg.)
1	W55 BA0 (Control)	585.40	312.48	779.00	528.44	0.00
2	W55 BA10 FW	585.40	313.48	779.00	475.60	30.76
3	W55 BA20 FW	585.40	314.44	779.00	422.76	61.60
4	W55 BA30 FW	585.40	315.40	779.00	369.92	92.36
5	W55 BA50 FW	585.40	317.40	779.00	264.24	153.96
6	W55 BA100 FW	585.40	322.28	779.00	0.00	307.92
7	W55 BA10 FS	585.40	278.12	779.00	468.24	30.48
8	W55 BA20 FS	585.40	250.00	779.00	416.20	60.96
9	W55 BA30 FS	585.40	229.16	779.00	364.16	91.44
10	W55 BA50 FS	585.40	222.24	779.00	260.12	152.40
11	W55 BA100 FS	585.40	208.32	779.00	0.00	305.40

หมายเหตุ ตัวอย่างการอธิบายชื่อ อัตราส่วนผสม W55BA10 FW

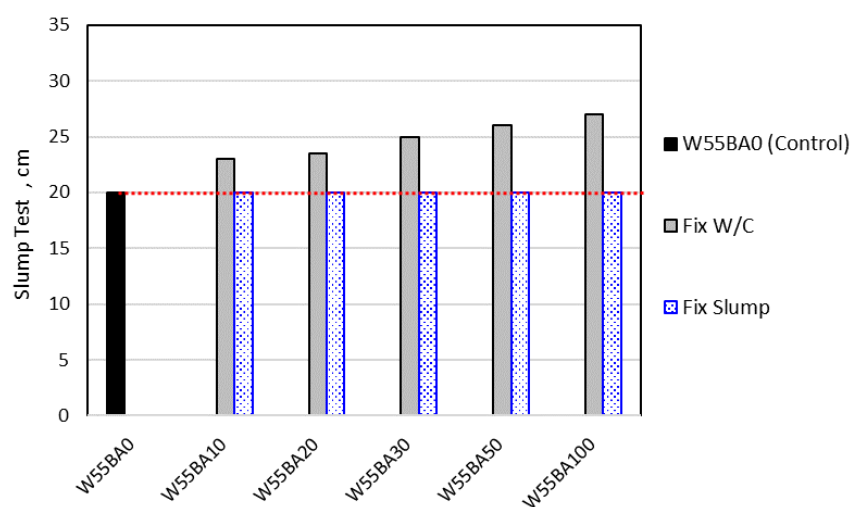
W55 หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.55

BA10 หมายถึง ปริมาณเถ้ากั้นเตา ร้อยละ 10

FW หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เป็นค่าคงที่

FS หมายถึง ค่าการยุบตัว (Slump) เป็นค่าคงที่

4.3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test)



ภาพที่ 4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ถ้าก้อนเตามีลักษณะทางพรุน กลวง ผิวหยาบ ขรุขระ ซึ่งเมื่อนำไปผสมคอนกรีตจะมีผลของการเกาะเกี่ยวกันที่ผิว (Interlocking) และหากถ้าก้อนเตาที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในสถานะอบแห้ง (Oven dry) หรือ แห้งในอากาศ (Air dry) จะเกิดการดูดซึมน้ำจากส่วนผสม ส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าลดต่ำลงเมื่อปริมาณถ้าก้อนเตาเพิ่มมากขึ้น (Aggarwal & Siddique, 2014) และ (Ankur & Singh, 2021) แต่ในทางกลับกันหากถ้าก้อนเตา อยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) ภายในถ้าก้อนเตาถูกกักเก็บไปด้วยน้ำ แต่ด้วยถ้าก้อนเตามีความเปราะ แดงง่าย ขณะผสมคอนกรีตอาจเกิดการกระทบกัน น้ำภายในถ้าก้อนเตาบางส่วนคายออกมาทำให้คอนกรีตมีมีเหลี่ยมมากขึ้น ค่าการยุบตัว (Slump Test) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณถ้าก้อนเตา (Kim *et al.*, 2021)

ในการทดลองนี้ เลือกใช้ถ้าก้อนเตาที่ปริมาณความชื้นเท่ากับค่าการกักเก็บน้ำ (Water retainability) รูพรุน โพรง ในเม็ดถ้าก้อนเตาถูกบรรจุด้วยน้ำ ผลปรากฏว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้นแปรผันตามปริมาณถ้าก้อนเตาที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่กล่าวข้างต้น ดังภาพที่ 4

4.4 ค่ากำลังอัดคอนกรีต (Compressive Strength)

จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุ 1 วัน , 3 วัน , 7 วัน , 14 วัน และ 28 วัน ได้ผลดังตารางที่ 2

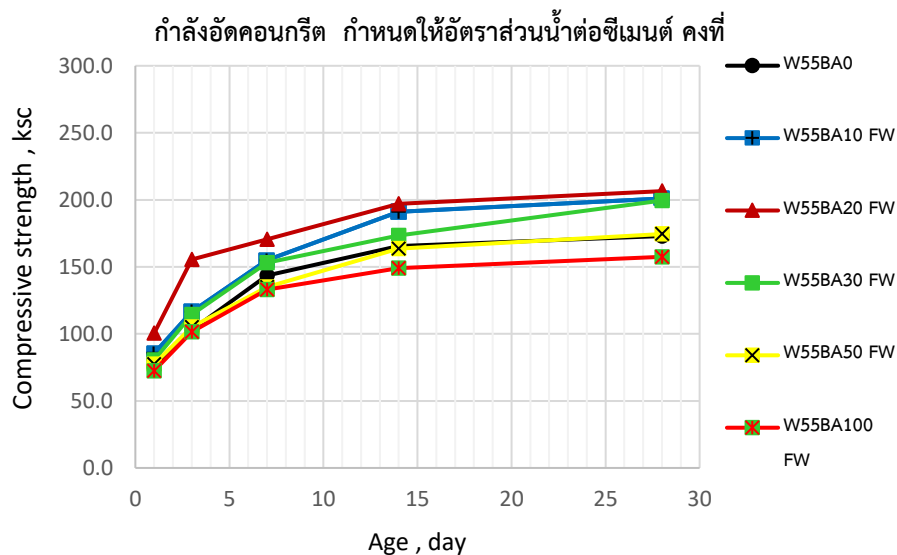
ตารางที่ 2 กำลังอัดคอนกรีต ksc.

No.	Mix Id	Compressive Strength , ksc.				
		1 day	3 days	7 days	14 days	28 days
1	W55 BA0 (Control)	75.0	103.0	143.5	165.5	173.0
2	W55 BA10 FW	85.5 + 14%	116.5 + 13%	155.0 + 8%	191.0 + 15%	201.0 + 16%
3	W55 BA20 FW	100.5 + 34%	155.5 + 51%	170.5 + 19%	197.0 + 19%	206.5 + 19%
4	W55 BA30 FW	80.5 + 7%	114.5 + 11%	153.0 + 7%	173.5 + 5%	199.5 + 15%
5	W55 BA50 FW	77.5 + 3%	105.0 + 2%	135.0 - 6%	163.5 - 1%	174.5 + 1%
6	W55 BA100 FW	72.5 - 3%	101.5 - 1%	133.0 - 7%	149.0 - 10%	157.5 - 9%
7	W55 BA10 FS	85.0 + 13%	110.0 + 7%	155.0 + 8%	172.5 + 4%	184.5 + 7%
8	W55 BA20 FS	97.5 + 30%	137.0 + 33%	170.5 + 19%	191.0 + 15%	206.0 + 19%
9	W55 BA30 FS	99.0 + 32%	170.5 + 66%	195.0 + 36%	244.0 + 47%	251.5 + 45%
10	W55 BA50 FS	98.0 + 31%	161.5 + 57%	190.5 + 33%	214.0 + 29%	222.0 + 28%
11	W55 BA100 FS	96.5 + 29%	139.0 + 35%	171.0 + 19%	196.0 + 18%	221.5 + 28%

หมายเหตุ 85.5 + 14% หมายถึง ค่ากำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 85.5 ksc. และค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 14

4.4.1 กรณีศึกษา กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ (FW)

เมื่อใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดไม่เกินร้อยละ 30 ผลปรากฏว่าค่ากำลังอัดทุกอัตราส่วนผสมและอายุของตัวอย่างทดสอบ มีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม W55BA0 และมีค่ากำลังอัดสูงมากที่สุด เมื่อปริมาณเถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดที่ร้อยละ 20 โดยมีกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วันเท่ากับ 206.5 ksc ซึ่งผลการวิจัยสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Kadam & Patil (2014) และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดมากกว่าร้อยละ 30 กำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ผลการทดสอบดังตารางที่ 2 และ ภาพที่ 5

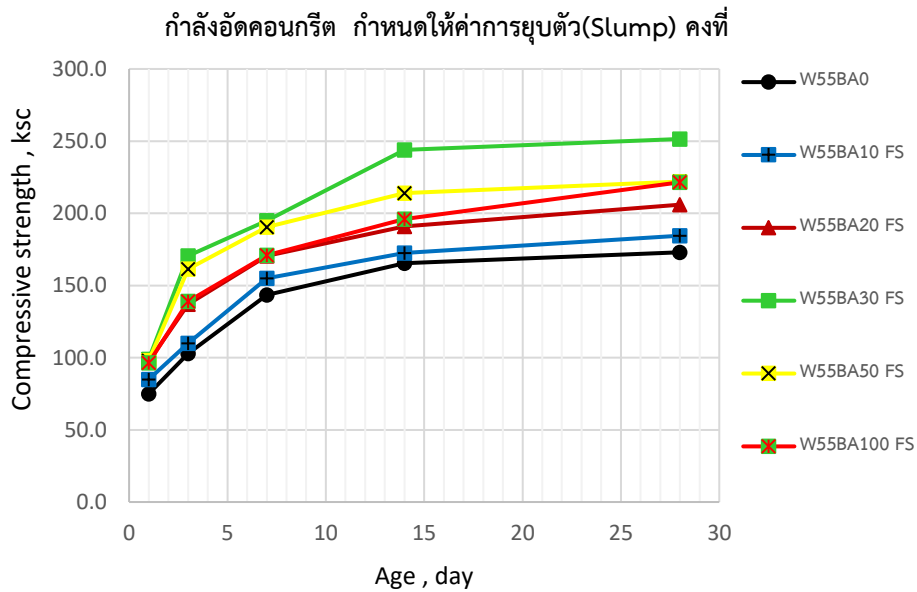


ภาพที่ 5 ค่ากำลังอัดของคอนกรีต กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่ ที่อายุ 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน และ 28 วัน, ksc

4.4.2 กรณีศึกษา กำหนดค่าการยุบตัวคงที่ (FS)

ขณะผสมตัวอย่างจะนำน้ำส่วนเกินออกจากส่วนผสมคอนกรีต แต่ยังคงความสามารถการเทได้ (Workability) เท่าเดิม โดยมีค่าการยุบตัว (Slump Test) 20 cm. เท่ากับคอนกรีตควบคุม ผลปรากฏว่า ค่ากำลังอัดทุกอัตราส่วนผสมและอายุของตัวอย่างทดสอบ มีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม W55BA0 ทั้งหมด โดยอัตราส่วนผสมที่ใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดมากที่สุดในทุกช่วงอายุตัวอย่าง ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 251.5 ksc ดังภาพที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเกิดการกำจัดปริมาณน้ำส่วนเกิน (Free water) ส่งผลให้มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง (Bai *et al.*, 2005) โดยเมื่อใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียด ร้อยละ 10, 20, 30, 50 และ 100 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 0.48, 0.43, 0.39,

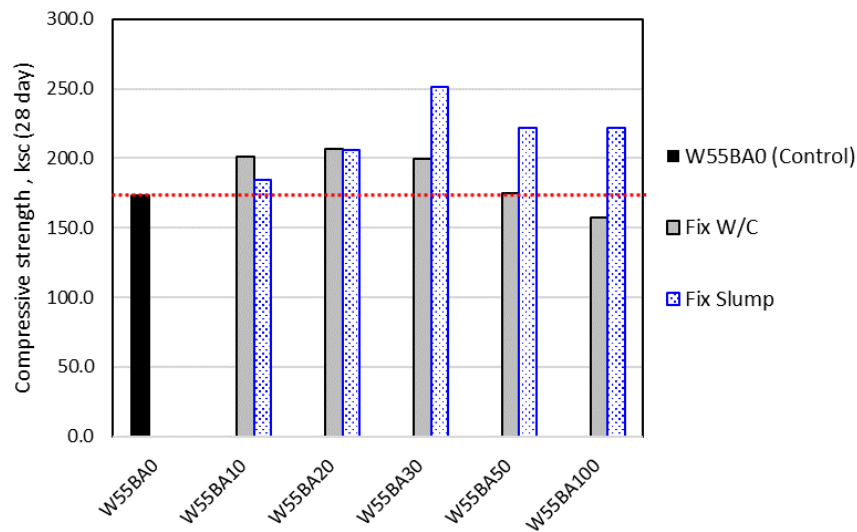
0.38 และ 0.36 ตามลำดับ และเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากั้นเตามากกว่าร้อยละ 30 ความหนาแน่นของเถ้ากั้นเตาส่งผลให้คอนกรีตมีค่าหนาแน่นต่ำลง กำลังคอนกรีตจึงลดต่ำลง (Kadam & Patil, 2014)



ภาพที่ 6 ค่ากำลังอัดของคอนกรีต กำหนดให้ค่าการยุบตัวคงที่
ที่อายุ 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน และ 28 วัน, ksc

4.4.3 เปรียบเทียบค่ากำลังอัด กรณีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่ (FW) และ ค่าการยุบตัวคงที่ (FS)

จากภาพที่ 7 หากพิจารณาจากเงื่อนไขที่ต้องการใช้เถ้ากั้นเตาให้มีปริมาณที่มากที่สุดเท่าที่จะสามารถนำมาใช้ได้ โดยพิจารณาคูณสมบัติทางด้านกำลังอัดและยังมีความสามารถการเทได้เท่ากับคอนกรีตควบคุม การผสมคอนกรีตเลือกใช้การผสมคอนกรีต โดยวิธีให้ค่าการยุบตัวคงที่ (FS) นำน้ำปริมาณส่วนเกินออก จะสามารถใช้ปริมาณเถ้ากั้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียดได้ทั้งหมด



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน, ksc

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากผลการศึกษากำลังอัดคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาทดแทนมวลรวมละเอียด กรณีศึกษา กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่และค่าการยุบตัวคงที่ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 การนำเถ้าก้นเตาไปทดแทนมวลรวมละเอียด กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่ (FW) ตามการออกแบบ โดยเถ้าก้นเตาอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) ค่าการยุบตัว (Slump Test) ของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นแปรผันตามปริมาณของเถ้าก้นเตา และมีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม เมื่อนำไปทดแทนมวลรวมละเอียดไม่เกิน ร้อยละ 30

5.2 การนำเถ้าก้นเตาไปทดแทนมวลรวมละเอียด กำหนดค่าการยุบตัวคงที่ (FS) ค่าการยุบตัว เท่ากับคอนกรีตควบคุม โดยเถ้าก้นเตาอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) ขณะทำการผสมคอนกรีตจะมีน้ำส่วนเกินที่คายออกมาจากเถ้าก้นเตา ดังนั้น หากต้องการควบคุมให้คอนกรีต มีความสามารถเท่าได้ให้เท่ากับคอนกรีตควบคุม ต้องทำการลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต และจากผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต ในทุกอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าก้นเตา ค่ากำลังอัด มีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชยานนท์ หารรรษภิญโญ อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ผู้เป็นแรงบันดาลใจและกระตุ้นให้ข้าพเจ้าทำวิจัยเสมอมา

7. เอกสารอ้างอิง

- Aggarwal, Y., & Siddique, R. (2014). Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. **Construction and Building Materials**, 54, 210-223
- Ankur, N., & Singh, N. (2021). Performance of cement mortars and concretes containing coal bottom ash: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 149.
- Bai, Y., Darcy, F., & Basheer, P.A.M. (2005). Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. **Construction and Building Materials**. 19, 691-697.
- Ghafoori, N., & Bucholc, J. (1996). Investigation of lignite-based bottom ash for structural concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 8(3), 128-137.
- Kadam, M. P., & Patil, Y.D. (2014). Effect of sieved coal bottom ash as a sand replacement on the properties of cement concrete. **Magazine of concrete Research**, 67(5), 227-234
- Kasemchaisiri, R., & Tangtermsirikul, S. (2007). A Method to Determine Water Retainability of Fine Porous Aggregate for Design and Quality Control of Fresh Concrete. **Construction and Building Materials**, 21, 1322-1334
- Kim, Y., Kim, H., Yang, K., & Ha, J. (2021). Effect of concrete unit weight on the mechanical properties of bottom ash aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, 273.
- Onprom, P., Chaimoon, K., & Cheerarot, R. (2015). Influence of bottom ash replacement as fine aggregate on the property of cellular concrete with various foam contents. **Advances in Materials Science and Engineering**. 1-11.
- Rafieizonooz, M., Mirza, J., Salim, M., Hussin, M., & Khankhaje, E. (2016). Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. **Construction and Building Materials**, 116, 15-24
- Singh, M., & Siddique, R. (2016). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete. **Journal of Cleaner Production**, 112, 620-630



Singh, M., & Siddique, R. (2014) Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, 73, 20-32.

ผลของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ต่อการ
ปรากฏสีของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส
EFFECTS OF MANGANESE DIOXIDE, NICKEL OXIDE, AND COPPER
OXIDE ON COLOR APPEARANCE OF FELDSPAR GLAZE AT 1230 °C

จุมพฏ พงศ์ศักดิ์ศรี

Jumpot Phongsaksri

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

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

Corresponding author e-mail: jumpot_ph@psru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 29 กุมภาพันธ์ 2567

วันที่แก้ไขบทความ 8 ธันวาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 11 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาปริมาณของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเฟลด์สปาร์ 2) เพื่อศึกษาปริมาณของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะผิวที่ปรากฏของเคลือบเฟลด์สปาร์ ดำเนินการวิจัยโดยกำหนดเคลือบพื้นฐานที่มีส่วนผสมของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ แบบเจาะจงจากตารางสามเหลี่ยม จำนวน 15 สูตร ซึ่งและบดความเร็วสูง 5 นาที เมาเคลือบที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส บรรยากาศแบบออกซิเดชัน วิเคราะห์การเกิดสี ความสว่างและค่าสีเคลือบด้วยเครื่องวัดค่าสี ผลการวิจัยพบว่า การเกิดสีของเคลือบมี 6 กลุ่มสี ดังนี้ 1) RAL-LS 7043 2) RAL-LS 7024 3) RAL-LS 7009 4) RAL-LS 7010 5) RAL-LS 7013 และ 6) RAL-LS 7003 ค่าความสว่าง ค่า L^* อยู่ระหว่าง 25.05 ถึง 37.33 มีค่าสี a^* อยู่ระหว่าง -0.65 ถึง 0.54 ค่าสี b^* อยู่ระหว่าง -2.26 ถึง 6.58 ผิวเคลือบ มี 2 ลักษณะ 1) ผิวกึ่งมัน กึ่งด้าน ได้แก่ สูตรที่ 7 11 12 และ 2) ผิวมันแวววาว ได้แก่ สูตรที่ 1 2 3 4 5 6 8 9 10 13 14 15 มีระดับความมันเงาอยู่ระหว่าง 30-85 GU และส่วนผสมที่ 4 7 8 11 ผิวเคลือบมีลักษณะเหมือนเปลือกส้ม ส่วนผสมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งในงานศิลปะเซรามิกส์ และการพัฒนาเคลือบในอุตสาหกรรม ประกอบด้วย เฟลด์สปาร์ ร้อยละ 45 โดโลไมท์ ร้อยละ 10 แคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 13 ดินขาว ร้อยละ 7 และควอตซ์ ร้อยละ 25 และสามารถใช้ออกไซด์ ได้ดังนี้ 1) แมงกานีสไดออกไซด์ ร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 6 2) นิกเกิลออกไซด์ ร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 3 และ 3) คอปเปอร์ออกไซด์ ร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 6

คำสำคัญ: เคลือบเฟลด์สปาร์, แมงกานีสไดออกไซด์, นิกเกิลออกไซด์, คอปเปอร์ออกไซด์

Abstract

This research aims to: 1) study the amounts of manganese dioxide, nickel oxide, and copper oxide that affect the color appearance of feldspar glaze, and 2) study the amounts of manganese dioxide, nickel oxide, and copper oxide that affect the surface characteristics of the feldspar glaze. To conduct the study, base glazes with specific compositions of manganese dioxide, nickel oxide, and copper oxide were prepared according to a ternary diagram, resulting in 15 different formulations. These formulations were processed by weighing and grinding at high speed for 5 minutes, followed by firing at 1230°C in an oxidation atmosphere. The analysis of color development, brightness, and color values of the glazes was conducted using a colorimeter. The findings revealed six color groups: 1) RAL-LS 7043, 2) RAL-LS 7024, 3) RAL-LS 7009, 4) RAL-LS 7010, 5) RAL-LS 7013, and 6) RAL-LS 7003. The brightness and color values of the glazes were as follows: L* values ranged from 25.05 to 37.33, a* values ranged from -0.65 to 0.54, and b* values ranged from -2.26 to 6.58. Two surface characteristics were observed: 1) semi-matte surfaces in formulations 7, 11, and 12, and 2) glossy surfaces in formulations 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 13, 14, and 15, with gloss levels ranging from 30 to 85 GU. Additionally, formulations 4, 7, 8, and 11 exhibited a coating surface resembling the texture of an orange peel. The compositions, which can be applied in ceramic art and glaze development for industrial applications, include: 45% feldspar, 10% dolomite, 13% calcium carbonate, 7% kaolin, and 25% quartz. Oxides that can be used are: 1) manganese dioxide (2–6%), 2) nickel oxide (2–3%), and 3) copper oxide (2–6%).

Keywords: Feldspar glaze, Manganese dioxide, Nickel oxide, Copper oxide

1. บทนำ

เคลือบ (Ceramics glaze) ใช้เพิ่มความสวยงามและความเป็นเอกลักษณ์ให้กับเครื่องปั้นดินเผา ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรง ทนทาน และยังช่วยให้ล้างทำความสะอาดได้ง่าย เคลือบ คือชั้นแก้วบางๆที่เกิดจากการผสมกันของวัตถุดิบหลักๆ ได้แก่ เฟลด์สปาร์ (Feldspar) ควอตซ์ (Quartz) ดินขาว (Kaolin) หรือนิยมเรียกว่า เคลือบเฟลด์สปาร์ ชนิดของเคลือบมีหลายลักษณะซึ่งแตกต่างกันไป ทั้งส่วนผสม การเผา และวิธีการใช้งาน และมีสมบัติที่แตกต่างกันซึ่งเคลือบที่เป็นพื้นฐานที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปได้แก่ เคลือบใส (Transparent glaze) นิยมใช้เคลือบทับภาชนะเครื่องปั้นดินเผาที่เขียนสีได้



เคลือบ และยังสามารถผสมออกไซด์เพื่อเกิดสีหรือความทึบในตัวเคลือบได้ (สุขุมาล, 2564) การใช้เคลือบผสมออกไซด์ให้สีจะสร้างเคลือบให้มีสีที่หลากหลายในเนื้อเคลือบ และมีความน่าสนใจมากยิ่งขึ้นจึงเป็นที่นิยมของช่างปั้นและโดยทั่วไปสีสำเร็จรูปจะมีราคาสูงกว่าการใช้ออกไซด์ที่ให้สีตามธรรมชาติ (ไพจิตร, 2546) และจะใช้อุณหภูมิในการเผาเคลือบที่ผสมสีสำเร็จรูปในอุณหภูมิไม่เกิน 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งโดยทั่วไปจะเผาเคลือบผลิตภัณฑ์ประเภทสโตนแวร์ (Stoneware) ที่อุณหภูมิประมาณ 1230 – 1280 องศาเซลเซียส ส่วนเทคนิคการสร้างเคลือบเซรามิกสีให้สีในปัจจุบันนี้นักเซรามิกยังนิยมใช้เคลือบพื้นฐานซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการพัฒนาสีของเคลือบที่มีความสะดวกมากวิธีหนึ่งแล้วใช้ออกไซด์ให้สีเป็นสารเพิ่มเติม ซึ่งออกไซด์บางชนิดอาจให้สีได้หลายสี เมื่อเผาในอุณหภูมิและบรรยากาศการเผาที่แตกต่างกัน รวมถึงการผสมกับออกไซด์ของโลหะชนิดอื่น ๆ ก็สามารถให้สีที่แตกต่างกันได้ และยังเป็น การเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์สำหรับผู้บริโภคที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีเคลือบเป็นอัตลักษณ์เฉพาะได้อย่างดี ซึ่งออกไซด์ที่มีลักษณะและสีเฉพาะที่โดดเด่นได้แก่ แมงกานีสไดออกไซด์ (Manganese dioxide) สามารถให้สีที่หลากหลาย โดยทั่วไปจะให้สี น้ำตาล หรือ สีดำ และเมื่อใส่จำนวนมากจะทำให้เคลือบมีสีน้ำตาลเข้มไปถึงสีดำเงาโลหะ (Metallic) สีที่ได้จากการใช้แมงกานีสไดออกไซด์มีความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว และมีความโดดเด่นด้านการเป็นตัวช่วยหลอมละลาย (Flux) สามารถช่วยปรับปรุง ความเงา และ ความทนทานของเคลือบเซรามิก ส่วน นิกเกิลออกไซด์ (Nickel oxide) เป็นออกไซด์ที่มีความโดดเด่นด้านการให้สีที่หลากหลายขึ้นอยู่กับส่วนผสมในเคลือบ เช่น สีเทา สีน้ำตาล สีเขียว สีเหลือง สีชมพู สีฟ้า เป็นต้น (ไพจิตร, 2546) นอกจากนี้การเติมนิกเกิลออกไซด์ในเคลือบเซรามิกส่งผลให้เคลือบมีคุณสมบัติทนต่ออุณหภูมิสูง ทำให้มันเหมาะสมกับการผลิตเซรามิกที่ต้องการความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือใช้ในกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับความร้อนสูงทำให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น (ธมลวัฒน์, 2565) ส่วนคอปเปอร์ออกไซด์ (Copper oxide) หรือทองแดง ซึ่งเป็นโลหะชนิดแรกที่มีมนุษย์รู้จักนำมาใช้เป็นเครื่องมือ จะให้สีเขียวในบรรยากาศแบบออกซิเดชัน และเป็นวัตถุดิบให้สีที่มีความเข้มสูง (ไพจิตร, 2546) คอปเปอร์ออกไซด์มักถูกใช้ในเคลือบเซรามิกเพื่อให้สีเขียวเข้มและสีน้ำตาลที่ให้ความสวยงามและลวดลายที่หลากหลายในการออกแบบ (ธมลวัฒน์, 2565) แม้การใช้ออกไซด์จะสามารถสร้างสีที่สวยงามและมีเอกลักษณ์เฉพาะตัว แต่ก็ต้องพิจารณาลักษณะผิวเคลือบที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งอาจทำให้ผิวเคลือบมีความมันแวววาวหรือกึ่งมันกึ่งด้าน ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท (สุขุมาล, 2564) และการเลือกอัตราส่วนผสมของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และ คอปเปอร์ออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติมเคลือบเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง โดยการใช้ออกไซด์ในปริมาณที่ไม่เหมาะสมอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของเคลือบ เช่น สีที่ไม่ตรงกับความต้องการหรือผิวเคลือบที่ไม่สมบูรณ์ หรืออาจทำให้เกิดฟองอากาศหรือการหลุดร่อนจากเนื้อดินปั้นได้ (ไพจิตร, 2546)



ซึ่งจากประเด็นข้างต้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปริมาณของออกไซด์ในการสร้างสีเคลือบเซรามิกส์ รวมถึงการทดสอบส่วนผสมของออกไซด์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ลักษณะผิวเคลือบที่ต้องการ ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะการพัฒนาเคลือบเซรามิกส์โดยทำการศึกษาผลของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ต่อการปรากฏสีของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการวิจัยสามารถนำไปใช้กับอุตสาหกรรมเซรามิกส์ที่ยังเตรียมเคลือบจากวัตถุดิบจากธรรมชาติโดยไม่ใช้สีสังเคราะห์และใช้เนื้อดินที่เผาในอุณหภูมิไม่เกิน 1250 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะกลุ่มผู้ผลิตที่ต้องการสร้างเคลือบผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ศิลปะให้มีอัตลักษณ์เฉพาะได้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาปริมาณของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส

2.2 เพื่อศึกษาปริมาณของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะผิวที่ปรากฏของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส

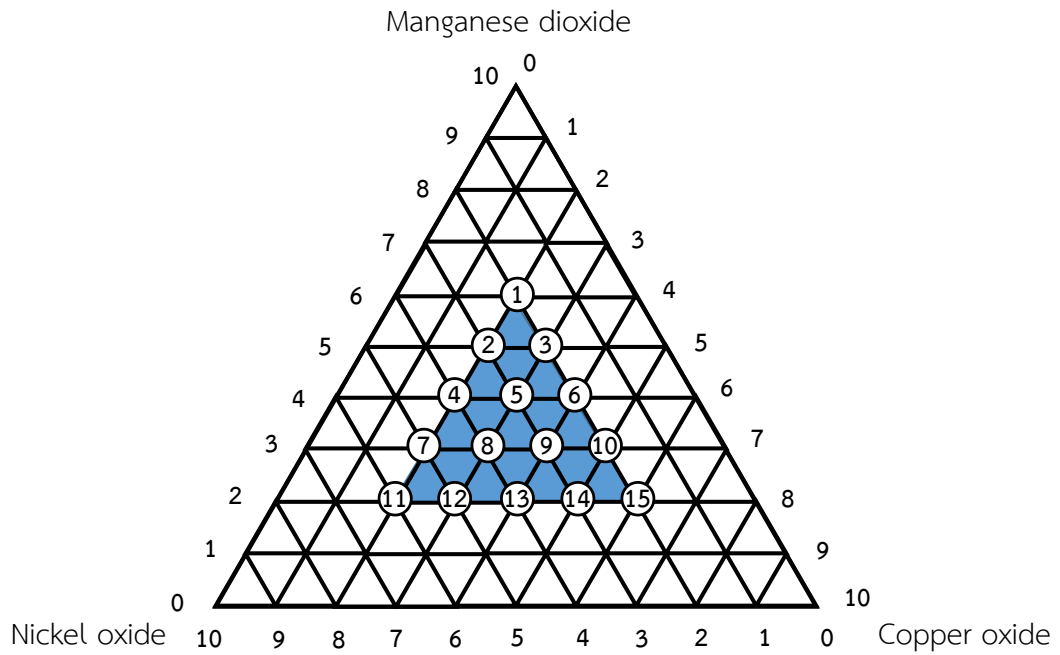
3. วิธีดำเนินการวิจัย

ผลของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ต่อการปรากฏสีของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียสในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีการดำเนินการวิจัยไว้ 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาปริมาณของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

1. กำหนดสูตรเคลือบเซรามิกส์พื้นฐานที่ใช้ในการผสม โดยผู้วิจัยเป็นผู้คิดค้นสูตรเคลือบขึ้นมีส่วนผสมดังนี้ เฟลด์สปาร์ (Potash feldspar) ร้อยละ 45 โดโลไมท์ (Dolomite) ร้อยละ 10 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) ร้อยละ 13 ดินขาว (Kaolin) ร้อยละ 7 และควอตซ์ (Quartz) ร้อยละ 25

2. กำหนดให้มีอัตราส่วนผสมของออกไซด์ ร้อยละ 10 เป็นสารเพิ่มเติมในเคลือบพื้นฐานแบ่งเป็น 1) แมงกานีสไดออกไซด์ ร้อยละ 2 ถึง ร้อยละ 6 2) นิกเกิลออกไซด์ ร้อยละ 2 ถึง ร้อยละ 6 และ 3) คอปเปอร์ออกไซด์ ร้อยละ 2 ถึง ร้อยละ 6 โดยกำหนดส่วนผสมในการทดลองแบบเจาะจง (Purposive sampling) ทั้งหมดจำนวน 15 สูตรส่วนผสม และคำนวณหาอัตราส่วนผสมจากตารางสามเหลี่ยม (Triaxial Diagram) (Singer, 1963) ดังภาพที่ 1 และสามารถอ่านค่า ได้ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 1 การกำหนดอัตราส่วนผสมจากตารางสามเหลี่ยม

ตารางที่ 1 อัตราส่วนการใช้ออกไซด์จากตารางสามเหลี่ยม (ร้อยละ)

สูตรที่	Manganese dioxide	Nickel oxide	Copper oxide
1	6	2	2
2	5	3	2
3	5	2	3
4	4	4	2
5	4	3	3
6	4	2	4
7	3	5	2
8	3	4	3
9	3	3	4
10	3	2	5
11	2	6	2
12	2	5	3
13	2	4	4
14	2	3	5
15	2	2	6

3. ชั่งส่วนผสมทั้งหมดด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัลบริษัท Mettler Toledo (0.001g) รุ่น PG203-S ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ โดยชั่งส่วนผสมเคลือบพื้นฐานส่วนผสมละ 100 กรัม และชั่งออกไซด์ตามอัตราส่วนที่ได้จากตารางคำนวณส่วนผสม และบดผสมด้วยเครื่องบดผสมความเร็วสูง (Hi-speed) ขนาดเล็ก สูตรละ 5 นาที



ภาพที่ 2 เครื่องบดผสมความเร็วสูง

4. ขึ้นรูปแผ่นทดลองสำหรับการเคลือบ (Test pieces) ขนาด 4x4 เซนติเมตร ด้วยดินสโตนแวร์สำเร็จรูปของบริษัท พอทเทอรี เคลย์จำกัด (Pottery clay) แล้วนำไปเผาดิบ (Biscuit firing) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

5. ปรับค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเคลือบอยู่ระหว่าง 1.40-1.45 และชุบเคลือบแผ่นทดลองโดยใช้เวลาในการชุบเคลือบบนแผ่นทดลอง 3 วินาที

6. เผาแผ่นทดลองที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศออกซิเดชัน (Oxidation firing) ด้วยเตาเผาชนิดไฟฟ้าบริษัท Carbolite Gero Ltd. รุ่น CWF1300 ประเทศอังกฤษ เผาขึ้นไฟเป็นเวลา 15 นาที วัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไพโรเมตริกเทอร์โมคัพเปิล (Pyrometric thermocouple) และนำแผ่นทดลองออกจากเตาเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส

7. วิเคราะห์การเกิดสีของเคลือบ ดังนี้ 1) สังกเกตสีเคลือบจากแผ่นทดลอง 2) สีเคลือบที่สแกน (Scan) ด้วยเครื่อง Colorimeter Linshang รุ่น LS171 ประเทศจีน ได้แก่ รูปแบบรหัสสีตามเฉดสีของ RAL-LS Color Chart (RAL color standard) ซึ่งเป็นระบบมาตรฐานสีที่พัฒนาโดยสถาบัน RAL (Reichsausschuss für Lieferbedingungen)



ภาพที่ 3 เตาเผาชนิดไฟฟ้า รุ่น CWF1300

8. วิเคราะห์ความสว่างและค่าสีของเคลือบด้วยเครื่อง Chroma meter รุ่น CR-400 บริษัท Konica Minolta ประเทศญี่ปุ่น ในระบบสเกลสี (Color scale) L^* , a^* , และ b^* ของ Hunter lab scale ซึ่งเป็นระบบการวิเคราะห์สีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (Lightness) จากค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว จนไปถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว ($-a^*$) ไปจนถึงแดง ($+a^*$) ส่วนแกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน ($-b^*$) ไปเหลือง ($+b^*$) (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2546) โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Chroma meter จำนวน 5 ครั้งต่อแผ่นทดลอง แล้วรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย



ภาพที่ 4 วัดค่าความสว่างและค่าสีด้วยเครื่อง Chroma meter

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาปริมาณของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะผิวที่ปรากฏของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำแผ่นทดลองที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาศึกษาวิเคราะห์ 3 ประเด็นดังนี้ 1) วิเคราะห์ลักษณะผิวเคลือบ 2) วิเคราะห์ค่าระดับความมันเงาของผิวเคลือบ และ 3) วิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบ

2. วิเคราะห์ลักษณะผิวเคลือบ โดยกำหนดลักษณะผิวเคลือบออกเป็น 4 ลักษณะ ได้แก่ 1) ผิวเคลือบมีลักษณะมันแวววาว (Bright) โดยการใช้การสังเกตที่ผิวเคลือบแวววาวสะท้อนแสงได้ดี 2) ผิวเคลือบมีลักษณะกึ่งมันกึ่งด้าน (Semi-matte) 3) ผิวเคลือบมีลักษณะด้าน (Matte) โดยการใช้การสังเกตที่ผิวเคลือบหลอมสุกตัวแล้วมีผิวด้านไม่สะท้อนแสง 4) ผิวเคลือบมีลักษณะไม่สุกตัว (Un Fused) โดยการใช้การสังเกตที่ผิวเคลือบไม่หลอมละลาย (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2547)

3. วิเคราะห์ค่าระดับความมันเงาของผิวเคลือบด้วยเครื่องวัดความเงา (Gloss Meter) รุ่น YG60S/3NH ประเทศจีน มีหน่วยวัดเป็น Gloss Unit (GU) โดยการวัดจำนวน 5 ครั้งต่อแผ่นทดลอง แล้วรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย โดยที่การวิเคราะห์ค่าความเงาเป็นการตรวจสอบคุณภาพของการเคลือบผิวในด้านการสะท้อนแสง ซึ่งเป็นการประเมินความเงาของผิวหน้าเคลือบเพื่อดูว่าผิวเคลือบมีความมันเงา ระดับใดผู้วิจัยได้ใช้เกณฑ์ มพช.930/2556 เป็นแนวทาง และดำเนินการดังนี้

3.1 เตรียมชิ้นงานที่ผ่านการเผาเคลือบให้แห้ง และทำความสะอาดผิวเคลือบให้ปราศจากฝุ่นหรือสิ่งสกปรกที่อาจรบกวนการวัด

3.2 วางเครื่องวัดความเงาบนพื้นผิวเคลือบในตำแหน่งที่ต้องการทดสอบ และวัดปริมาณแสงที่สะท้อนกลับจากพื้นผิว

3.3 บันทึกค่า Gloss (GU) ที่ได้จากเครื่องวัดในแต่ละจุดที่ทดสอบ

4. วิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบ โดยตรวจสอบผิวเคลือบด้วยการมองด้วยตาเปล่าตามเกณฑ์ มพช. 930/2556 ประกอบกับการพิจารณาตำหนิที่ผิวเคลือบโดยที่ผิวเคลือบสมบูรณ์ต้องไม่มีตำหนิ (Glaze defects) 11 ลักษณะ (ไพจิตร, 2552; ดรุณี และสุธี, 2552; สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2556) ดังตารางที่ 2

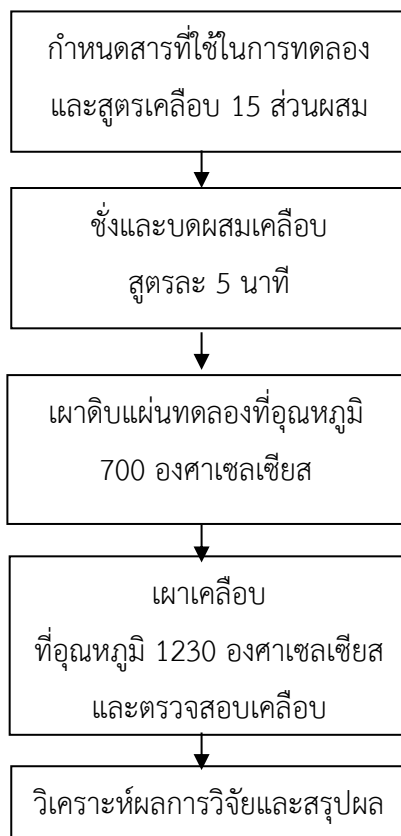
ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบ

หัวข้อตำหนิ (Glaze defects)	คำอธิบาย	การวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบตามแนว มพช.930/2556
1. รูเข็ม (Pinhole)	จะพบรูเล็กๆ หรือช่องว่างที่มองเห็นได้ชัดเจนบนผิวเคลือบ โดยอาจมีจุดหลุมขนาดเล็กกระจายทั่วผิว	ผิวเคลือบต้องไม่มีรูเข็มที่มีขนาดเกิน 0.5 มิลลิเมตร รูเข็มที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.5 มิลลิเมตร หรือมีรูเข็มมากเกินไปจะถือเป็นข้อบกพร่อง



หัวข้อตำหนิ (Glaze defects)	คำอธิบาย	การวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของ ผิวเคลือบตามแนว มพข.930/2556
2. รอยแตกร้าวที่ผิวเคลือบ (Crazing)	จะพบการแตกร้าวเล็ก ๆ บนผิวเคลือบ	ผิวเคลือบจะต้องไม่เกิดรอยแตกร้าว หรือ รอยแยก
3. การหดตัวของเคลือบ (Crawling)	จะพบเคลือบหดตัวหรือแยกหรือร่นหรือดึงตัวเป็นก้อนทำให้เกิดช่องว่าง เคลือบไม่ติดกับเนื้อดิน	เคลือบต้องไม่หดตัวหรือแยกออกจากพื้นผิวเนื้อดินปั้น
4. เคลือบไหล (Running of glaze)	จะพบผิวเคลือบที่ไหลตัวมากเกินไปไม่เกาะผิวผลิตภัณฑ์ บางครั้งอาจหรือเส้นรอยการไหล	เคลือบต้องไม่ไหลมากเกินไป
5. การแตกลึกของเคลือบ (Dunting)	จะพบรอยแตกที่ลึกและยาวบนผิวเคลือบเป็นแนวเส้นตรงเกิดรอยลึกถึงเนื้อผลิตภัณฑ์	การแตกลึกของเคลือบต้องไม่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์
6. ขอบเป็นสีดำ (Black top rim)	จะพบสีดำคล้ำในบางส่วนของเคลือบหรือเกิดขึ้นตามขอบของชิ้นงานหรือมีลักษณะเป็นเส้นๆสีดำ ที่ขอบของชิ้นงาน	ขอบของเครื่องปั้นดินเผาต้องไม่ปรากฏเป็นสีดำที่มีผลกระทบต่อความสวยงามหรือความทนทานของผลิตภัณฑ์
7. เคลือบเดือดหรือพอง (Boiling or Blistering)	จะพบเคลือบเป็นหลุมเดือดเป็นพองมีผิวขรุขระ การพองจะมีขนาดใหญ่มองเห็นได้บนผิวเคลือบ	ผิวเคลือบของเครื่องปั้นดินเผาต้องไม่เกิดการพองหรือหลุมเดือดที่มีขนาดใหญ่หรือมองเห็นได้อย่างชัดเจน
8. เคลือบเกิดสภาพขุ่น (Devitrification)	จะพบเคลือบที่ควรใสกลับเกิดการตกผลึกขุ่นเป็นฝ้าดูทึบหรือไม่เงาสดใสทำให้ไม่สามารถมองเห็นพื้นผิวของเซรามิกส์ได้อย่างชัดเจน	เคลือบต้องไม่เกิดการตกผลึกที่ทำให้เคลือบดูขุ่นหรือทึบ ซึ่งจะทำให้ผิวเคลือบไม่ใสและไม่สามารถมองเห็นพื้นผิวของเซรามิกส์ได้อย่างชัดเจน
9. การหลุดร่อนของเคลือบ (Peeling or Shivering)	จะพบเคลือบกะเทาะร่อนหรือแตกร่อนบริเวณริมขอบหรือมุมของชิ้นงานหลุดออกเป็นชิ้นๆ	ผิวเคลือบต้องไม่เกิดการหลุดร่อนหรือการแตกร่อนจากเนื้อดิน โดยเฉพาะบริเวณขอบหรือมุมของผลิตภัณฑ์
10. เกิดฟองอากาศในเคลือบ (Air Bubble)	จะพบฟองอากาศกระจายตัวในชั้นเคลือบ ซึ่งทำให้ผิวเคลือบมีลักษณะไม่เรียบ บางครั้งจะทำให้ผิวเคลือบแตกหัก	ผิวเคลือบต้องไม่เกิดฟองอากาศที่มองเห็นได้ชัดเจนหรือฟองที่ทำให้ผิวเคลือบมีลักษณะไม่เรียบและขรุขระ
11. เคลือบลักษณะของผิวส้ม (Orange peel)	มีลักษณะเป็นปุ่มหรือคลื่นนูนเล็กๆ เหมือนกับเปลือกส้ม และอาจมีจุดรูเข็มเล็กๆกระจายอยู่บนพื้นผิว	ผิวเคลือบของเครื่องปั้นดินเผาต้องมีลักษณะที่เรียบเนียนและไม่ขรุขระไม่มีมีจุดรูเข็มเล็กๆกระจายอยู่บนพื้นผิว

วิธีดำเนินการวิจัยเรื่องผลของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ ต่อการปรากฏสีของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ ดังนี้



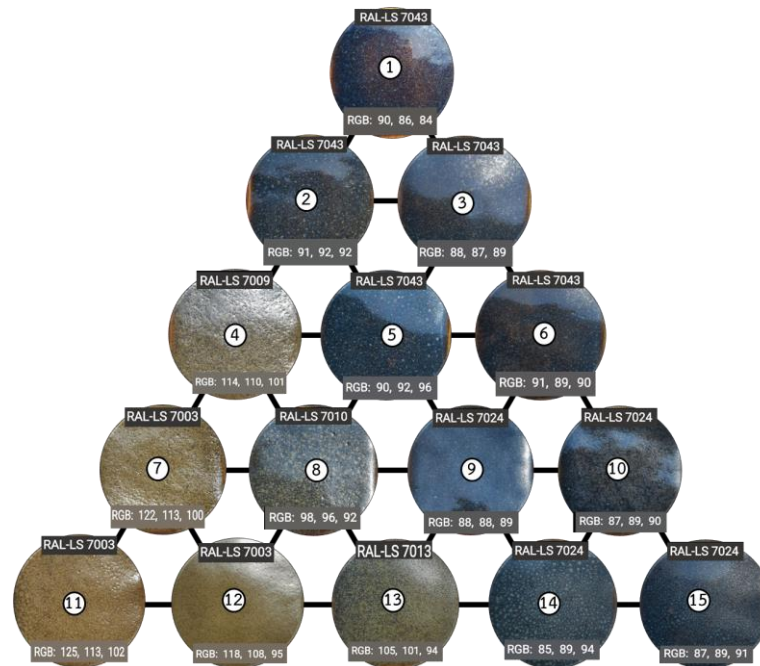
ภาพที่ 5 สรุปขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

4. ผลการวิจัย

ผลของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ต่อการปรากฏสีของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียสในครั้งนี้ ภายหลังจากการดำเนินการทดลองมีผลการวิจัยดังนี้

1. ผลการศึกษาปริมาณของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ซึ่งมีรายละเอียดผลการศึกษาวิจัย แยกเป็น 2 ข้อ ดังนี้

1.1 ผลการวิเคราะห์การเกิดสีของเคลือบเซรามิกส์ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส มีผลการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การเกิดสีของเคลือบเฟลด์สปาร์

จากภาพที่ 6 พบว่า การเกิดสีของเคลือบเฟลด์สปาร์มี 6 กลุ่มสี ดังนี้ 1) กลุ่มสี RAL-LS 7043 ได้แก่สูตรที่ 1 2 3 5 6 2) กลุ่มสี RAL-LS 7024 ได้แก่สูตรที่ 9 10 14 15 3) กลุ่มสี RAL-LS 7009 ได้แก่สูตรที่ 4 4) กลุ่มสี RAL-LS 7010 ได้แก่สูตรที่ 8 5) กลุ่มสี RAL-LS 7013 ได้แก่สูตรที่ 13 และ 6) กลุ่มสี RAL-LS 7003 ได้แก่สูตรที่ 7 11 12

1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความสว่าง และค่าสีของเคลือบภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส มีผลการทดสอบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่าความสว่าง และค่าสีของเคลือบ

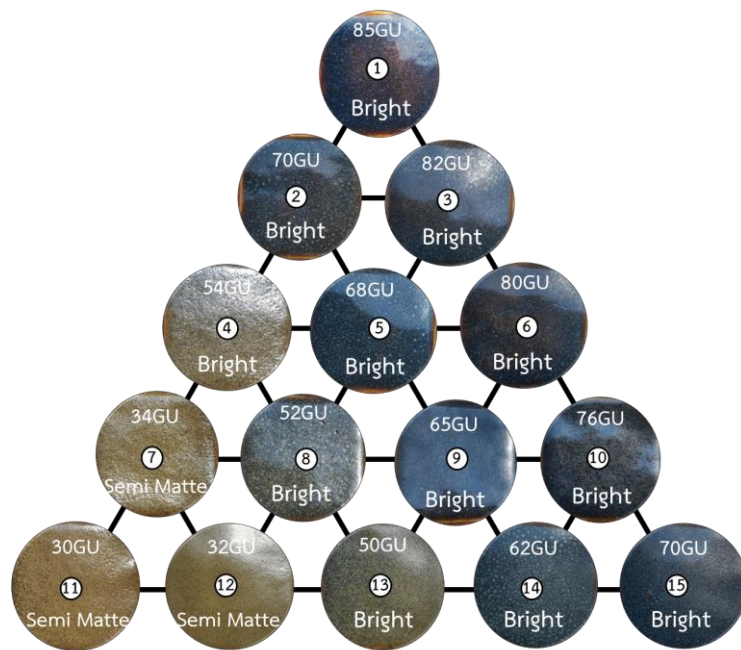
สูตรที่	L*	a*	b*
1	25.05	0.72	0.40
2	27.26	-0.15	-0.66
3	25.57	0.23	-0.85
4	35.88	-0.42	4.24
5	28.88	-0.27	-1.92
6	26.41	0.43	-1.08
7	37.01	-0.31	6.58

สูตรที่	L*	a*	b*
8	32.15	-0.64	1.88
9	25.50	-0.29	-0.61
10	25.66	-0.18	-0.70
11	37.33	0.54	6.12
12	36.65	-0.24	6.20
13	32.45	-0.64	3.11
14	27.96	-0.65	-2.26
15	25.67	-0.14	-1.31

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่าความสว่าง (L*) ค่าสี (a*) และ ค่า (b*) โดยแบ่งกลุ่มตามการเกิดสี พบว่า

- 1) กลุ่มสี RAL-LS 7043 ได้แก่สูตรที่ 1 2 3 5 6 มีค่า L* อยู่ระหว่าง 25.05 ถึง 28.88 มีค่าสี a* อยู่ระหว่าง 0.72 ถึง -1.92 ค่าสี b* อยู่ระหว่าง -8.85 ถึง
- 2) กลุ่มสี RAL-LS 7024 ได้แก่สูตรที่ 9 10 14 15 มีค่า L* อยู่ระหว่าง 25.66 ถึง 25.50 มีค่าสี a* อยู่ระหว่าง -0.14 ถึง -0.65 ค่าสี b* อยู่ระหว่าง -0.61 ถึง -2.26
- 3) กลุ่มสี RAL-LS 7009 ได้แก่สูตรที่ 4 มีค่า L* 35.88 มีค่าสี a* -0.42 และมีค่าสี b* 4.24
- 4) กลุ่มสี RAL-LS 7010 ได้แก่สูตรที่ 8 มีค่า L* 32.15 มีค่าสี a* -0.64 และมีค่าสี b* 1.88
- 5) กลุ่มสี RAL-LS 7013 ได้แก่สูตรที่ 13 มีค่า L* 32.45 มีค่าสี a* -0.64 และมีค่าสี b* 3.11
- 6) กลุ่มสี RAL-LS 7003 ได้แก่สูตรที่ 7 11 12 มีค่า L* อยู่ระหว่าง 36.65 ถึง 37.33 มีค่าสี a* อยู่ระหว่าง -0.24 ถึง 0.54 ค่าสี b* อยู่ระหว่าง 6.12 ถึง 6.58

2. ผลศึกษาปริมาณของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะผิวที่ปรากฏของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส มีผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ลักษณะผิวเคลือบ และระดับความมันเงาของผิวเคลือบ

จากภาพที่ 7 ผลการศึกษาผิวเคลือบ พบว่า 1. ลักษณะของผิวเคลือบ มี 2 ลักษณะ ดังนี้ 1) ลักษณะกึ่งมันกึ่งด้าน ได้แก่ สูตรที่ 7 11 12 และ 2) ลักษณะมันแวววาว ได้แก่ สูตรที่ 1 2 3 4 5 6 8 9 10 13 14 15 2. ผิวเคลือบมีค่าระดับความมันเงาอยู่ระหว่าง 30- 85 GU และเมื่อแบ่งตามลักษณะของเคลือบจะมีค่าความเงา แยกได้ดังนี้ 1) ลักษณะผิวเคลือบกึ่งมันกึ่งด้าน มีระดับความมันเงาอยู่ระหว่าง 30- 34 GU 2) ลักษณะผิวเคลือบมันแวววาว มีระดับความมันเงาอยู่ระหว่าง 50- 85 GU

1.3 ผลการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส โดยที่ผิวเคลือบสมบูรณ์ต้องไม่มีตำหนิ 11 ลักษณะ มีผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบภายหลังจากการเผา พบว่า ส่วนผสมที่ 4 7 8 11 และ 12 ผิวเคลือบมีลักษณะเป็นปุ่มหรือคลื่นนูนเล็กๆ มีจุดกระจายอยู่บนพื้นผิวเคลือบเหมือนกับเปลือกส้ม



ตารางที่ 4 ตารางวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบภายหลังจากการเผา

สูตรที่	รายการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบ										
	รูเพิ่ม	รอยแตกร้าวที่ผิวเคลือบ	การหลุดตัวของเคลือบ	เคลือบไหล	การแตกเล็กของเคลือบ	ขอบเป็นสีดำ	เคลือบแตกหรือพอง	เคลือบเกิดสภาพเช่น	การร่อนออกจากเนื้อดินเป็น	เกิด	พองอากาศในเคลือบลักษณะของ
1											
2											
3											
4											/
5											
6											
7											/
8											/
9											
10											
11											/
12											/
13											
14											
15											

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

อภิปรายผลการวิจัย

การวิจัยเรื่องผลของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ต่อการปรากฏสีของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียสในครั้งนี้ สามารถอภิปรายผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ผลการศึกษาปริมาณของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส อภิปรายผลการวิจัยได้ 2 หัวข้อ ดังนี้



1.1 การเกิดสีของเคลือบเฟลด์สปาร์มี 6 กลุ่มสี ดังนี้ 1) กลุ่มสี RAL-LS 7043 ได้แก่สูตรที่ 1 2 3 5 6 พบว่าในสูตรส่วนผสมมี แมงกานีสไดออกไซด์ ระหว่าง ร้อยละ 4 ถึง ร้อยละ 6 ส่งผลได้สีโทนน้ำตาลดำ 2) กลุ่มสี RAL-LS 7024 ได้แก่สูตรที่ 9 10 14 15 พบว่าในสูตรส่วนผสมมี คอปเปอร์ออกไซด์ ระหว่าง ร้อยละ 4 ถึง ร้อยละ 6 ส่งผลให้ได้สีโทนน้ำตาลดำ 3) กลุ่มสี RAL-LS 7009 ได้แก่สูตรที่ 4 พบว่าในสูตรส่วนผสมมี แมงกานีสไดออกไซด์ และ นิกเกิลออกไซด์ ร้อยละ 4 ส่งผลได้สีโทนน้ำตาลเข้ม 4) กลุ่มสี RAL-LS 7010 ได้แก่สูตรที่ 8 พบว่าในสูตรส่วนผสมมี นิกเกิลออกไซด์ ร้อยละ 4 ส่งผลได้สีโทนน้ำตาลเข้ม 5) กลุ่มสี RAL-LS 7013 ได้แก่สูตรที่ 13 พบว่าในสูตรส่วนผสมมี นิกเกิลออกไซด์ และ คอปเปอร์ออกไซด์ ร้อยละ 4 ส่งผลได้สีโทนน้ำตาลเข้ม และ 6) กลุ่มสี RAL-LS 7003 ซึ่งเป็นโทนสีน้ำตาล ได้แก่สูตรที่ 7 11 12 พบว่าในสูตรส่วนผสมมี นิกเกิลออกไซด์ ร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 6 ส่งผลได้สีโทนน้ำตาลเข้มอมน้ำเงิน

ซึ่งผลการเกิดสีของส่วนผสมทั้งหมดอยู่ในโทนสีน้ำตาล สีน้ำตาลเข้ม และสีน้ำตาลดำ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ธมลวัฒน์ หิรัญชาติอนันต์ (2565) , ไพจิตร อังศิริวัฒน์ (2546) ที่กล่าวว่า การเติมแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์ ในสูตรเคลือบจะให้สีน้ำตาล หรือน้ำตาลเข้มไปจนน้ำตาลดำ

1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความสว่างและค่าสีของเคลือบ โดยที่ ค่า L^* เป็นไปตามปริมาณการใช้ ออกไซด์ ร้อยละ 10 เป็นสารเพิ่มเติมในเคลือบพื้นฐาน ส่งผลต่อความสว่าง ค่า L^* อยู่ระหว่าง 25.05 ถึง 37.33 และค่าสี a^* อยู่ระหว่าง -0.65 ถึง 0.54 ค่าสี b^* อยู่ระหว่าง -2.26 ถึง 6.58 เป็นไปตามสัดส่วนผสมที่ได้จากตารางสามเหลี่ยมโดยใช้ ออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติม ระหว่างร้อยละ 2 ถึง ร้อยละ 6 ทำให้ค่าสีมีความแตกต่างกัน

2. ผลการศึกษาปริมาณของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะผิวที่ปรากฏของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส อภิปรายผลการวิจัยได้ดังนี้

2.1 ลักษณะของผิวเคลือบ มี 2 ลักษณะ ดังนี้ 1) ลักษณะกึ่งมันกึ่งด้าน ได้แก่ สูตรที่ 7 11 12 และ 2) ลักษณะมันแวววาว ได้แก่ สูตรที่ 1 2 3 4 5 6 8 9 10 13 14 15

2.2 ผิวเคลือบมีค่าระดับความมันเงาอยู่ระหว่าง 30- 85 GU และเมื่อแบ่งตามลักษณะของเคลือบจะมีค่าความเงา แยกได้ดังนี้ 1) เคลือบกึ่งมันกึ่งด้าน มีระดับความมันเงาอยู่ระหว่าง 30- 34 GU 2) เคลือบมันแวววาว มีระดับความมันเงาอยู่ระหว่าง 50- 85 GU ซึ่งพบว่า สูตรที่มีระดับความมันเงาสูงสุดคือสูตรที่ 1 ซึ่งมี แมงกานีสไดออกไซด์ ในส่วนผสมร้อยละ 6 ซึ่งสอดคล้องกับไพจิตร อังศิริวัฒน์ (2546) ที่กล่าวว่า แมงกานีสไดออกไซด์ มีความโดดเด่นด้านการเป็นตัวช่วยหลอมละลาย (Flux) ทำให้เคลือบหลอมละลายในอุณหภูมิที่ต่ำลง แต่หากใส่จำนวนมากจะทำให้เคลือบมีสีน้ำตาลเข้มไปถึงสีดำเงาโลหะ (Metallic) และสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศิริมา เอมวงษ์ (2557) ที่พบว่า



สาเหตุที่เคลือบมีความมันวาวนั้นเพราะมีส่วนประกอบของวัตถุดิบกลุ่มต่างปริมาณมาก โดยในสูตรเคลือบพื้นฐานจะมีปริมาณกลุ่มต่างรวม ร้อยละ 68 แบ่งเป็น เฟลด์สปาร์ ร้อยละ 45 โดโลไมท์ ร้อยละ 10 และ แคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 13 สอดคล้องกับงานวิจัยของ ปราโมทย์ ปิ่นสกุล (2552) ที่พบว่าเคลือบที่มีการหลอมตัวสมบูรณ์มีความใสมันวาวผิวเคลือบสม่ำเสมอเนื่องจากใช้ เฟลด์สปาร์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยให้เคลือบหลอมตัวได้ดี และสอดคล้องกับงานวิจัยของ พรชัย ปานทุ่ง (2558) ที่พบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการทำเคลือบเซรามิกส์จะมีเฟลด์สปาร์อยู่ในช่วง ร้อยละ 40-80 สอดคล้องกับงานวิจัยของ ภารดี พันธุ์ภากร และ เสกสรรค์ ตันยาภิรมย์ (2542) ที่พบว่า กลุ่มเคลือบที่ใช้ทองแดงออกไซด์ เป็นสารให้สีในสูตรเคลือบ ร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 5 เคลือบจะมีความมันวาว

2.3 ผลการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบหลังจากการเผา พบว่า ส่วนผสมที่ 4 7 8 11 และ 12 ผิวเคลือบมีลักษณะเป็นปุ่มหรือคลื่นนูนเล็กๆ มีจุดกระจายอยู่บนพื้นผิวเคลือบเหมือนกับเปลือกส้ม ซึ่งพบว่ามีส่วนผสมของนิกเกิลออกไซด์ในสูตรเคลือบจำนวนมาก ร้อยละ 4 ถึง ร้อยละ 6 อาจทำให้เคลือบมีความหนืดสูงหรือมีความไม่สมดุลในการละลายของเคลือบ ซึ่งทำให้เกิดการระจุตัวหรือไม่สามารถไหลตัวได้ดีบนพื้นผิว ส่งผลให้เกิดลักษณะผิวที่มีปุ่มหรือคลื่นนูนคล้ายผิวเปลือกส้ม สอดคล้องกับงานวิจัยของ ธมลวัฒน์ ธีรญาตดิอนันต์ (2565) ที่พบว่า การเติมนิกเกิลออกไซด์ในเคลือบเซรามิกส์ส่งผลให้เคลือบมีคุณสมบัติทนต่ออุณหภูมิสูง

สรุปผลการวิจัย

ผลของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ต่อการปรากฏสีของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการศึกษาปริมาณของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเฟลด์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส

1.1 ผลการศึกษาการเกิดสีของเคลือบ ทดสอบความสว่างและค่าสีของเคลือบ สามารถสรุปผลการวิจัย ได้ดังนี้ การเกิดสีของเคลือบเฟลด์สปาร์มี 6 กลุ่มสี ดังนี้ 1) กลุ่มสี RAL-LS 7043 ได้แก่สูตรที่ 1 2 3 5 6 2) กลุ่มสี RAL-LS 7024 ได้แก่สูตรที่ 9 10 14 15 3) กลุ่มสี RAL-LS 7009 ได้แก่สูตรที่ 4 4) กลุ่มสี RAL-LS 7010 ได้แก่สูตรที่ 8 5) กลุ่มสี RAL-LS 7013 ได้แก่สูตรที่ 13 และ 6) กลุ่มสี RAL-LS 7003 ได้แก่สูตรที่ 7 11 12

1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความสว่างและค่าสีของเคลือบ สามารถสรุปผลการวิจัย ได้ดังนี้ ค่า L^* อยู่ระหว่าง 25.05 ถึง 37.33 มีค่าสี a^* อยู่ระหว่าง -0.65 ถึง 0.54 ค่าสี b^* อยู่ระหว่าง -2.26 ถึง 6.58



2. ผลการศึกษาปริมาณของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะผิวที่ปรากฏของเคลือบเพลตส์สปาร์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส สามารถสรุปผลการวิจัย ได้ดังนี้ 1. ลักษณะของผิวเคลือบ มี 2 ลักษณะ ดังนี้ 1) ลักษณะกึ่งมันกึ่งด้าน ได้แก่ สูตรที่ 7 11 12 และ 2) ลักษณะมันแวววาว ได้แก่ สูตรที่ 1 2 3 4 5 6 8 9 10 13 14 15 2. ผิวเคลือบมีค่าระดับความมันเงาอยู่ระหว่าง 30- 85 GU และเมื่อแบ่งตามลักษณะของเคลือบจะมีค่าความเงาแยกได้ดังนี้ 1) เคลือบกึ่งมันกึ่งด้าน มีระดับความมันเงาอยู่ระหว่าง 30- 34 GU 2) เคลือบมันแวววาว มีระดับความมันเงาอยู่ระหว่าง 50- 85 GU และ 3. ผลการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบ ภายหลังจากการเผา พบว่า ส่วนผสมที่ 4 7 8 11 และ 12 ผิวเคลือบมีลักษณะเป็นปุ่มหรือคลื่นนูนเล็กๆ มีจุดกระจายอยู่บนพื้นผิวเคลือบเหมือนกับเปลือกส้ม

โดยสรุปผลการวิจัย พบว่า เคลือบเพลตส์สปาร์ที่มีส่วนผสมของแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ และทำการเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศแบบออกซิเดชัน แล้วเคลือบมีความเหมาะสม คือ ลักษณะผิวเคลือบมีความมันแวววาว และสมบูรณ์ไม่พบตำหนิ ประกอบด้วยวัตถุดิบดังต่อไปนี้ เพลตส์สปาร์ ร้อยละ 45 โดโลไมท์ ร้อยละ 10 แคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 13 ดินขาว ร้อยละ 7 และควอตซ์ ร้อยละ 25 และสามารถใช้ออกไซด์ ได้ดังนี้ 1) แมงกานีสไดออกไซด์ ร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 6 2) นิกเกิลออกไซด์ ร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 3 และ 3) คอปเปอร์ออกไซด์ ร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 6

จากผลการวิจัยสามารถสรุปประเด็นใหม่ที่ค้นพบในงานวิจัยที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ ต่อ ยอดในอนาคตได้ ได้ดังนี้

1. ด้านความสัมพันธ์ระหว่างออกไซด์กับกลุ่มสี มีข้อค้นพบว่าการผสมแมงกานีสไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ ส่งผลให้เคลือบเพลตส์สปาร์แบ่งออกเป็น 6 กลุ่มสี RAL-LS ซึ่งสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับออกแบบเฉดสีในอุตสาหกรรมเซรามิกส์และงานศิลปะ
2. ด้านคุณสมบัติเคลือบด้านความสว่างและค่าสี มีข้อค้นพบว่า ค่าความสว่าง (L^*) และค่าสี a^* , b^* แสดงถึงเฉดสีที่เหมาะสมต่อการสร้างผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่มีเอกลักษณ์เฉพาะได้
3. ด้านลักษณะผิว มีข้อค้นพบว่าผิวเคลือบแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ กึ่งมันกึ่งด้าน (Gloss 30-34 GU) และมันแวววาว (Gloss 50-85 GU) สามารถนำไปปรับให้เหมาะสมกับการใช้งานที่หลากหลาย เช่น กระจก เบื้อง ตกแต่งผนัง หรือเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร
4. ด้านการศึกษาต่อยอดและการพัฒนาวัสดุทดแทน ผลวิจัยนี้สามารถต่อยอดในการพัฒนาเคลือบสำหรับอุณหภูมิเผาต่ำหรือการใช้ของเสียจากอุตสาหกรรม เช่น การผลิตผงสี หรือหมึกพิมพ์

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีและนวัตกรรมเซรามิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย ซึ่งทำให้การดำเนินการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณ มา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- ดรุณี วัฒนศิริเวช, และสุธี วัฒนศิริเวช. (2552). การวิเคราะห์แร่ดินเคลือบและตำหนิในผลิตภัณฑ์เซรามิก. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธมลวัฒน์ หิรัญชาติอนันต์. (2565). การพัฒนาสูตรเคลือบดอกซากุระโดยใช้นิเกิลออกไซด์เป็นสารให้สี. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ, 2(2), 23-31. สืบค้นจาก <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/STJS/article/view/254466>
- ปราโมทย์ ปิ่นสกุล. (2552). การทำน้ำเคลือบเซรามิกส์จากเศษผงปูนปลาสเตอร์. วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์, 4(1), 63-71.
- พรชัย ปานทุ่ง. (2558). การพัฒนาน้ำเคลือบเซรามิกส์จากเนื้อดินพื้นบ้าน. วารสารวิจัยสหวิทยาการไทย, 10(3), 38-44. สืบค้นจาก <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/jtir/article/view/45040>
- ไพจิตร อิงศิริวัฒน์. (2546). สีเซรามิกส์. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ไพจิตร อิงศิริวัฒน์. (2547). รวมสูตรเคลือบเซรามิกส์ (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ไพจิตร อิงศิริวัฒน์. (2552). ตำหนิเซรามิกและแนวทางแก้ไข. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ภรดี พันธุ์ภากร, และเสกสรรค์ ตันยาภิรมย์. (2542). เคลือบเซรามิกส์จากเปลือกหอยนางรม. (รายงานการวิจัย). ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ศิริมา เอมวงษ์. (2557). การพัฒนาเคลือบโครมทินเรด อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, 7(1), 52-57. สืบค้นจาก <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/itech/issue/view/3207>
- สุขุมาล สารเกษตริณ. (2564). เครื่องปั้นดินเผาการออกแบบและปฏิบัติงาน. กรุงเทพฯ: 50 Press Printing.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556). เครื่องปั้นดินเผาโตนแวร์ (มผช. 930/2556). สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- Singer S.S. (1963). **Industrial ceramics**. London: Chapman and Hall Ltd.



การประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ
ในการบำรุงรักษาเครื่องจักรเพื่อการผลิตหินเจียร
APPLICATION OF FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA)
ON MACHINE MAINTENANCE FOR GRINDING STONE PRODUCTION

ฤดี นียมรัตน์*, เบนจลักษ์ณ์ เมืองมีศรี, ไสว ศิริทองถาวร, สมเกียรติ กอบัวแก้ว,
พงศรัระพี แก้วไพโรษะ, ภูภัส ปภากันณภานุมิษฐ์

Ruede Niyomrath*, Benchalak Muangmeesri, Sawai Siritongthaworn,
Somkiat Korbuakaew, Pongrapee Kaewsaiha, Phuphat Prapanapapome
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เขตดุสิต กรุงเทพฯ 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 8 เมษายน 2567

วันที่แก้ไขบทความ 3 กันยายน 2567

วันที่ตอบรับบทความ 3 กันยายน 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบของเครื่องจักรที่มีต่อกระบวนการผลิตหินเจียร ทำแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องจักรเพื่อการผลิตหินเจียรของบริษัท มิตรชัยไกรนั้ดิ่ง เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการค้นหาปัญหาและสาเหตุของการหยุดการทำงานของเครื่องบิ้อัดตามปัจจัยการผลิต 5 ด้าน (4M1E) หลังจากนั้นหาค่าความเสี่ยงของประเด็นความบกพร่องที่มาจากปัจจัยด้านเครื่องจักรโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ นำผลการวิเคราะห์มาวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ทดลองปฏิบัติตามแผน และวัดผลการทำงานของเครื่องจักร ผลการวิจัยพบว่า เครื่องจักรหยุดทำงานมาจากสาเหตุที่เป็นข้อบกพร่องจำนวน 14 ประเด็น ที่มีค่าความเสี่ยง 16-392 คะแนน นำทุกประเด็นมาใช้วางแผนการบำรุงรักษาเครื่องบิ้อัดที่ครอบคลุม 3 รอบเวลาและ 4 กิจกรรม ได้แก่ การบำรุงรักษาประจำวันด้วยการทำความสะอาดและการตรวจสอบ การบำรุงรักษาประจำสัปดาห์ ได้แก่ การหล่อลื่น และการบำรุงรักษาประจำปี ได้แก่ การเปลี่ยนอะไหล่ ภายหลังจากใช้แผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรพบว่า เครื่องบิ้อัดมีประสิทธิภาพการบำรุงรักษาดีขึ้น ได้แก่ เวลาของเครื่องจักรต่อเนื่องเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 29.25 เวลาหยุดซ่อมเฉลี่ยลดลงร้อยละ 67.86 อัตราการเสียลดลงร้อยละ 0.0034 และอัตราการใช้งานเครื่องจักรเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.5 รวมทั้งเครื่องบิ้อัดมีค่าประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักรเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.11 ที่มาจากการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราการเดินเครื่องร้อยละ 0.52 ค่าประสิทธิภาพการเดินเครื่องเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.33

และค่าอัตราคุณภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.28 ทั้งนี้ผลของการบำรุงรักษาเครื่องจักรแบบมีแผนช่วยให้บริษัทลดเวลาและค่าใช้จ่ายเพื่อการบำรุงรักษาเครื่องจักร เป็นการเพิ่มผลผลิตโดยสามารถผลิตสินค้าที่ดีด้วยเวลาและจำนวนตามที่กำหนด

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ, แผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน, ประสิทธิภาพของเครื่องจักร, ประสิทธิภาพผลของเครื่องจักร, การผลิตหินเจียร

Abstract

This research aims to analyze machine failures and their effects on the grinding wheel production process, to develop a preventive maintenance plan, and to compare the efficiency and effectiveness of grinding wheel production machines at Mitsui Grinding Technology (Thailand) Co., Ltd. The research was conducted by identifying problems and causes of compressor stoppages based on five production factors (4M1E). Using the failure mode and effects analysis (FMEA) technique, the risk value of failures related to machine factors was assessed. This analysis led to the development of a preventive maintenance plan, experiments relevant to the plan, and measurements of machine performance. The analysis of the causes of machine stoppages, failures, and their effects identified 14 issues, resulting in a comprehensive maintenance plan for the compressor. This plan includes three cycles and four activities: daily maintenance involving cleaning and inspection, weekly maintenance involving lubrication, and annual maintenance involving the replacement of spare parts. Implementing the maintenance plan improved the maintenance efficiency of the compactor machine. Key performance indicators showed an increase in mean time between failures (MTBF), a decrease in mean time to repair (MTTR), a reduction in the failure rate (FR), and an increase in the inherent availability (AI). Additionally, the overall equipment effectiveness (OEE) of the compactor machine improved due to increases in availability rate (A), performance efficiency (P), and quality rate (Q).

Keywords: Failure mode and effect analysis, Preventive maintenance plan, Machine efficiency, Machine effectiveness, Grinding stone production



1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตทุกองค์กรต้องมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการของตลาด มีการลงทุนเพิ่มมากขึ้นโดยนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาใช้ในการกระบวนการผลิต และมีการจัดการทางด้านการบริหารและทางวิศวกรรมเพื่อลดต้นทุนและลดของเสีย เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและตอบสนองความต้องการของลูกค้า ซึ่งเครื่องจักร (Machine) เครื่องมือ (Tools) และอุปกรณ์ (Equipment) เป็นหนึ่งในทรัพยากรที่จำเป็นเพื่อการดำเนินงานทุกประเภทธุรกิจ โดยเฉพาะเครื่องจักรมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตที่ช่วยให้การผลิตเป็นไปได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ช่วยลดจำนวนพนักงาน รวมทั้งช่วยให้ประสิทธิภาพและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้เพื่อให้เครื่องจักรพร้อมต่อการใช้งาน การบำรุงรักษาเครื่องจักรจึงเป็นสิ่งจำเป็น หากเครื่องจักรเกิดการขัดข้อง ทำงานไม่เต็มสมรรถนะ หรือหยุดเหนือการคาดการณ์ (Breakdown) ย่อมส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต การส่งมอบที่ล่าช้า และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รวมไปถึงความเชื่อมั่นที่มีต่อองค์กร

บริษัท มิตรชัยไกรนดิ้ง เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรมอมตะซิตี้ ชลบุรี จังหวัดชลบุรี เป็นบริษัทที่ผลิตหินเจียรอุตสาหกรรมมา 30 ปี (ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2538) มีกำลังการผลิต 250 ตันต่อเดือน สินค้าส่งออกไปหลายประเทศ เช่น ญี่ปุ่น เวียดนาม จีน มาเลเซีย เป็นต้น การผลิตหินเจียรของบริษัทมีเครื่องจักรจำนวน 121 เครื่องแบ่งเป็น 8 กลุ่ม ตามกิจกรรมการผลิต ได้แก่ เครื่องผสม เครื่องบด เต้าเผา เต้าอบ เต้าอบไฟฟ้า เครื่องตักแต่ง เครื่องวัดขนาด และเครื่องตรวจสอบ (บริษัท มิตรชัยไกรนดิ้ง เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด, 2566) โดยพบว่า เครื่องจักรกลุ่มที่ 2 เครื่องบด มีการหยุดและใช้เวลาเพื่อการซ่อมบำรุงสูงกว่าเป้าหมายจำนวน 9 เดือนจาก 12 เดือน (เดือนเมษายน พ.ศ. 2565-เดือนมีนาคม พ.ศ. 2566) ใช้เวลามากที่สุดสำหรับการซ่อมบำรุงครั้งละไม่เกิน 3 นาที (พนักงานประจำเครื่องสามารถปรับปรุงแก้ไขได้เอง) คือจำนวน 88 ครั้ง หรือคิดเป็นร้อยละ 91.67 เครื่องบดมีจำนวน 12 เครื่อง ที่มีการหยุด 96 ครั้ง เวลาหยุดซ่อม 165 ชั่วโมง 30 นาที และเครื่องรหัส P1000 มีจำนวนการเสีย 30 ครั้ง หรือคิดเป็นร้อยละ 31.25 ของกลุ่มเครื่องบด โดยมีเวลาหยุด 47 ชั่วโมง 45 นาทีหรือ 2,865 นาที คิดเป็นร้อยละ 28.85 ของเวลาหยุดรวมทั้งหมด จึงเลือกเครื่อง P1000 เป็นกรณีศึกษาเพื่อการบำรุงรักษาเครื่องจักร

การบำรุงรักษาเครื่องจักร (Machine maintenance) เป็นการรักษาสภาพของเครื่องจักรและอุปกรณ์ให้พร้อมใช้งานอยู่ตลอดเวลา ซึ่งการบำรุงรักษาช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องจักรและเพิ่มผลผลิต การบำรุงรักษาเครื่องจักรของสถานประกอบการส่วนมากเป็นการบำรุงรักษาแบบมีแผน (Planned maintenance) เพื่อให้สามารถแก้ปัญหาที่สาเหตุที่แท้จริง และป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาซ้ำ ด้วยการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ปัญหาการทำงานของเครื่องจักร ก่อนค้นหาสาเหตุที่แท้จริง (Root cause analysis, RCA) เพื่อวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรต่อไป ซึ่งเทคนิคการ

วิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure mode and effect analysis, FMEA) เป็นเทคนิคหนึ่ง ที่นิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์ค้นหาสาเหตุของปัญหา ประเมินโอกาสและผลกระทบ หรือความเสี่ยงที่ อาจเกิดขึ้นจากการเกิดปัญหานั้นๆ สามารถวางแผนการป้องกันและแก้ไขปัญหาได้อย่างเหมาะสม ตามสภาพและสถานการณ์

การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ เป็นการประเมินสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายหรือ เรียกว่า “ลักษณะของความเสียหาย (Failure mode)” และพิจารณาผลกระทบของความเสียหาย (Effect of failure mode) มีการประเมินค่าลำดับความสำคัญของความเสี่ยง (Risk priority number, RPN) ที่เกิดจากผลลัพธ์ของค่าความรุนแรง (Severity) โอกาสในการเกิดความบกพร่อง (Occurrence) และการตรวจหาความบกพร่อง (Detection) การประเมินความเสี่ยงนี้ช่วยจัดลำดับ ความเสี่ยงก่อนวางแผนเพื่อบำรุงรักษาเครื่องจักรต่อไป เทคนิค FMEA จึงเป็นเครื่องมือในการ บริหารงานเพื่อพัฒนาระบบการผลิตที่เน้นการป้องกันการเกิดข้อบกพร่องต่างๆ ลดความสูญเสียที่ เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต และตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า

การประยุกต์ใช้เทคนิค FMEA เพื่อวิเคราะห์หาแนวทางแก้ไขปัญหานำมาใช้ในการปรับปรุง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์และวิธีการผลิตที่แตกต่างหลากหลาย ดังเช่น กระบวนการผลิตเครื่องตีผสมปูนไฟเบอร์ (เสขสัน และคณะ, 2563) กระบวนการขึ้นรูปแม่พิมพ์ขวด พลาสติก (โคจรินทร์ และคณะ, 2564) ลดของเสียในกระบวนการผลิตเสาไฟฟ้า (กิตติชัย และคณะ, 2565) และเพิ่มอัตราคุณภาพสินค้าดีของกระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ (เกวลี และจิรพัฒน์, 2565) เป็นต้น

สำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิค FMEA ในกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษา เครื่องจักร พบว่า มีการใช้เทคนิค FMEA เพื่อระบุแนวทางการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของเครื่องเกี่ยว นวดข้าว (ระพี และคณะ, 2563) รวมทั้งใช้พัฒนาระบบการบำรุงรักษาโรงงานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ คอนกรีต (รัฐวุฒิ, 2566) นอกจากนี้ยังพบว่ามีการใช้เทคนิค FMEA เป็นเครื่องมือเพื่อการวิเคราะห์ และจัดการความเสี่ยงขององค์กร เช่น วิเคราะห์ระบบยาแผนกผู้ป่วยในโรงพยาบาล (พรณวิภา, 2565) และการวิเคราะห์ความเสี่ยงระดับปฏิบัติการของโรงงานผลิตถุงพลาสติก (รัชฎาภรณ์ และ ประจวบ, 2565) เป็นต้น

การประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการบำรุงรักษาเครื่องจักรเพื่อ การผลิตหินเจียร มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบของเครื่องจักรที่มีต่อ กระบวนการผลิต นำผลการวิเคราะห์มาพิจารณาเพื่อทำแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันเครื่องจักร วัด ประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องจักรเพื่อการผลิตหินเจียรของบริษัท มิตรชัยไกรน์ตั้ง เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ทั้งนี้ผลของการวิจัยจะช่วยลดอัตราการหยุดการทำงานของ

เครื่องจักรและทำให้เครื่องจักรใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง เครื่องจักรมีประสิทธิภาพ (Efficiency) และ ประสิทธิภาพ (Effectiveness)

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบของเครื่องจักรที่มีต่อกระบวนการผลิตหินเจียร
- 2.2 เพื่อทำแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันเครื่องจักรเพื่อการผลิตหินเจียร
- 2.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องจักรสำหรับการผลิตหินเจียร

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 เก็บรวบรวมข้อมูลสภาพการทำงานของเครื่องจักร โดยให้พนักงานประจำเครื่องบันทึก เวลาเดินเครื่อง จำนวนครั้งที่หยุดซ่อม เวลาที่เครื่องจักรหยุดทำงาน อาการและสาเหตุของการหยุดทำงาน ชั่งงานเสีย ชั่งงานดี โดยใช้ใบตรวจสอบ (Check sheet) เป็นระยะเวลา 1 เดือน

3.2 วิเคราะห์ข้อมูลสภาพการทำงานของเครื่องจักรดังนี้

3.2.1 วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาการหยุดทำงานของเครื่องจักรด้วยการระดมสมองกับ หัวหน้าช่างฝ่ายซ่อมบำรุง และพนักงานประจำเครื่องบีบอัดในฝ่ายการผลิต รวมจำนวน 13 คน ตาม ปัจจัยการผลิต 4M1E ซึ่งประกอบด้วย (1) Man (พนักงาน) (2) Machine (เครื่องจักร) (3) Material (วัสดุ) (4) Method (วิธีการทำงาน) และ (5) Environment (สิ่งแวดล้อม)

3.2.2 คำนวณค่าประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องจักร ได้แก่ ค่าเวลาของเครื่องจักร ต่อเนื่องเฉลี่ย (Mean Time Between Failures, MTBF) เวลาหยุดซ่อมเฉลี่ย (Mean Time To Repair, MTTR) อัตราการเสีย (Failure Rate, FR) และอัตราการใช้งานของเครื่องจักร (Inherent Availability, AI) โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$MTBF = \text{เวลาของเครื่องจักรต่อเนื่อง} / \text{จำนวนครั้งที่หยุดซ่อม} \quad (1)$$

$$MTTR = \text{เวลาที่เครื่องจักรหยุดซ่อม} / \text{จำนวนครั้งที่หยุดซ่อม} \quad (2)$$

$$FR = (1/MTBF) \times 100 \quad (3)$$

$$AI = (MTBF / (MTBF + MTTR)) \times 100 \quad (4)$$

3.2.3 คำนวณค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร (Overall Equipment Effectiveness, OEE) ที่ประกอบด้วย ค่าอัตราการเดินทางเครื่อง (Availability, A) ประสิทธิภาพการเดินทางเครื่อง (Performance efficiency, P) และอัตราคุณภาพ (Quality rate, Q) โดยใช้สมการดังต่อไปนี้



$$OEE = APQ \quad (5)$$

$$A = (\text{เวลาเดินเครื่อง} / \text{เวลารับภาระงาน}) \times 100 \quad (6)$$

$$P = ((\text{เวลามาตรฐาน} \times \text{จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้}) / \text{เวลาเดินเครื่อง}) \times 100 \quad (7)$$

$$Q = ((\text{จำนวนชิ้นงานทั้งหมด} - \text{จำนวนชิ้นงานเสีย}) / \text{จำนวนชิ้นงานทั้งหมด}) \times 100 \quad (8)$$

3.3 วิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบด้วยกระบวนการมีส่วนร่วมกับหัวหน้าช่างในฝ่ายซ่อมบำรุง และพนักงานประจำเครื่องในฝ่ายการผลิต ตามขั้นตอนดังนี้

3.3.1 รวบรวมข้อมูลลักษณะข้อบกพร่องในกระบวนการทำงานจากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาในส่วนของปัจจัยด้านเครื่องจักร

3.3.2 ประเมินความรุนแรงที่เกิดจากข้อบกพร่อง (Severity, S) โดยใช้เกณฑ์การประเมินความรุนแรงที่เกิดจากข้อบกพร่อง ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์การประเมินความรุนแรงที่เกิดจากข้อบกพร่อง

ผลกระทบ	ความรุนแรงของผลกระทบ	ระดับ
อันตรายที่เกิดขึ้นโดยปราศจากการเตือน	เมื่อข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกระทบกับความปลอดภัยของพนักงาน โดยไม่มีการเตือน	10
อันตรายที่เกิดขึ้นโดยมีการเตือน	เมื่อข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกระทบกับความปลอดภัยของพนักงาน โดยมีการเตือน	9
สูงมาก	ส่วนสำคัญที่สุดของเครื่องจักรไม่สามารถทำงานได้	8
สูง	เครื่องจักรทำงานได้ แต่ผลงานลดลงมาก	7
ปานกลาง	เครื่องจักรทำงานได้ แต่ผลงานลดลงปานกลาง	6
ต่ำ	เครื่องจักรทำงานได้ แต่ผลงานลดลงเล็กน้อย	5
ต่ำมาก	เครื่องจักรทำงานได้ แต่ส่วนมากพบปัญหาที่ลูกค้า	4
กระทบทางอ้อม	เครื่องจักรทำงานได้ แต่ส่วนมากพบปัญหาที่ลูกค้าปานกลาง	3
กระทบทางอ้อมมาก	เครื่องจักรทำงานได้ และไม่พบปัญหาที่ลูกค้าร้องเรียน	2
ไม่มีผลกระทบ	เกือบไม่มีผลกระทบ	1

ที่มา: ปรับปรุงจาก Namhata *et al.* (2021); Hartwell (2022)

3.3.3 ประเมินโอกาสของการเกิดข้อบกพร่อง (Occurrence, O) โดยใช้เกณฑ์การประเมินโอกาสของการเกิดข้อบกพร่อง ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์การประเมินโอกาสของการเกิดข้อบกพร่อง

ความน่าจะเป็นของการเกิด	โอกาสการเกิด	ระดับ
สูงมาก: ข้อบกพร่องเกิดขึ้นแน่นอน	เกิดข้อบกพร่องมากกว่า 2 ครั้งใน 1 วัน	10
	เกิดข้อบกพร่อง 1 ครั้งใน 1 วัน	9
สูง: ข้อบกพร่องเกิดขึ้นบ่อย	เกิดข้อบกพร่องอย่างน้อย 2 ครั้งใน 1 สัปดาห์	8
	เกิดข้อบกพร่อง 1 ครั้งใน 1 สัปดาห์	7
ปานกลาง: ข้อบกพร่องเกิดขึ้นบางครั้ง	เกิดข้อบกพร่องอย่างน้อย 2 ครั้งใน 2 สัปดาห์	6
	เกิดข้อบกพร่อง 1 ครั้งใน 2 สัปดาห์	5
ต่ำ: ข้อบกพร่องเกิดขึ้นน้อย	เกิดข้อบกพร่องอย่างน้อย 2 ครั้งใน 1 เดือน	4
	เกิดข้อบกพร่อง 1 ครั้งใน 1 เดือน	3
แทบไม่เกิด: ข้อบกพร่องไม่น่าเกิดขึ้น	เป็นไปได้ที่จะเกิดข้อบกพร่อง	2
	ไม่เกิดข้อบกพร่องเลย	1

ที่มา: ปรับปรุงจาก Namhata *et al.* (2021); Hartwell (2022)

3.3.4 ประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบสาเหตุของข้อบกพร่อง (Detection, D) โดยใช้เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบสาเหตุของข้อบกพร่อง ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจพบสาเหตุของข้อบกพร่อง

การตรวจพบ	เกณฑ์	ระดับ
แทบเป็นไปไม่ได้	ไม่สามารถตรวจสอบได้	10
เป็นไปได้ยากมาก	เป็นไปได้ยากมากที่จะตรวจพบ	9
เป็นไปได้ยาก	เป็นไปได้ยากที่จะตรวจพบ	8
		7
ต่ำ	อาจตรวจพบได้	6
ปานกลาง		5
ปานกลางถึงค่อนข้างสูง		4
สูง	มีโอกาสสูงที่จะตรวจพบ	3
สูงถึงค่อนข้างสูงมาก		2
สูงมาก		1

ที่มา: ปรับปรุงจาก Namhata *et al.* (2021); Hartwell (2022)

3.3.5 คำนวณค่าลำดับคะแนนความเสี่ยง (Risk Priority Number, RPN) โดยใช้สมการ (9) ดังนี้

$$RPN = S \times D \times O \quad (9)$$

- เมื่อ S = ความรุนแรงของผลกระทบ
O = โอกาสของการเกิดข้อบกพร่อง
D = ความเป็นไปได้ในการตรวจพบสาเหตุของข้อบกพร่อง

การพิจารณาค่าคะแนนความเสี่ยงโดยการเลือกคะแนนความเสี่ยงที่มีค่าตั้งแต่ 100 ขึ้นไป ร่วมกับการพิจารณาระดับของความรุนแรง (S) ระดับโอกาสในการเกิด (O) และระดับของการตรวจจับ (D) ของทุกประเด็น

3.4 ทำแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรจากข้อมูลสภาพการทำงานเครื่องจักร ผลการวิเคราะห์ FMEA ค่าประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องจักร และประสิทธิผลของเครื่องจักร

3.5 นำแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรไปใช้จริงกับกระบวนการผลิตหินเจียร และเก็บข้อมูลการทำงานของเครื่องจักรเป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยใช้ใบตรวจสอบ

3.6 คำนวณค่าประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องจักร และคำนวณค่าประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักร หลังการดำเนินงานตามแผน

3.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องจักร ก่อนและหลังการดำเนินงานตามแผน

4. ผลการวิจัย

จากการเก็บข้อมูลเครื่องบิอัดเป็นเวลา 1 เดือน พบว่า เครื่องจักรทำงานวันละ 2 กะ ได้แก่ เวลา 08.00-17.00 นาฬิกา และเวลา 20:00-05:00 นาฬิกา มีเวลาที่เครื่องจักรหยุดตามแผนตั้งแต่ เวลา 12.00-13.00 นาฬิกา และเวลา 00:00-01:00 นาฬิกา ดังนั้นเวลาในการทำงานวันละ 18 ชั่วโมง มีเวลาหยุดตามแผน 2 ชั่วโมงต่อวัน เวลารับภาระงานคือ 16 ชั่วโมงต่อวันหรือ 960 นาทีต่อวัน เครื่องบิอัดเกิดขัดข้องโดยมีจำนวนครั้งที่หยุดซ่อม 3 ครั้ง รวมเวลาหยุดซ่อม 140 นาที เวลาเดินเครื่อง 20,020 นาที เครื่องจักรผลิตชิ้นงานได้ 310 ชิ้น ชิ้นงานดี 308 ชิ้น หรือร้อยละ 99.35 และชิ้นงานเสีย 2 ชิ้นหรือร้อยละ 0.65 ดังแสดงข้อมูลการทำงานของเครื่องจักรตามตารางที่ 4



ตารางที่ 4 ข้อมูลการทำงาน ประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องปีบอัดก่อนการดำเนินงานตามแผนการบำรุงรักษา

วัน/เดือน/ปี	จำนวนหยุด ซ่อม (ครั้ง)	เวลา หยุด (นาที)	เวลา เดินเครื่อง (นาที)	สาเหตุการ หยุด	จำนวนที่ ผลิตได้ (ชิ้น)	งานดี (ชิ้น)	งานเสีย (ชิ้น) (ร้อยละ)	ประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องจักร*				ประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักร**			
								MTBF (นาที)	MTTR (นาที)	FR (%)	AI (%)	A (%)	P (%)	Q (%)	OEE (%)
1/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
4/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
5/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
6/09/2566	-	-	960	-	13	13	0 (0.00)					100.00	86.67	100.00	86.67
7/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
8/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
11/09/2566	1	50	910	เครื่องไม่หมุน	15	15	0 (0.00)	6,670.00	50.00	0.0150	99.3	94.79	105.49	100.00	100.00
12/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
13/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
14/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
15/09/2566	1	50	910	เครื่องสะดุด	15	14	1 (6.67)	5,230.00	50.00	0.0191	99.1	94.79	105.49	93.33	93.33
18/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
19/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
20/09/2566	-	-	960	-	12	12	0 (0.00)					100.00	80.00	100.00	80.00
21/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
22/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
25/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
26/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
27/09/2566	1	40	920	แรงดันผิดปกติ	15	14	1 (6.67)	6,033.33	46.67	0.0166	99.2	95.83	104.35	93.33	93.33
28/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
29/09/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
รวม 21 วัน	3	140	20,020	3 สาเหตุ	310	308	2 (0.65)	6,673.33	46.67	0.015	99.3	99.31	99.10	99.35	97.78

หมายเหตุ: *คิดเวลาสะสมถึงเครื่องจักรหยุดซ่อม **เวลามาตรฐานเพื่อการผลิต (Takt time) = 64 นาทีต่อชิ้น

จากตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องจักร พบว่า เครื่องปั๊มอัดมีค่าเวลาของเครื่องจักรต่อเนื่องเฉลี่ย (MTBF) 6,673.33 นาฬิกา เวลาหยุดซ่อมเฉลี่ย (MTTR) 46.67 นาฬิกา อัตราการเสีย (FR) ร้อยละ 0.015 และอัตราการใช้งานของเครื่องจักร (AI) ร้อยละ 99.3 สำหรับด้านประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักร (OEE) มีค่าเท่ากับร้อยละ 97.78 ที่ประกอบด้วยอัตราการเดินเครื่อง (A) ร้อยละ 99.31 ค่าประสิทธิภาพการเดินเครื่อง (P) ร้อยละ 99.10 และอัตราคุณภาพ (Q) ร้อยละ 99.35

ผลการวิเคราะห์หาสาเหตุการหยุดของเครื่องจักรตามปัจจัยการผลิต (4M) ได้แก่ Man (พนักงาน) Machine (เครื่องจักร) Material (วัสดุ) Method (วิธีการ) และ 1E ได้แก่ Environment (สิ่งแวดล้อม) ของ 3 ปัญหา ได้แก่ (1) เครื่องไม่หมุน (2) เครื่องสะดุด และ (3) แรงดันผิดปกติ แสดงตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาการหยุดของเครื่องปั๊มอัด

4M1E	สาเหตุ		
	เครื่องไม่หมุน	เครื่องสะดุด	แรงดันผิดปกติ
พนักงาน	1. พนักงานขาดประสบการณ์ในการทำงาน 2. พนักงานไม่ตรวจสอบสภาพก่อนใช้งานเครื่องจักร 3. พนักงานไม่ทำความสะอาดก่อนใช้งาน		
เครื่องจักร	1. เฟืองเสียหาย	1. อายุการใช้งานนาน (เกินกว่า 10 ปี)	1. น้ำมันไฮดรอลิกเสื่อมสภาพ
	2. เฟืองขับเคลื่อนสึกหรอ	2. สารความหนืดไม่เพียงพอ	2. ปัมไฮดรอลิกเสีย
	3. มอเตอร์ไฮดรอลิกเสีย	3. ลูกแบริงแตก	3. เครื่องขัดข้อง
	4. น็อตขาด	4. มอเตอร์ไฮดรอลิกทำงานผิดปกติ	4. สายน้ำมันรั่ว
		5. ลูกแบริงสึกหรอ	
		6. จารบีแห้ง	
วัสดุ	1. หินมีความชื้นสะสม		
	2. หินมีสิ่งเจือปน	-	-
วิธีการทำงาน	1. วิธีการทำงานไม่ครบถ้วนหรือไม่ครอบคลุมงาน ต้องลองผิดลองถูก		
	2. เวลาการทำงานต่อเนื่องยาวนาน		2. กำหนดมาตรฐานแรงดันมากหรือน้อยเกินไป
สิ่งแวดล้อม	1. ฝุ่นภายในโรงงาน		
	-	2. สารเคมีปริมาณมากเกินไป	-

จากผลการวิเคราะห์หาสาเหตุการหยุดของเครื่องจักรตามปัจจัยการผลิต (ตารางที่ 5) เลือกสาเหตุการหยุดจากปัจจัยด้านเครื่องจักร (Machine) จำนวน 14 ประเด็นมาเป็นตัวแปรป้อนเข้า (Cause of failure or Input) หลังจากนั้นจึงระบุข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น (Potential failure mode)



และผลกระทบที่เกิดขึ้น (Potential failure effect) ก่อนการประเมินระดับของความรุนแรง (Severity, S) ระบุสาเหตุที่เป็นไปได้ (Potential causes) เพื่อประเมินระดับโอกาสในการเกิด (Occurrence, O) และระบุการควบคุมในปัจจุบัน (Action taken) เพื่อประเมินระดับของการตรวจจับ (Detection, D) นำผลการประเมินมาใช้คำนวณค่าคะแนนความเสี่ยง (RPN) ดังแสดงตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบของเครื่องบีบอัด

ตัวแปรป้อนเข้า (Cause of failure or Input)	ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น (Potential failure mode)	ผลกระทบที่เกิดขึ้น (Potential failure effect)	ความรุนแรง (S)	สาเหตุที่เป็นไปได้ (Potential causes)	โอกาสการเกิด (O)	การควบคุมในปัจจุบัน (Action taken)	การตรวจจับ (D)	RPN = SOD
1. อายุการใช้งานของเครื่องจักร	เครื่องทำงานผิดปกติ	เครื่องทำงานผิดพลาด	8	ไม่ควบคุมตามที่กำหนด	7	ตรวจสอบเครื่องจักรทุกปี	7	392
2. เครื่องขัดข้อง	เครื่องทำงานผิดปกติ	เครื่องทำงานผิดพลาด	8	เสื่อมสภาพตามการใช้งาน	2	ตรวจสอบก่อนเดินเครื่อง	7	112
3. มอเตอร์ไฮดรอลิกเสีย	ทำงานหนักต่อเนื่อง	เครื่องจักรหยุดทำงาน	8	ไม่ควบคุมตามที่กำหนด	7	ตรวจสอบเครื่องจักรทุกปี	7	392
4. มอเตอร์ไฮดรอลิกทำงานผิดปกติ	การเสื่อมสภาพ	เครื่องจักรหยุดทำงาน	8	เสื่อมสภาพตามการใช้งาน	2	ตรวจสอบก่อนเดินเครื่อง	7	112
5. น้ำมันไฮดรอลิกเสื่อมสภาพ	การเสื่อมสภาพ	เครื่องทำงานผิดพลาด	8	เสื่อมสภาพตามการใช้งาน	1	ตรวจสอบก่อนเดินเครื่อง	2	16
6. ปัมไฮดรอลิกเสีย	การเสื่อมสภาพ	เครื่องจักรหยุดทำงาน	8	เสื่อมสภาพตามการใช้งาน	2	ตรวจสอบก่อนเดินเครื่อง	7	112
7. เฟืองเสียหาย	ทำงานหนักเกินไป	เครื่องทำงานผิดพลาด	8	เสื่อมสภาพตามการใช้งาน	2	ตรวจสอบก่อนเดินเครื่อง	7	112
8. เฟืองขับเคลื่อนสึกหรอ	การเสื่อมสภาพ	เครื่องทำงานผิดพลาด	7	เสื่อมสภาพตามการใช้งาน	6	ตรวจสอบก่อนเดินเครื่อง	2	84
9. ลูกแบริ่งแตก	ทำงานหนักต่อเนื่อง	เครื่องจักรหยุดทำงาน	7	เสื่อมสภาพตามการใช้งาน	6	ตรวจสอบก่อนเดินเครื่อง	2	84
10. ลูกแบริ่งสึกหรอ	การเสื่อมสภาพ	เครื่องทำงานผิดพลาด	7	เสื่อมสภาพตามการใช้งาน	6	ตรวจสอบก่อนเดินเครื่อง	2	84
11. นี้อตขาด	การเสื่อมสภาพ	เครื่องจักรหยุดทำงาน	8	เสื่อมสภาพตามการใช้งาน	2	ตรวจสอบก่อนเดินเครื่อง	7	112
12. สารความหนืดไม่เพียงพอ	การเสื่อมสภาพ	เครื่องทำงานผิดพลาด	8	เสื่อมสภาพตามการใช้งาน	1	ตรวจสอบก่อนเดินเครื่อง	2	16
13. สายน้ำมันรั่ว	การเสื่อมสภาพ	เครื่องจักรหยุดทำงาน	8	เสื่อมสภาพตามการใช้งาน	1	ตรวจสอบก่อนเดินเครื่อง	2	16
14. จารบีแห้ง	การเสื่อมสภาพ	เครื่องทำงานผิดพลาด	8	เสื่อมสภาพตามการใช้งาน	1	ตรวจสอบก่อนเดินเครื่อง	2	16

จากตารางที่ 6 แสดงการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบของเครื่องบีบอัดจากปัจจัยด้านเครื่องจักรจากจำนวนข้อบกพร่อง 14 ประเด็น พบว่า มี 7 ประเด็น ที่มีค่า RPN มากกว่า 100 คะแนน โดยทุกประเด็นมีค่าความรุนแรงระดับสูงถึงสูงมาก (คะแนน 7-8) จึงเลือกข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นทั้ง 14 ประเด็นมาทำแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักร ที่กำหนดให้มีการตรวจสอบเครื่องจักรจำนวน 4 กิจกรรม ได้แก่ (1) วิธีการทำความสะอาดอุปกรณ์และเครื่องจักร (2) การตรวจสอบอุปกรณ์และเครื่องจักร (3) การหล่อลื่นอุปกรณ์และเครื่องจักร และ (4) การเปลี่ยนอะไหล่ แผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรประกอบด้วย แผนระยะสั้น (1 วัน และ 1 สัปดาห์) และแผนระยะยาว (1 ปี) โดยมีพนักงานผู้ปฏิบัติงานและพนักงานฝ่ายซ่อมบำรุงเป็นผู้รับผิดชอบ ดังแสดงแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรเชิงป้องกันตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของเครื่องบีบอัด

ตำแหน่ง	กิจกรรม/วิธีการ	ความถี่			ผู้ตรวจสอบ
		1/D	1/W	1/Y	
การทำความสะอาด					
ตัวเครื่อง	เช็ดทำความสะอาด	✓			พนักงานผู้ปฏิบัติงาน
การตรวจสอบ					
เฟือง	ไม่เสียหาย	✓			พนักงานผู้ปฏิบัติงาน
นอต	ไม่ชำรุด ไม่ขาด	✓			พนักงานผู้ปฏิบัติงาน
แกนหมุนปรับ	ปรับได้ปกติ	✓			พนักงานผู้ปฏิบัติงาน
ลูกแบร์ริง	ไม่สึกหรอ	✓			พนักงานผู้ปฏิบัติงาน
สายน้ำมัน	ไม่รั่ว ไม่ชำรุด	✓			พนักงานผู้ปฏิบัติงาน
น้ำมันไฮดรอลิก	เปลี่ยนน้ำมันไฮดรอลิก	✓			พนักงานผู้ปฏิบัติงาน
การหล่อลื่น					
แกนหมุนปรับ	หยอดจารบี		✓		พนักงานผู้ปฏิบัติงาน
แกนบีบอัด	เพิ่มสารความหนืด		✓		พนักงานผู้ปฏิบัติงาน
การเปลี่ยนอะไหล่					
มอเตอร์ไฮดรอลิก	เปลี่ยนมอเตอร์ไฮดรอลิก			✓	พนักงานฝ่ายซ่อมบำรุง
ปั๊มไฮดรอลิก	เปลี่ยนปั๊มไฮดรอลิก			✓	พนักงานฝ่ายซ่อมบำรุง

ผลการทดลองปฏิบัติตามแผนการบำรุงรักษาเป็นเวลา 1 เดือน พบว่า เครื่องบีบอัดเกิดความขัดข้องของอุปกรณ์และระบบการทำงานจำนวน 2 ครั้ง จาก 1 สาเหตุคือแรงดันผิดปกติ รวมเวลาหยุดซ่อม 30 นาที เวลาเดินเครื่อง 17,250 นาที เครื่องจักรผลิตชิ้นงานได้ 268 ชิ้น ชิ้นงานดี 267 ชิ้น หรือร้อยละ 99.63 และชิ้นงานเสีย 1 ชิ้นหรือร้อยละ 0.37 ดังแสดงตามตารางที่ 8



ตารางที่ 8 ข้อมูลการทำงาน ประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องปีบอัดหลังการดำเนินงานตามแผนการบำรุงรักษา

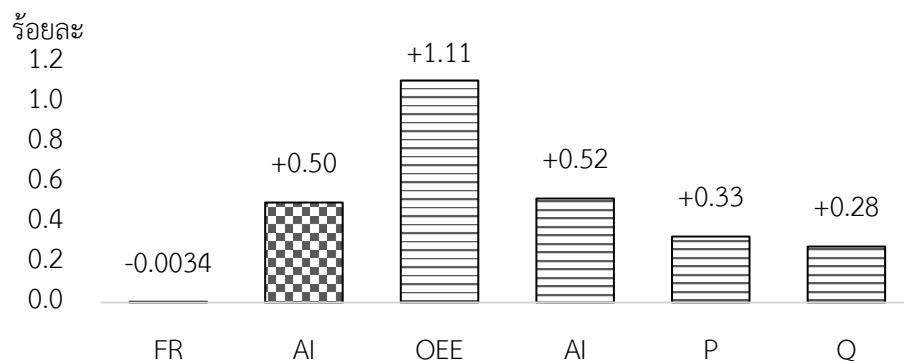
วัน/เดือน/ปี	จำนวนหยุดซ่อม (ครั้ง)	เวลาหยุด (นาทีก)	เวลาเดินเครื่อง (นาทีก)	สาเหตุการหยุด	จำนวนที่ผลิตได้ (ชิ้น)	งานดี (ชิ้น)	งานเสีย (ร้อยละ)	ประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องจักร*				ประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักร**			
								MTBF (นาทีก)	MTTR (นาทีก)	FR (%)	AI (%)	A (%)	P (%)	Q (%)	OEE (%)
1/12/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
4/12/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
6/12/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
7/12/2566	-	-	960	-	14	14	0 (0.00)					100.00	93.33	100.00	93.33
8/12/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
12/12/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
13/12/2566	1	20	940	แรงดันผิดปกติ	15	14	1 (6.67)	6,700	20.00	0.0149	99.7	97.92	102.13	93.33	93.33
14/12/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
15/12/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
18/12/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
19/12/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
20/12/2566	-	-	960	-	14	14	0 (0.00)					100.00	93.33	100.00	93.33
21/12/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
22/12/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
25/12/2566	1	10	950	แรงดันผิดปกติ	15	15	0 (0.00)	7,185	15.00	0.0139	99.8	98.96	101.05	100.00	100.00
26/12/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
27/12/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
28/12/2566	-	-	960	-	15	15	0 (0.00)					100.00	100.00	100.00	100.00
รวม 18 วัน	2	30	17,250	1 สาเหตุ	268	267	1 (0.37)	8,625	15.00	0.0116	99.8	99.83	99.43	99.63	98.89

หมายเหตุ: *คิดเวลาสะสมถึงเครื่องจักรหยุดซ่อม **เวลามาตรฐานเพื่อการผลิต (Takt time) = 64 นาทีต่อชิ้น

จากตารางที่ 8 พบว่าค่าประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องจักร มีค่าเวลาของเครื่องจักร ต่อเนื่องเฉลี่ย (MTBF) 8,625 นาฬิกา หรือเพิ่มขึ้น 1,951.67 นาฬิกา (ร้อยละ 29.25) เวลาหยุดซ่อมเฉลี่ย (MTTR) 15 นาฬิกา หรือลดลง 31.67 นาฬิกา (ร้อยละ 67.86) อัตราการเสีย (FR) ร้อยละ 0.0116 หรือลดลงร้อยละ 0.0034 และอัตราการใช้งานของเครื่องจักร (AI) 99.8 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.5 สำหรับด้านประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักร (OEE) มีค่าร้อยละ 98.89 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.11 ที่ประกอบด้วยอัตราการใช้เครื่อง (A) ร้อยละ 99.83 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.52 ค่าประสิทธิภาพการเดินเครื่อง (P) ร้อยละ 99.43 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.33 และอัตราคุณภาพ (Q) ร้อยละ 99.63 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.28 แสดงตามตารางที่ 9 และภาพที่ 1

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องจักรก่อนและหลังดำเนินงานตามแผน

ประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องจักร	ก่อน	หลัง	เพิ่ม/ลด
เวลาของเครื่องจักรต่อเนื่องเฉลี่ย (MTBF) (นาฬิกา)	6,673.33	8,625	เพิ่ม 1,951.67
เวลาหยุดซ่อมเฉลี่ย (MTTR) (นาฬิกา)	46.67	15	ลด 31.67
อัตราการเสีย (FR) (ร้อยละ)	0.015	0.0116	ลด 0.0034
อัตราการใช้งานของเครื่องจักร (AI) (ร้อยละ)	99.3	99.8	เพิ่ม 0.5
ประสิทธิผลของเครื่องจักร	ก่อน	หลัง	เพิ่ม/ลด
ประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักร (OEE) (ร้อยละ)	97.78	98.89	เพิ่ม 1.11
อัตราการใช้เครื่อง (A) (ร้อยละ)	99.31	99.83	เพิ่ม 0.52
ประสิทธิภาพการเดินเครื่อง (P) (ร้อยละ)	99.10	99.43	เพิ่ม 0.33
อัตราคุณภาพ (Q) (ร้อยละ)	99.35	99.63	เพิ่ม 0.28



ภาพที่ 1 ร้อยละของประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องจักรหลังดำเนินงานตามแผน

(- หมายถึง มีค่าลดลง + หมายถึง มีค่าเพิ่มขึ้น)

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 ปัญหาเครื่องจักรหยุดทำงานจากเครื่องไม่หมุน เครื่องสะดุด และแรงดันผิดปกติ ที่เกิดในส่วนขับเคลื่อน และส่วนบีบอัดของเครื่องจักร โดยมีข้อบกพร่องที่เป็นสาเหตุของการหยุดทำงานจำนวน 14 ประเด็น มีความรุนแรงระดับสูง (7 คะแนน) ถึงสูงมาก (8 คะแนน) ทุกประเด็น แต่โอกาสการเกิดข้อบกพร่องจำนวน 9 ประเด็น (ร้อยละ 64.29) แทบไม่เกิดหรือไม่่าเกิดขึ้น (1 และ 2 คะแนน) และประเด็นที่มีความเป็นไปได้ยากที่จะตรวจพบ (7 คะแนน) เท่ากับประเด็นที่สามารถตรวจพบได้ค่อนข้างแน่นอน (2 คะแนน) ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวนี้ส่งผลให้มีค่าความเสี่ยง (RPN) แตกต่างกันตั้งแต่ 16 ถึง 392 คะแนน ทั้งนี้ประเด็นดังกล่าวล้วนส่งผลต่อการหยุดทำงานของเครื่องจักร และอยู่ในส่วนของเครื่องจักรเดียวกันจึงนำไปพิจารณาทำแผนการบำรุงรักษาให้เหมาะสมกับแต่ละประเด็น

ในการระบุความเสี่ยงด้วยวิธีการ FMEA ข้อผิดพลาดที่เป็นไปได้จะถูกนำมาพิจารณาเพื่อค้นหาทุกโอกาสในการเกิดข้อผิดพลาดและผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ใช้พารามิเตอร์ (Parameter) จำนวน 3 ตัว ได้แก่ S, O และ D ได้เป็นค่าความเสี่ยง (RPN) ก่อนพิจารณาเลือกค่า RPN นำไปใช้ในการออกแบบหรือวางแผนการควบคุม ดังเช่น Namhata *et al.* (2021) ได้ประเมินความเสี่ยงของเครื่อง Buffering Machine ในโรงงานผลิตรถยนต์ โดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 8 คน วิเคราะห์และประเมินค่า O, S, และ D ได้ประเด็นข้อบกพร่องจำนวน 5 ประเด็น และทุกประเด็นมีค่า RPN มากกว่า 100 มีค่า O, S, และ D ที่มีการกระจายสูง จึงใช้สถิติเพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลจากการประเมินเพื่อโอกาสการเลือกที่เหมาะสมที่สุด

นอกจากนี้ Mascia *et al.* (2020) ได้ประเมิน S, O และ D ด้วยผู้เชี่ยวชาญก่อนคำนวณหา ค่า FMEA โดยกำหนดพิจารณาเลือกค่า RPN ของห้องปฏิบัติการทางชีววิทยาที่มีค่ามากกว่า 100 ซึ่งมีมากกว่าร้อยละ 50 ของข้อผิดพลาดที่พบ โดยใช้ประสบการณ์เพื่อการประเมินและการมีส่วนร่วมของผู้ตรวจสอบ ก่อนให้ข้อเสนอแนะเพื่อการดำเนินการ ซึ่งส่วนใหญ่ ได้แก่ การจัดการเครื่องมือและวัสดุ และการฝึกอบรมบุคลากร เช่นเดียวกับ Ceylan *et al.* (2023) ที่ประเมินความเสี่ยงของมลพิษทางอากาศจากเรือ โดยใช้กลุ่มผู้เชี่ยวชาญจำนวนสองกลุ่มเพื่อวิเคราะห์ O, S, และ D ก่อนเลือกค่าความเสี่ยง (RPN) ที่สูงที่สุดเพื่อดำเนินการให้เหมาะสมสอดคล้องกับข้อบกพร่อง ได้แก่ ทำคู่มือการใช้งานเครื่องจักรและอุปกรณ์ และสร้างขั้นตอนการเปลี่ยนเชื้อเพลิง

5.2 การทำแผนบำรุงรักษาเครื่องจักร กำหนดให้มีการตรวจสอบเครื่องจักรก่อนทำงานทุกครั้ง ครอบคลุม 4 กิจกรรม ได้แก่ การทำความสะอาดอุปกรณ์และเครื่องจักร การตรวจสอบอุปกรณ์และเครื่องจักร การหล่อลื่นอุปกรณ์ และการเปลี่ยนอะไหล่ โดยทำแผนการบำรุงรักษาตามระยะเวลา ประกอบด้วยแผนระยะสั้น (รายวัน รายสัปดาห์) มีพนักงานผู้ปฏิบัติงานเป็นผู้ดำเนินงาน และแผน



ระยะยาว (1 ปี) มีพนักงานฝ่ายซ่อมบำรุงเป็นผู้ดำเนินงาน ซึ่งแผนบำรุงรักษาเครื่องจักรดังกล่าวนี้เป็นระบบเอกสารที่มีเอกสารอื่นประกอบ ได้แก่ คู่มือการดำเนินงาน (Work manual) และขั้นตอนการปฏิบัติงาน (Work instruction) รวมทั้งการกำหนดมาตรฐานที่เกี่ยวข้องอย่างครบถ้วน

การวางแผนบำรุงรักษาเครื่องจักรตามระยะเวลา พบว่า จารุวรรณ และธีรภัทร (2563) วางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรในกระบวนการอัดเม็ดของโรงงานชีวมวลอัดเม็ด เป็นแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันก่อนเกิดการขัดข้อง และให้แผนวิศวกรรมตรวจสอบเครื่องจักรเป็นรายวัน รายสัปดาห์และรายเดือน ตามลำดับความเสี่ยง ทำใบตรวจสอบ และคู่มือของเครื่องจักร แต่ทั้งนี้การวางแผนบำรุงรักษาเครื่องจักร มีการพิจารณาเวลาของการทำแผนเพื่อทดลองใช้งานที่แตกต่างกัน กำหนดให้ผู้มีบทบาทหน้าที่ในการดำเนินงานตามแผน และควบคุมติดตามแผนที่แตกต่างกัน ดังเช่น สมชาย และคณะ (2564) วางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรสายพานลำเลียงภายในห้องรับ-จ่าย วัตถุดิบ โดยกำหนดเวลาของแผนเป็นรายสัปดาห์ ที่ตรวจสอบโดยพนักงานประจำเครื่องจักรและทีมช่าง เป็นต้น

5.3 ผลการใช้แผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรพบว่า เครื่องบิบบัตมีประสิทธิภาพการบำรุงรักษาดีขึ้น โดยเวลาของเครื่องจักรต่อเนื่องเฉลี่ย (MTBF) เพิ่มขึ้น เวลาหยุดซ่อมเฉลี่ย (MTTR) ลดลง อัตราการเสีย (FR) ลดลง และอัตราการใช้งานของเครื่องจักร (AI) เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับวิจัยของรังสรรค์ และคณะ (2563) ที่ศึกษาและเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรจำนวน 2 ชนิด ด้วยการนำแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันมาใช้ในการปฏิบัติงาน มีเป้าหมายเพื่อให้เครื่องจักรมีค่าประสิทธิผลโดยรวมเพิ่มมากขึ้น แต่ทั้งนี้แผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันได้ทดลองใช้งานเพียง 1 เดือนจึงครอบคลุมเพียงการบำรุงรักษาระยะสั้น (ประจำวันและประจำสัปดาห์) ด้วยพนักงานประจำเครื่อง (Self-maintenance) และยังคงพบปัญหาการหยุดของเครื่องจักรจากสาเหตุที่ต้องใช้การตรวจสอบและเปลี่ยนอะไหล่ประจำปี

นอกจากนี้ผลการใช้แผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรพบว่าค่าประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักร (OEE) เพิ่มขึ้น ที่มาจากการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราการเดินเครื่อง (A) ประสิทธิภาพการเดินเครื่อง (P) และอัตราคุณภาพ (Q) หากพิจารณาในแต่ละประเด็นพบว่า อัตราการเดินเครื่องเป็นค่าที่แสดงความพร้อมของเครื่องจักรในการทำงานที่มีผลกระทบจากเวลาที่สูญเสียเนื่องจากเครื่องจักรไม่ได้ทำงานหรือเวลาหยุดที่ไม่ได้วางแผนไว้ สำหรับประสิทธิภาพการเดินเครื่องเป็นสมรรถนะการทำงานของเครื่องจักรในการผลิตสินค้าด้วยเวลาและจำนวนตามที่กำหนด และอัตราคุณภาพเป็นความสามารถในการผลิตของดีตรงตามข้อกำหนดของเครื่องจักร

การหาค่า OEE เป็นค่าที่บอกถึงความพร้อมของเครื่องจักร ความสามารถในการผลิต และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเครื่องจักร มีการประยุกต์ใช้การหาค่า OEE นี้เพื่อแสดงถึงการ

ยกระดับการทำงานของเครื่องจักร ดังเช่น จตุรงค์ และปณิตพร (2566) วัดประสิทธิผลโดยรวม (OEE) ของเครื่องจักรในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนเพลลา ที่พบว่าภายหลังการดำเนินงานตามแผนเพื่อลดความสูญเสียในกระบวนการผลิตแล้วเครื่องจักรมีค่า OEE เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 61.21 เป็นร้อยละ 86.24 เช่นเดียวกับ สุชาติ และวิชัยพร (2566) เพิ่มประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องบรรจุของจากเดิมร้อยละ 67.65 เพิ่มเป็นร้อยละ 76.16

6. กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานและการเผยแพร่งานวิจัยได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา และบริษัทมิติซุย ไกรน์ดี เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด

7. เอกสารอ้างอิง

- กิตติชัย อธิกุลรัตน์, ศิรัตน์ แจ่มรักษสกุล, และเจษฎา พลายชุมพล. (2565). การประยุกต์รูปแบบความล้มเหลวและการวิเคราะห์ผลกระทบเพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตเสาไฟฟ้า. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณเจ้าทหารลาดกระบัง**, 38(3), 63-64.
- เกวลี วรรณันท์, และจิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์. (2565). การเพิ่มอัตราคุณภาพสินค้าของกระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ชนิดสั้น. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**, 28(3), 112-125.
- จตุรงค์ สันพลี, และปณิตพร เรืองเชิงชุม. (2566). การลดความสูญเสียที่เกิดจากการหยุดเดินเครื่องจักรโดยไม่ได้วางแผนล่วงหน้าในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนเพลลาด้วยการวัดประสิทธิผลโดยรวม. **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**. 33(2), 671-683.
- จารุวรรณ พรหมเงิน, และธีรภัทร จงรัชช์. (2563). การวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรในกระบวนการอัดเม็ดด้วยเทคนิค FMEA กรณีศึกษาโรงงานชีวมวลอัดเม็ด. **วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา**, 8(1), 1-12.
- บริษัท มิติซุย ไกรน์ดี เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด. (2566). **คู่มือผลิตภัณฑ์บริษัท**. ชลบุรี: ม.ป.ท.
- พรณวิภา ลากจิตร. (2565). การใช้เครื่องมือ FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) ในการจัดการความเสี่ยงของระบบยาแผนกผู้ป่วยในโรงพยาบาลสนม. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอินทร์เทิร์น วิทยาลัยอินทร์เทิร์น**, 7(4), 117-128.

- ระพี กาญจนะ, สุรัตน์ ตรียวนพงศ์, และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์. (2563). การระบุแนวทางการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของเครื่องเกี่ยวขนาดข้าวโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลัญบุรี*, 18(2), 35-45.
- รังสรรค์ ไชยเชษฐ์, ประภากรณ แสงวิจิตร, และชฎาภรณ์ แสงตามี. (2563). การวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน กรณีศึกษาสหกรณ์การเลี้ยงปลุสสัตว์ กรป.กลาง โพนยางคำ จำกัด. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.*, 14(1), 79-89.
- รัชฎาภรณ์ ภู่อ้อย, และประจวบ กลุ่มจิตร. (2565). การวิเคราะห์ความเสี่ยงระดับปฏิบัติการ กรณีศึกษาโรงงานผลิตถุงพลาสติก. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม*, 15(4), 120-128.
- รัฐภูมิ วงษ์วิทย์. (2566). การพัฒนาระบบการบำรุงรักษาด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์การขัดข้องและผลกระทบ กรณีศึกษาโรงงานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์คอนกรีต. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม*, 16(3), 59-69.
- โศจิรพักร บุตรคำโชติพร, วิษณุตร งามสะอาด, ประพันธ์ศักดิ์ บุรณะประภา, และอำนาจ แก้วใส. (2564). การปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพโดยใช้แนวคิด FMEA ในกระบวนการขึ้นรูปแม่พิมพ์ขวดพลาสติก กรณีศึกษาบริษัท GP. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยกรุงเทพ ตะวันออกเฉียงใต้*, 1(3), 30-44.
- สมชาย เปรียงพรม, สุชาติ ชำรงสุข, และวรรณลภย์ อนันตเจริญโชติ. (2564). การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตด้วยการวางแผนการบำรุงรักษา: กรณีศึกษาเครื่องจักรสายพานลำเลียงภายในห้องรับ-จ่ายวัตถุดิบ. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 31(2), 201-215.
- สุชาติ ชำรงสุข, และวิษญาพร เครือเอี่ยม. (2566). การเพิ่มประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักรในกระบวนการผลิตมอลต์สก็ด. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 33(4), 1-15.
- เสขสัน นาคพ่วง, ศักดิ์ชาย รักษการ, และจิรวัดน์ ปล้องใหม่. (2563). การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตเครื่องตีสมุนไพรร. *วารสารวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, 10(2), 131-132.
- Ceylan, B.O., Akyar, D.A., & Celik, M.S. (2023). A novel FMEA approach for risk assessment of air pollution from ships. *Marine Policy*, 150, n.p. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308597X23000635>
- Hartwell, J. (2022). *FMEA RPN-Risk Priority Number. How to Calculate and Evaluate?*. Retrieved from <https://www.iqasystem.com/news/risk-priority-number/>
- Mascia, A., Cirafici, A.M., Bongiovanni, A., Colotti, G., Lacerra, G., Carlo, M.Di., Digilio, F. A., Liguori, G.L., Lanati, A., & Kisslinger, A. (2020). A Failure Mode and Effect



Analysis (FMEA)-based approach for risk assessment of scientific processes in non-regulated research laboratories. **Accreditation and Quality Assurance**, 25, 311-321. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00769-020-01441-9>

Namhata, P., Rakshit, A., Naskar, S. K., Bose, D., & Chatterjee, S. (2021). Risk Priority Number (RPN) assessment in design Failure Modes and Effective Analysis for the Automobile Plant using factor analysis. **Instant Journal of Mechanical Engineering**, 20-24. Retrieved from <https://doi.org/10.36811/ijme.2021.110006>



การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุรองพื้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าเป็นส่วนผสม

THE STUDY OF PROPERTIES OF ROAD SUBBASE MATERIAL PRODUCED FROM RECYCLED ASPHALT PAVEMENT

ขวัญชัย เทศฉาย, บำรุง บัวชื่น*

Kwanchai Thetchai, Bumrung Buachuen *

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา-ตาก อ.เมือง จ.ตาก ประเทศไทย 63000

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Muang, Tak, Thailand, 63000

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

วันที่เข้าระบบ 4 มิถุนายน 2567

วันที่แก้ไขบทความ 12 พฤศจิกายน 2567

วันที่ตอบรับบทความ 12 พฤศจิกายน 2567

บทคัดย่อ

ชั้นรองพื้นทางเป็นชั้นโครงสร้างของถนนที่ทำหน้าที่รับน้ำหนักของยานพาหนะบนชั้นผิวทางลงมายังชั้นโครงสร้างทางอื่น ๆ ดังนั้นวัสดุที่จะนำมาก่อสร้างชั้นรองพื้นทางจึงต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีและมีความสามารถในการรับน้ำหนักได้ตามมาตรฐานงานถนน งานวิจัยนี้นำเสนอการนำวัสดุผิวทางเก่าที่เหลือจากการขุดไสผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) จากโครงการก่อสร้างถนนทางหลวงหมายเลข 101 สายทางกำแพงเพชร-สุโขทัย ตอนแยก อ.ลานกระบือ-อ.คีรีมาศ จ.กำแพงเพชร กม. 33+000 - กม. 36+010 โดยผสมกับดินลูกรังจากแหล่ง อ.พรานกระต่าย จ.กำแพงเพชร เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง ผู้วิจัยทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ และได้แบ่งตัวอย่างอัตราส่วนผสม ดินลูกรัง : แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า เท่ากับ 1:1, 2:1 และ 3:1 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติการบดอัด (Compaction test) แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) และการทดสอบหาค่าซีบีอาร์ (CBR) แบบแช่น้ำ (Soaked) ที่ 4 วัน พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัดวัสดุผิวทางดินลูกรังกับแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 4.0, 6.0 และ 7.6 ตามลำดับ สำหรับกำลังรับน้ำหนักของดินที่ได้จากการทดสอบหาค่าซีบีอาร์ (CBR) มีค่าเท่ากับร้อยละ 9.5, 28.4 และ 40.7 ซึ่งอัตราส่วนผสมที่ 2:1 และ 3:1 เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของชั้นรองพื้นทางของถนน ดังนั้นการนำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ามาหมุนเวียนใช้งานเป็นวัสดุคัดเลือกทดแทนในอุตสาหกรรมงานก่อสร้างทาง จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยแก้ไขปัญหาการขาดแคลนวัสดุงานทางในอนาคต

คำสำคัญ: วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า, ดินลูกรัง, ชั้นรองพื้นทาง

Abstract

The subbase is a structural road layer that transfers vehicle loads from the road surface to other structural layers. Therefore, materials used for constructing the subbase must exhibit good engineering properties and sufficient load-bearing capacity, in line with road construction standards. This research explores the utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) obtained by crushing old asphalt concrete from Highway No. 101 (Kamphaeng Phet-Sukhothai route, section from Lan Krabue to Khiri Mat, Kamphaeng Phet province, Km 33+000 - Km 36+010). RAP mixed with lateritic soil from Phran Kratai district, Kamphaeng Phet province, was used as subbase material. The study involved testing the basic properties of the mixtures, with sample ratios of lateritic soil to RAP at 1:1, 2:1, and 3:1 by weight. Tests were conducted to determine compaction properties using the modified compaction test and to measure the California Bearing Ratio (C.B.R) under soaked conditions for four days. The results indicated that the optimal water content for compacting the lateritic soil mixed with RAP was 4.0%, 6.0%, and 7.6%, respectively. The corresponding C.B.R values for the load-bearing capacity of the mixtures were 9.5%, 28.4%, and 40.7%. Notably, the mix ratios of 2:1 and 3:1 met the standard criteria for subbase courses in road construction. Thus, recycling old asphalt concrete materials is an alternative replacement material, helping resolve the issue of future shortages of road construction materials.

Keywords: Reclaimed asphalt pavement material, Laterite soil, Subbase course

1. บทนำ

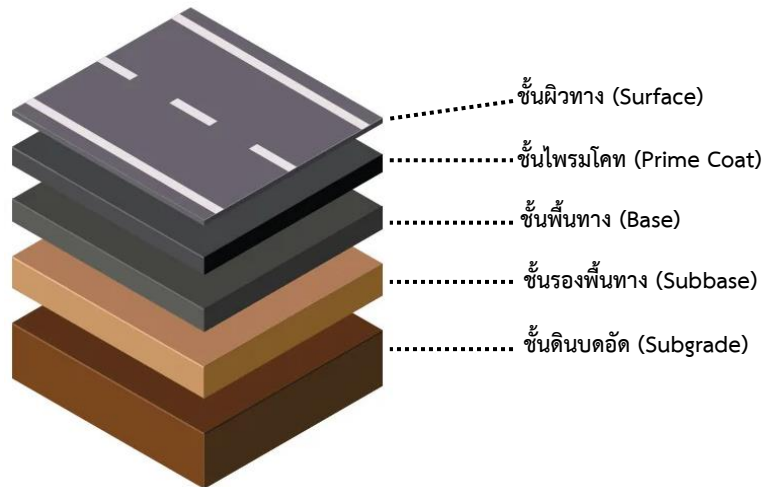
สถานการณ์ด้านอุตสาหกรรมงานก่อสร้างในประเทศไทยเริ่มประสบปัญหาด้านการขาดแคลนวัสดุสำหรับงานก่อสร้าง เนื่องจากวัสดุจากแหล่งธรรมชาติผลิตได้อย่างจำกัดและมีราคาสูง ซึ่งสวนทางกับความต้องการในอุตสาหกรรมงานก่อสร้างของประเทศที่มีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่อเป็นวงกว้างต่องานก่อสร้างประเภทต่างๆ โดยเฉพาะงานถนนที่มีระยะทางรวมกว่า 701,847.118 กิโลเมตร (กระทรวงคมนาคม, 2019) ซึ่งหากมีโครงการก่อสร้างหรือโครงการบำรุงรักษาถนนในแต่ละพื้นที่ จะมีความต้องการใช้วัสดุมวลรวมประเภทต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก ปัจจุบันจึงมีการคัดเลือกวัสดุทดแทนวัสดุมวลรวมธรรมชาติ ผ่านเทคนิคการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม เพื่อแก้ไขปัญหาด้านการขาดแคลนวัสดุและพัฒนาคุณสมบัติให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน

งานทางสำหรับการใช้ในงานถนน วัสดุคัดเลือกทดแทนที่นิยมนำมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติสำหรับงานถนน ได้แก่ แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Reclaimed asphalt pavement, RAP) ซึ่งเป็นวัสดุชั้นผิวทาง (Wearing course) ของถนน ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Reclaimed asphalt pavement, RAP)

ถนนในประเทศไทยนิยมก่อสร้างมี 2 ประเภท ได้แก่ ถนนคอนกรีต (Concrete) เป็นถนนที่มีผิวทางแบบแข็ง (Rigid pavement) และถนนแอสฟัลต์คอนกรีตหรือถนนลาดยาง (Asphalt concrete) เป็นถนนที่มีผิวทางแบบยืดหยุ่น (Flexible pavement) พบว่าถนนแอสฟัลต์คอนกรีตมีมากที่สุดใในโครงข่ายของถนนทั่วประเทศ เนื่องจากมีข้อดีในเรื่องของราคาต้นทุนการก่อสร้างต่ำและบำรุงรักษาง่าย แต่ข้อเสียคือเกิดความเสียหายง่ายและมีอายุการใช้งานต่ำ ดังนั้นจึงต้องมีการซ่อมแซมและบำรุงรักษาตามสภาพความเสียหายเป็นประจำ โครงสร้างของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตมีทั้งหมด 5 ชั้น ได้แก่ 1. ชั้นดินบดอัด (Subgrade) เป็นชั้นดินเดิมที่มีอยู่ในพื้นที่และต้องทำการบดอัดเพื่อความแข็งแรง 2. ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) เป็นชั้นโครงสร้างทางที่ต้องพิจารณาใช้วัสดุคัดเลือกตามเกณฑ์มาตรฐานงานทาง เนื่องจากมีหน้าที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกทุกของชั้นโครงสร้างต่างๆที่อยู่เหนือขึ้นไป รวมไปถึงการป้องกันน้ำซึมผ่านขึ้นมาจากชั้นดินเดิม วัสดุที่ถูกคัดเลือกในชั้นนี้จะนำมาบดอัดให้ได้รูปร่างรวมถึงความหนาที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งวัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้จะเป็นดินลูกรัง หินบด และกรวด 3. ชั้นพื้นทาง (Base) เป็นชั้นที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกทุกจากชั้นผิวทางจึงต้องมีคุณสมบัติในการรับแรงที่ดี 4. ชั้นไพรมโคท (Prime coat) เป็นชั้นที่มีหน้าที่ยึดระหว่างชั้นผิวทางและชั้นรองพื้นทาง 5. ชั้นผิวทาง (Surface) เป็นชั้นที่มีหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกจากยานพาหนะโดยตรงทำให้ต้องมีความแข็งแรง ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ชั้นโครงสร้างของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

(ที่มา: จาก <https://falconsurfacing.co.uk/typical-tarmac-surfacing-application>)

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการนำวัสดุดินลูกรัง จากแหล่ง อ.พรานกระต่าย จ.กำแพงเพชร มา ออกแบบอัตราส่วนผสมกับกับแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Reclaimed asphalt pavement, RAP) ที่ได้ จากการขุดไสผิวทางของโครงการก่อสร้างถนนทางหลวงหมายเลข 101 สายทางกำแพงเพชร-สุโขทัย ตอนแยก อ.ลานกระบือ-อ.คีรีมาศ จ.กำแพงเพชร กม. 33+000 - กม. 36+010 เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุ ชั้นรองพื้นทาง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ามา หมุนเวียนและนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์โดยเป็นวัสดุคัดเลือกทดแทนวัสดุทางธรรมชาติสำหรับชั้นรอง พื้นทางของถนน ซึ่งจะช่วยลดปริมาณวัสดุ ลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และช่วยประหยัดงบประมาณ ในการก่อสร้างงานทางถนน และมีคุณสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของวัสดุงานถนนของกรมทาง หลวง

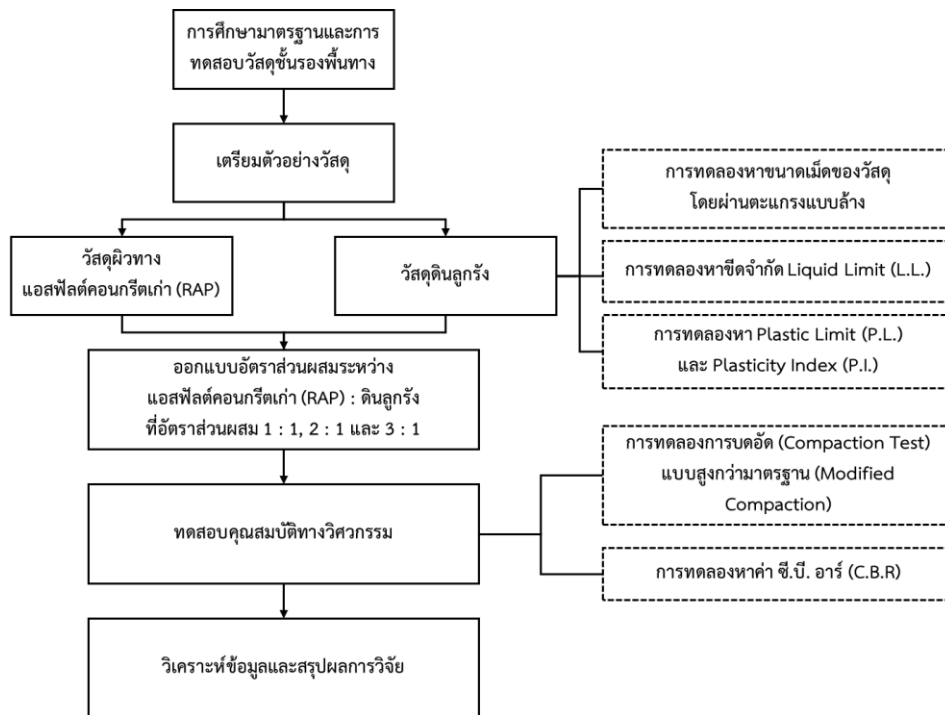
2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างดินลูกรังกับแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) สำหรับนำมาใช้ในการก่อสร้างเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ของถนน

2.2 เพื่อทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติการบดอัด (Compaction test) แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) และการทดสอบหาค่าซีบีอาร์ (CBR) ของดินลูกรังกับแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ที่ได้จากการออกแบบอัตราส่วนผสมระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) จากกระบวนการชุบไสผิวทางของโครงการก่อสร้างถนนทางหลวงหมายเลข 101 กม. 33+000 - กม. 36+010 สายทางกำแพงเพชร-สุโขทัย ตอนแยก อ.ลานกระบือ-อ.คีรีมาศ จ.กำแพงเพชร กับดินลูกรังจากแหล่ง อ.พรานกระต่าย จ.กำแพงเพชร ดำเนินงานตามมาตรฐานของกรมทางหลวง มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวมที่ ทล.-ม. 205/2532 โดยเน้นศึกษาคุณสมบัติด้านการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมจากการทดสอบการบดอัดด้วยวิธีการทดลอง Compaction Test ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 และการหาคุณสมบัติด้านกำลังรับน้ำหนักของวัสดุ ด้วยวิธีการทดลองเพื่อหาค่า C.B.R ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.ท. 109/2517 โดยแสดงขั้นตอนการศึกษาในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Reclaimed asphalt pavement, RAP)

วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Reclaimed asphalt pavement, RAP) ที่ได้จากการขุดไสผิวทางของโครงการก่อสร้างถนนทางหลวงหมายเลข 101 กม. 33+000 - กม. 36+010 สายทางกำแพงเพชร-สุโขทัย ตอนแยก อ.ลานกระบือ-อ.คีรีมาศ จ.กำแพงเพชร



ภาพที่ 4 การเก็บตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP)

3.1.2 ดินลูกรัง

ดินลูกรัง จากแหล่งหน้าสำรวจ 2786-3787 อ.พรานกระต่าย จ.กำแพงเพชร



ภาพที่ 5 ดินลูกรัง

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 เตรียมตัวอย่างวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) มาคัดแยกสิ่งเจือปนหรือเศษวัชพืชออกด้วยการล้างน้ำและตากผึ่งแดดให้แห้ง



ภาพที่ 6 การเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP)

3.2.2 เตรียมตัวอย่างดินลูกรัง โดยการคัดแยกเศษวัชพืชและสิ่งเจอปนออก จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมดังต่อไปนี้

(1) หาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล. -ท. 205/2517

(2) ประเมินหาขีดความชื้นเหลวของดิน (Atterberg's limit) ด้วยการทดสอบหาค่าขีดจำกัด Liquid limit (L.L.) ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล. -ท. 102/2515 และการทดสอบหาค่า Plasticity Index (P.I.) ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล. -ท. 103/2515



ภาพที่ 7 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินลูกรัง

3.2.3 เมื่อทดสอบคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าและดินลูกรังเรียบร้อยแล้ว นำข้อมูลมาทำการออกแบบส่วนผสมระหว่าง แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า : ดินลูกรัง ที่อัตราส่วนผสม 1 : 1, 2 : 1 และ 3 : 1

3.2.4 ทำการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตเท่ากับดินลูกรัง ตามอัตราส่วนผสมที่ได้ออกแบบ ด้วยการทดสอบการบดอัด (Compaction test) แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล. -ท. 108/2517



ภาพที่ 8 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

3.2.5 เมื่อได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับอัตราส่วนผสมที่ออกแบบแล้ว ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพกำลังรับน้ำหนักของวัสดุ ด้วยมาตรฐานการทดลองหาค่า CBR แบบแช่น้ำ (Soaked) จากมาตรฐานการทดลอง ทล. -ท. 109/2517



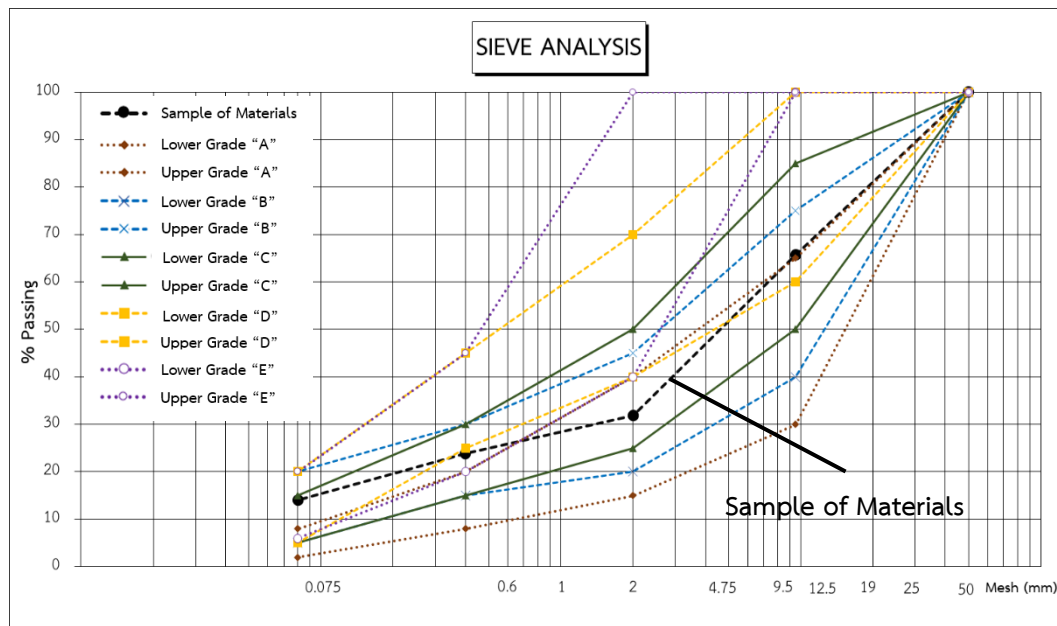
ภาพที่ 9 การทดลองหาค่า CBR แบบแช่น้ำ (Soaked)

4. ผลการวิจัย

จากการเก็บข้อมูลการทดสอบวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) กับดินลูกรัง สำหรับชั้นรองพื้นทาง สามารถวิเคราะห์ข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรม ดังนี้

4.1 ขนาดคละของดินลูกรัง

จากการทดสอบหาขนาดคละของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 205/2517 พบว่าขนาดคละของดินลูกรังจากแหล่งจังหวัดกำแพงเพชร จัดอยู่ในกลุ่ม “B” ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานวัสดุรองพื้นทาง (Subbase) ของกรมทางหลวง ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ขนาดคละของดินลูกรังจากแหล่งจังหวัดกำแพงเพชร

4.2 การประเมินค่าพิกัดขีดความชื้นเหลวของดิน (Atterberg's limit)

จากการเก็บข้อมูลการทดสอบหาขีดจำกัดเหลว Liquid limit (L.L.) ตามมาตรฐาน ทล. -ท. 102/2515 และการทดสอบหาค่าขีดจำกัดพลาสติก Plastic limit (P.L) และ Plasticity Index (P.I) ตามมาตรฐานที่ ทล. -ท. 103/2515 พบว่าคุณสมบัติของดินลูกรังมีค่า Liquid limit (L.L.) เท่ากับร้อยละ 30.00 Plastic limit (P.L) มีค่าเท่ากับร้อยละ 21.50 และ Plasticity index (P.I) มีค่าเท่ากับร้อยละ 8.60

4.3 การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับดินลูกรังกับแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP)

จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ทล. -ท. 108/2517 เป็นการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมระหว่างดินลูกรัง กับแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) สำหรับวัสดุชั้นรองพื้นทาง พบว่าที่อัตราส่วนผสมระหว่างดินลูกรัง : แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ที่อัตราส่วนผสม 1 : 1 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.215 กก./ลบ.ม. มีปริมาณน้ำร้อยละ 4.0 อัตราส่วนผสม 2 : 1 ค่า



ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.261 กก./ลบ.ม. ปริมาณน้ำร้อยละ 6.0 และอัตราส่วนผสม 3 : 1 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.191 กก./ลบ.ม. ปริมาณน้ำร้อยละ 7.6

4.4 การทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินลูกรังกับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP)

จากการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินลูกรังกับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล. -ท. 109/2517 ซึ่งเป็นการทดสอบหาค่าซีบีอาร์ (CBR) แบบแช่น้ำ (Soaked) ที่ 4 วัน พบว่า ที่อัตราส่วนร้อยละ 1 : 1, 2 : 1 และ 3 : 1 มีค่าร้อยละ 9.5, 28.4 และ 40.7 ตามลำดับ โดยพบว่าการแทนที่ด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ในอัตราส่วนร้อยละ 2 : 1 และ 3 : 1 ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักของวัสดุผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การศึกษาคุณสมบัติของอัตราส่วนผสมระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) กับดินลูกรัง เป็นการนำเอาวัสดุเก่าจากอุตสาหกรรมงานก่อสร้างถนนมาใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง ปริมาณความต้องการน้ำที่เหมาะสมลดลงเมื่อแทนที่ด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ในปริมาณที่มากขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเมื่อใช้อัตราส่วนผสมที่ร้อยละ 2 : 1 และมีค่ากำลังรับน้ำหนักที่ร้อยละ 28.4 หากเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ามากขึ้นที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 : 1 พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง แต่กำลังรับน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นที่ร้อยละ 40.7 ซึ่งทั้งสองอัตราส่วนผสมมีค่ากำลังรับน้ำหนักผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวงที่กำหนดให้ค่า CBR มากกว่าร้อยละ 25 สามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกในการก่อสร้างถนนในชั้นรองพื้นทางได้ ซึ่งเป็นประโยชน์ในด้านวิศวกรรมกรรมทาง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณนายภาณุพงศ์ เลี้ยงอิว นายมังกร แก้วพงศ์ และนายสุเทพ สุนแก้ว และสำนักทางหลวงที่ 4 จังหวัดตาก

7. เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวง. (2515). ทล. -ท. 102/2515 วิธีการทดสอบหาค่า Liquid Limit (L.L.) ของดิน
กรมทางหลวง. (2515). ทล. -ท. 103/2515 วิธีการทดสอบหาค่า Plastic Limit (P.L.) และ
Plasticity Index (P.I.) ของดิน
กรมทางหลวง. (2517). ทล. -ท. 108/2517 วิธีการทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่า
มาตรฐาน

- กรมทางหลวง. (2517). **ทล. -ท. 109/2517** วิธีการทดลองเพื่อหาค่า C.B.R
- กรมทางหลวง. (2517). **ทล. -ท. 205/2517** วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง
- กรมทางหลวง. (2532). **ทล. -ม. 205/2532** มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม
- จิรายุทธ สีสสุขและคณะ (2559). **กำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคของดินลูกรังเกือบตกชั้นคุณภาพปรับปรุงด้วยผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลและซีเมนต์**, ศูนย์วิจัยเพื่อความก้าวหน้าด้านวิศวกรรมโยธาและวัสดุก่อสร้าง, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์
- นิรชร นกแก้ว และ ดำรง ปาละกุล (2559). **สมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ต่างกัน**.วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 11(1), 28-37.
- Dinis-Almeida, M., Castro-Gomes, J., Sangiorgi, C., Zoorob, S., & Afonso, M. (2016). **Performance of Warm Mix Recycled Asphalt containing up to 100% RAP. Construction and Building Materials**, 112, 1-6.
- Izaks, R., Haritonovs, V., Klasa, I., & Zaumanis, M. (2015). **Hot Mix Asphalt with High RAP Content**. Procedia Engineering, 114, 676-684.
- Pawar, R., Patted, A., & Gowdabs, K. (2017, March). **Recycling of Bituminous Pavement by RAP Method**. Mangalore Institute of Technology & Engineering (ICGCSC-2017), Moodbidri, INDIA.
- Lertcuntapak, S. (2013). **Compressive strength of reclaimed asphalt pavement stabilized with cement** (Thesis), Suranaree University of Technology, Nakorn Ratchasima.
- Muthu, L.S., Geetha, S., & Selvakumar, M. (2021). **Predicting soaked C.B.R. of SC subgrade from dry density for light and heavy compaction**, **Materials Today: Proceedings**, 2021, 45(2), 1664-1670.

การเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอไนต์ เฟอริกออกไซด์
แมงกานีสไดออกไซด์ และนิเกิลออกไซด์ต่อลักษณะ
ที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส
CHANGE IN THE CONTENT OF BENTONITE, FERRIC OXIDE,
MANGANESE DIOXIDE, AND NICKEL OXIDE
ON THE APPEARANCE OF CERAMIC GLAZES
AT A TEMPERATURE OF 1230 DEGREES CELSIUS

จุมพฏ พงศ์ศักดิ์ศรี*, ปิยธิดา บุญเพชร, ศุภวิชญ์ บัวทอง, อุษา อินทร์ประสิทธิ์
Jumpot Phongsakri*, Piyathida Boonpet, Supawit Botbong, Usa Inprasit
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000
Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

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

วันที่เข้าระบบ 3 กันยายน 2567

วันที่แก้ไขบทความ 9 ธันวาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 11 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอไนต์ เฟอริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิเกิลออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสี และลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ โดยกำหนดเคลือบพื้นฐานที่มีส่วนผสมของ เฟลด์สปาร์ โดโลไมท์ แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว ควอตซ์ และใช้สารเพิ่มเติมแบบเจาะจง ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 9 ได้แก่ 1) เบนทอไนต์กับเฟอริกออกไซด์ 2) เบนทอไนต์กับแมงกานีสไดออกไซด์ และ 3) เบนทอไนต์กับนิเกิลออกไซด์ จำนวน 27 ส่วนผสม เผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส บรรยากาศแบบออกซิเดชัน ผลการวิจัยพบว่าเคลือบเซรามิกส์ทุกส่วนผสมมีโทนสีน้ำตาล มีลักษณะความมันแวววาวและกึ่งด้านกึ่งมัน และทุกสูตรมีความสมบูรณ์ไม่มีตำหนิ ส่วนผสมที่สามารถนำไปประยุกต์ปรับปรุงพัฒนาเคลือบในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ ประกอบด้วย เฟลด์สปาร์ ร้อยละ 45 โดโลไมท์ ร้อยละ 10 แคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 13 ดินขาว ร้อยละ 7 และควอตซ์ ร้อยละ 25 และสามารถใส่สารเพิ่มเติมในส่วนผสม ได้ดังนี้ 1) เบนทอไนต์ ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 6 ผสมกับเฟอริกออกไซด์ ร้อยละ 4 ถึงร้อยละ 9 2) เบนทอไนต์ ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 9 ผสมกับแมงกานีสไดออกไซด์ ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 9 และ 3) เบนทอไนต์ ร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 9 ผสมกับนิเกิลออกไซด์ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 5

คำสำคัญ: เคลือบเซรามิกส์, เบนทอไนต์, เฟอริกออกไซด์, แมงกานีสไดออกไซด์, นิเกิลออกไซด์

Abstract

This research aimed to study the changes in the amounts of bentonite, ferric oxide, manganese dioxide, and nickel oxide, as well as their effects on the color appearance and characteristics of ceramic glazes. The basic glaze formulation consisted of feldspar, dolomite, calcium carbonate, kaolin, and quartz. Specific additional substances, ranging from 1% to 9%, were incorporated into the glaze in the following combinations: 1) bentonite with ferric oxide, 2) bentonite with manganese dioxide, and 3) bentonite with nickel oxide, resulting in 27 distinct formulations. The glazes were fired at a temperature of 1230°C in an oxidation atmosphere. The results indicated that all glaze formulations exhibited brown tones with a glossy to semi-glossy finish and were defect-free. The most suitable formulations for potential application in the ceramic industry consisted of 45% feldspar, 10% dolomite, 13% calcium carbonate, 7% kaolin, and 25% quartz, with the following combinations of additives: 1) bentonite in the range of 1% to 6% mixed with ferric oxide (4% to 9%), 2) bentonite (1% to 9%) mixed with manganese dioxide (1% to 9%), and 3) bentonite (5% to 9%) mixed with nickel oxide (1% to 5%).

Keywords: Ceramics glaze, Bentonite, Ferric oxide, Manganese dioxide, Nickel oxide

1. บทนำ

เคลือบเซรามิกส์ (Ceramics glaze) เป็นสิ่งสำคัญที่ใช้เพิ่มความสวยงามและความเป็นเอกลักษณ์ให้กับเครื่องปั้นดินเผาทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรง ทนทาน และยังช่วยให้ล้างทำความสะอาดได้ง่าย เคลือบเซรามิกส์ คือชั้นแก้วบางๆที่เกิดจากการผสมกันของวัตถุดิบหลักๆ เช่น หินฟันม้า (Feldspar) หินเขี้ยวหนุมาน (Quartz) ดิน (Kaolin) โดยการบดให้เป็นผงผสมกับน้ำแล้วเคลือบบนผิวภาชนะแล้วจึงนำไปเผาให้หลอมละลายและเมื่อเย็นตัวจะกลายเป็นแก้วเคลือบผิวภาชนะอยู่ ชนิดของเคลือบมีหลายลักษณะซึ่งแตกต่างกันไปทั้งส่วนผสม การเผาและวิธีการใช้งาน และมีสมบัติที่แตกต่างกันซึ่งเคลือบที่เป็นพื้นฐานที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปได้แก่ เคลือบใส (Transparent glaze) นิยมใช้เคลือบทับภาชนะเครื่องปั้นดินเผาที่เขียนสีได้เคลือบ และยังสามารถผสมออกไซด์เพื่อเกิดสี หรือความทึบในตัวเคลือบได้ (สุขุมาล, 2564) ซึ่งการใช้เคลือบผสมออกไซด์ให้สีจะสร้างเคลือบให้มีสีที่หลากหลายในเนื้อเคลือบ และมีความน่าสนใจมากยิ่งขึ้นจึงเป็นที่นิยมของช่างปั้นและโดยทั่วไปสีสำเร็จรูปจะมีราคาสูงกว่าการใช้ออกไซด์ที่ให้สีตามธรรมชาติ (ไพจิตร, 2546) ซึ่งออกไซด์ที่



นิยมใช้ที่สุดชนิดหนึ่ง ได้แก่ เฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) เป็นออกไซด์ให้สี ในกลุ่มสีโทนน้ำตาล และยังมีแมงกานีสไดออกไซด์ (Manganese dioxide) นิกเกิลออกไซด์ (Nickel oxide) ที่ให้สีในโทนนี้ (สุขุมาล, 2564) เบนทอนไนต์ (Bentonite) มีสูตรทางเคมี คือ $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 9H_2O$ จัดตามสมบัติทางเคมีจะอยู่ในวัตุถุติบกลุ่มกลาง (Neutral group) (สมศักดิ์, 2549) ซึ่งมักจะพบการใช้เบนทอนไนต์ในสูตรเคลือบเนื่องจากเบนทอนไนต์มีลักษณะเด่น ในการเพิ่มความหนืดให้กับส่วนผสมเคลือบทำให้การเคลือบบนพื้นผิวผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ได้ง่ายขึ้นและ มีความสม่ำเสมอ ช่วยให้เคลือบตกตะกอนช้าลงทำให้เคลือบเกาะตัวแน่นกับผิวผลิตภัณฑ์เมื่อชุบเคลือบ และเมื่อเผาจะมีสีครีมอ่อน และยังช่วยสร้างสรรค์ผลงานเฉพาะตัวเพื่อให้ได้สูตรเคลือบที่มีลักษณะที่แตกต่างไปจากการใช้ออกไซด์ผสมเพื่อให้สีแบบเดิม (สุขุมาล, 2548)

จากข้อมูลดังกล่าวมาผู้วิจัยจึงสนใจในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอนไนต์ เฟอร์ริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิกเกิลออกไซด์ต่อลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส เพื่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอนไนต์ เฟอร์ริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิกเกิลออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสี และลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ ซึ่งจะทำได้ข้อมูลและแนวทางใหม่ๆ ในการพัฒนาสีเคลือบเซรามิกส์สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกส์ต่อไป ซึ่งผลจากงานวิจัยนี้จะเหมาะกับกลุ่มผู้ผลิตเซรามิกส์อุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือผู้ผลิตเซรามิกส์ระดับครัวเรือนที่ใช้ออกไซด์เป็นสารให้สีในส่วนผสมของเคลือบที่จัดเตรียมขึ้นเองโดยไม่ใช้สีสำเร็จรูปและมีส่วนผสมเนื้อผลิตภัณฑ์เดิมหรือเนื้อดินสำเร็จรูปที่ยังต้องเผาที่อุณหภูมิ 1230-1250 องศาเซลเซียส เนื่องจากสีสำเร็จรูปที่ใช้ผสมเคลือบโดยทั่วไปจะ กำหนดอุณหภูมิการเผาได้ไม่เกิน 1200 องศาเซลเซียส

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอนไนต์ เฟอร์ริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิกเกิลออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส

2.2 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอนไนต์ เฟอร์ริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิกเกิลออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะที่ปรากฏของผิวเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่องการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอนไนต์ เฟอร์ริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิกเกิลออกไซด์ต่อลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ในครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีการดำเนินการวิจัย ไว้ 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอไนต์ เฟอริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิเกิลออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดสูตรเคลือบเซรามิกส์พื้นฐานที่ใช้ในการผสมเป็นเคลือบใส ได้แก่ เฟลด์สปาร์ (Potash feldspar) ร้อยละ 45 โดโลไมท์ (Dolomite) ร้อยละ 10 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) ร้อยละ 13 ดินขาว (Kaolin) ร้อยละ 7 และควอตซ์ (Quartz) ร้อยละ 25

2. กำหนดอัตราส่วนผสมในการพัฒนาเคลือบเซรามิกส์ ได้แก่ 1) เบนทอไนต์ (Bentonite) 1) เฟอริกออกไซด์ (Ferric oxide) 2) แมงกานีสไดออกไซด์ (Manganese oxide) และ 3) นิเกิลออกไซด์ (Nickel oxide) โดยกำหนดปริมาณส่วนผสมใช้ในการทดลองเป็นแบบเจาะจง (Purposive sampling) จากการใช้ตารางคำนวณวัตถุดิบ 2 ชนิด (Biaxial blend) (สมศักดิ์, 2549) ซึ่งได้อัตราส่วนผสมในการวิจัยครั้งนี้ จำนวน 27 ส่วนผสม มีรายละเอียดดังนี้

1) เบนทอไนต์ ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 9 ผสมกับ เฟอริกออกไซด์ ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 9 จำนวน 9 ส่วนผสม

2) เบนทอไนต์ ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 9 ผสมกับ แมงกานีสไดออกไซด์ ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 9 จำนวน 9 ส่วนผสม

3) เบนทอไนต์ ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 9 ผสมกับ นิเกิลออกไซด์ ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 9 จำนวน 9 ส่วนผสม ดังตารางที่ 1 ถึง ตารางที่ 3

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมระหว่าง เบนทอไนต์กับเฟอริกออกไซด์

	BF1	BF2	BF3	BF4	BF5	BF 6	BF7	BF8	BF9
Bentonite	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ferric oxide	9	8	7	6	5	4	3	2	1
รวม	10	10	10	10	10	10	10	10	10

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมระหว่าง เบนทอไนต์กับแมงกานีสออกไซด์

	BM1	BM2	BM3	BM4	BM5	BM6	BM7	BM8	BM9
Bentonite	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Manganese oxide	9	8	7	6	5	4	3	2	1
รวม	10	10	10	10	10	10	10	10	10

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมระหว่าง เบนทอนไนต์ กับ นิเกิลออกไซด์

	BN1	BN2	BN3	BN4	BN5	BN6	BN7	BN8	BN9
Bentonite	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nickel oxide	9	8	7	6	5	4	3	2	1
รวม	10	10	10	10	10	10	10	10	10

3. ชั่งส่วนผสมๆ ละ 100 กรัม ด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิตอลบริษัท Mettler Toledo (0.001g) รุ่น PG203-S ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ และบดผสมด้วยเครื่องบดผสมความเร็วสูง (Hi-speed) ขนาดเล็กสูตรละ 5 นาที

4. ขึ้นรูปแผ่นทดลองสำหรับการเคลือบ (Test pieces) ขนาด 4x4 เซนติเมตร ด้วยดินสโตนแวร์สำเร็จรูปของบริษัท พอทเทอรี เคลย์จำกัด (Pottery clay) แล้วนำไปเผาดิบ (Biscuit firing) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

5. ปรับค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเคลือบอยู่ระหว่าง 1.40-1.45 และชุบเคลือบแผ่นทดลองโดยใช้เวลาในการชุบเคลือบบนแผ่นทดลอง 3 วินาที

6. เผาแผ่นทดลองที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศแบบออกซิเดชัน (Oxidation firing) ด้วยเตาเผาชนิดไฟฟ้าบริษัท Carbolite Gero Ltd. รุ่น CWF1300 ประเทศอังกฤษ ทำการเผาขึ้นไฟ เป็นเวลา 15 นาที วัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไพโรเมตริกเทอร์โมคัพเปิล (Pyrometric thermocouple) และนำแผ่นทดลองออกจากเตาไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส

7. วิเคราะห์การเกิดสีของเคลือบ ดังนี้ 1) สังกเกตสีเคลือบจากแผ่นทดลอง 2) สีเคลือบที่สแกน (Scan) ด้วยเครื่อง Colorimeter Linshang รุ่น LS171 ประเทศจีน ได้แก่ รูปแบบรหัสสีตามเฉดสีของ RAL-LS color chart (RAL color standard) ซึ่งเป็นระบบมาตรฐานสีที่พัฒนาโดยสถาบัน RAL (Reichsausschuss für Lieferbedingungen)

8. วิเคราะห์ทดสอบค่าสีและความสว่างของเคลือบด้วยเครื่อง Chroma Meter รุ่น CR-400 บริษัท Konica Minolta ประเทศญี่ปุ่น ในระบบสเกลสี (Color Scale) L^* , a^* , และ b^* ของ Hunter Lab Scale ซึ่งเป็นระบบการวิเคราะห์สีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว จนถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว ($-a^*$) ไปจนถึงแดง ($+a^*$) ส่วนแกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน ($-b^*$) ไปเหลือง ($+b^*$) (ไพจิตร, 2546)

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอนไนต์ เฟอริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิเกิลออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะที่ปรากฏของผิวเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส มีขั้นตอนดังนี้

1. นำแผ่นทดลองที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาศึกษาวิเคราะห์ 3 ประเด็นดังนี้ 1) วิเคราะห์ลักษณะของผิวเคลือบ 2) วิเคราะห์ค่าระดับความมันเงาของผิวเคลือบเซรามิกส์ และ 3) วิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบ

2. วิเคราะห์ลักษณะของผิวเคลือบ โดยกำหนดลักษณะเคลือบเป็น 4 ลักษณะ ได้แก่ 1) ผิวเคลือบมีลักษณะมันแวววาว (Bright) โดยใช้การสังเกตที่ผิวเคลือบแวววาวสะท้อนแสงได้ดี 2) ผิวเคลือบมีลักษณะกึ่งมันกึ่งด้าน (Semi mat) 3) ผิวเคลือบมีลักษณะด้าน (Mat) โดยใช้การสังเกตที่ผิวเคลือบหลอมสุกตัวแล้วมีผิวด้านไม่สะท้อนแสง 4) ผิวเคลือบมีลักษณะไม่สุกตัว (Un fused) โดยการใช้การสังเกตที่ผิวเคลือบไม่หลอมละลาย (ไพจิตร, 2547)

3. วิเคราะห์ค่าระดับความมันเงาของผิวเคลือบด้วยเครื่องวัดความเงา (Gloss meter) รุ่น YG60S/3NH ประเทศจีน มีหน่วยวัดเป็น Gloss unit (GU)

4. วิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบ เป็นการวิเคราะห์ผิวเคลือบตามลักษณะการเกิดตำหนิของเคลือบซึ่งแต่ละลักษณะของการเกิดตำหนิ 11 ลักษณะ จะช่วยให้สามารถตรวจสอบและคัดแยกข้อบกพร่องต่างๆ ได้ โดยตรวจสอบผิวเคลือบด้วยการมองด้วยตาเปล่าตามเกณฑ์ มผช. 930/2556 ประกอบกับการพิจารณาตำหนิที่ผิวเคลือบโดยที่ผิวเคลือบสมบูรณ์ต้องไม่มีตำหนิ (Glaze defects) 11 ลักษณะ (ไพจิตร, 2552; ดร.ณิ และสุธี, 2552; สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2556) ดังตารางที่ 4

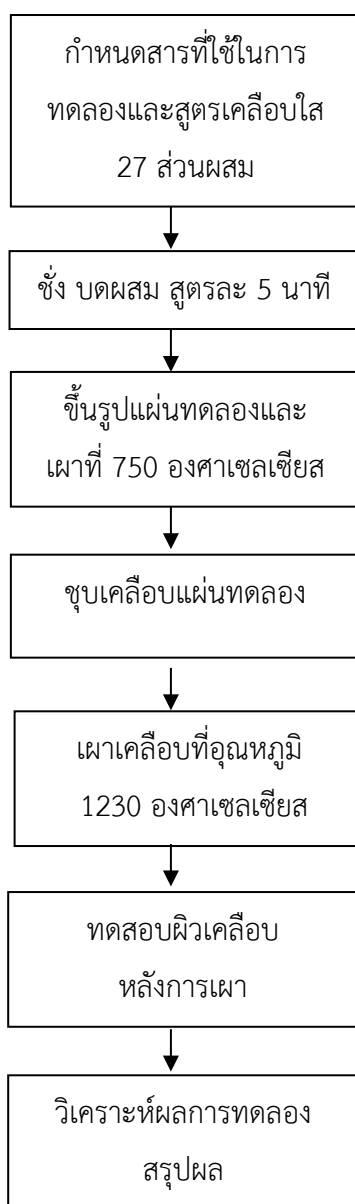
ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบ

หัวข้อตำหนิ (Glaze defects)	คำอธิบาย	การวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบตามแนว มผช.930/2556
1. รูเข็ม (Pinhole)	จะพบรู หรือช่องว่างที่มองเห็นได้ชัดเจนบนผิวเคลือบ โดยอาจมีจุดหลุมขนาดเล็กกระจายทั่วผิว	ผิวเคลือบต้องไม่มีรูเข็มที่มีขนาดเกิน 0.5 มิลลิเมตร รูเข็มที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.5 มิลลิเมตร หรือมีรูเข็มมากเกินไป
2. รอยแตกร้าวที่ผิวเคลือบ (Crazing)	จะพบการแตกร้าวเล็ก ๆ บนผิวเคลือบ	ผิวเคลือบจะต้องไม่เกิดรอยแตกร้าว หรือรอยแยก
3. การหดตัวของเคลือบ (Crawling)	จะพบเคลือบหดตัวหรือแยกหรือร่นหรือดึงตัวเป็นก้อนทำให้เกิดช่องว่างเคลือบไม่ติดกับเนื้อดิน	เคลือบต้องไม่หดตัวหรือแยกออกจากพื้นผิวเนื้อดินปั้น
4. เคลือบไหล (Running of glaze)	จะพบผิวเคลือบที่ไหลตัวมากเกินไป ไม่เกาะผิวผลิตภัณฑ์ บางครั้งอาจหรือเส้นรอยการไหล	เคลือบต้องไม่ไหลมากเกินไป



หัวข้อตำหนิ (Glaze defects)	คำอธิบาย	การวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของ ผิวเคลือบตามแนว มผช.930/2556
5. การแตกลิ๊กของเคลือบ (Dunting)	จะพบรอยแตกที่ลึกและยาวบนผิวเคลือบเป็นแนวเส้นตรงเกิดรอยลึกถึงเนื้อผลิตภัณฑ์	การแตกลิ๊กของเคลือบต้องไม่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์
6. ขอบเป็นสีดำ (Black top rim)	จะพบสีดำคล้ำในบางส่วนของเคลือบหรือเกิดขึ้นตามขอบของชิ้นงานหรือมีลักษณะเป็นเส้นๆสีดำ ที่ขอบของชิ้นงาน	ขอบของเครื่องปั้นดินเผาต้องไม่ปรากฏเป็นสีดำที่มีผลกระทบต่อความสวยงามหรือความทนทานของผลิตภัณฑ์
7. เคลือบเดือดหรือพุพอง (Boiling or blistering)	จะพบเคลือบเป็นหลุมเดือดเป็นฟองมีผิวขรุขระ การพุพองจะมีขนาดใหญ่มองเห็นได้บนผิวเคลือบ	ผิวเคลือบของเครื่องปั้นดินเผาต้องไม่เกิดการพุพองหรือหลุมเดือดที่มีขนาดใหญ่หรือมองเห็นได้อย่างชัดเจน
8. เคลือบเกิดสภาพขุ่น (Devitrification)	จะพบเคลือบที่ควรใสกลับเกิดการตกผลึกขุ่นเป็นฝ้าดูทึบหรือไม่เงาสดใส ทำให้ไม่สามารถมองเห็นพื้นผิวของเซรามิกส์ได้อย่างชัดเจน	เคลือบต้องไม่เกิดการตกผลึกที่ทำให้เคลือบขุ่นหรือทึบ ซึ่งจะทำให้ผิวเคลือบไม่ใสและไม่สามารถมองเห็นพื้นผิวของเซรามิกส์ได้อย่างชัดเจน
9. การหลุดร่อนของเคลือบ (Peeling or shivering)	จะพบเคลือบกะเทาะร่อนหรือแตกร่อนบริเวณริมขอบหรือมุมของชิ้นงานหลุดออกเป็นชิ้นๆ	ผิวเคลือบต้องไม่เกิดการหลุดร่อนหรือการแตกร่อนจากเนื้อดิน โดยเฉพาะบริเวณขอบหรือมุมของผลิตภัณฑ์
10. เกิดฟองอากาศในเคลือบ (Air bubble)	จะพบฟองอากาศกระจายตัวในชั้นเคลือบ ซึ่งทำให้ผิวเคลือบมีลักษณะไม่เรียบ บางครั้งจะทำให้ผิวเคลือบแตกหัก	ผิวเคลือบต้องไม่เกิดฟองอากาศที่มองเห็นได้ชัดเจนหรือฟองที่ทำให้ผิวเคลือบมีลักษณะไม่เรียบและขรุขระ
11. เคลือบลักษณะของผิวส้ม (Orange peel)	มีลักษณะเป็นปุ่มหรือคลื่นนูนเล็กๆ เหมือนกับเปลือกส้ม และอาจมีจุดรูเข็มเล็กๆกระจายอยู่บนพื้นผิว	ผิวเคลือบของเครื่องปั้นดินเผาต้องมีลักษณะที่เรียบเนียนและไม่ขรุขระไม่มีมีจุดรูเข็มเล็กๆกระจายอยู่บนพื้นผิว

วิธีดำเนินการวิจัยเรื่องการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอนไนต์ เพอร์ริกออกไซด์ แมงกานีส ไดออกไซด์ และนิเกิลออกไซด์ต่อลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้



ภาพที่ 1 ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย














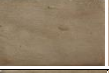










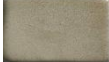
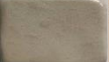

4. ผลการวิจัย

การวิจัยเรื่องการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอนต์ เพอร์ริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิเกิลออกไซด์ต่อลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ในครั้งนี้ ภายหลังจากดำเนินการทดลองมีผลการวิจัยดังนี้

1. ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอไนต์ เพอร์ริกออกไซด์ แมงกานีส ไดออกไซด์ และนิเกิลออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศา มีรายละเอียดผลการศึกษาวิจัย ดังนี้

1.1 ผลการวิเคราะห์การเกิดสีของเคลือบเซรามิกส์ภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส มีผลการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเกิดสีของเคลือบเซรามิกส์

สูตร ที่	แผ่น ทดลอง	RGB	RAL	สูตร ที่	แผ่น ทดลอง	RGB	RAL	สูตร ที่	แผ่น ทดลอง	RGB	RAL
BF1		RGB: 125, 94, 74	RAL-LS 8007	BM1		RGB: 163, 119, 90	RAL-LS 8000	BN1		RGB: 167, 154, 123	RAL-LS 7034
BF2		RGB: 123, 95, 69	RAL-LS 8007	BM2		RGB: 177, 134, 103	RAL-LS 8000	BN2		RGB: 159, 147, 116	RAL-LS 1020
BF3		RGB: 155, 127, 93	RAL-LS 7008	BM3		RGB: 184, 141, 109	RAL-LS 1036	BN3		RGB: 160, 149, 116	RAL-LS 1020
BF4		RGB: 156, 125, 96	RAL-LS 7008	BM4		RGB: 203, 170, 138	RAL-LS 1036	BN4		RGB: 155, 143, 112	RAL-LS 1020
BF5		RGB: 169, 139, 98	RAL-LS 1020	BM5		RGB: 204, 172, 140	RAL-LS 1000	BN5		RGB: 164, 150, 118	RAL-LS 1020
BF6		RGB: 176, 145, 108	RAL-LS 1020	BM6		RGB: 206, 177, 147	RAL-LS 1000	BN6		RGB: 166, 147, 116	RAL-LS 1036
BF7		RGB: 198, 167, 133	RAL-LS 1001	BM7		RGB: 207, 179, 151	RAL-LS 1000	BN7		RGB: 153, 133, 106	RAL-LS 1036
BF8		RGB: 194, 167, 128	RAL-LS 1001	BM8		RGB: 205, 178, 151	RAL-LS 1035	BN8		RGB: 163, 132, 103	RAL-LS 1036
BF9		RGB: 208, 187, 159	RAL-LS 1014	BM9		RGB: 211, 188, 167	RAL-LS 7032	BN9		RGB: 173, 133, 99	RAL-LS 1036

จากตารางที่ 5 พบว่าการเกิดสีของเคลือบเซรามิกส์ทุกส่วนผสมอยู่ในโทนสีน้ำตาล แบ่งตามส่วนผสมได้ดังนี้ 1. ส่วนผสมระหว่าง เบนทอไนต์ ผสมกับ เพอร์ริกออกไซด์ ทั้งหมดมีโทนสีน้ำตาล แบ่งตาม RAL-LS color chart ได้ 5 เฉดสี คือ 1) Ral-Ls 8007 2) Ral-Ls 7008 3) Ral-Ls 1020 4) Ral-Ls 1001 และ 5) Ral-Ls 1014 2. ส่วนผสมระหว่างเบนทอไนต์ ผสมกับ แมงกานีส ไดออกไซด์ ทั้งหมดมีโทนสีน้ำตาล แบ่งตาม RAL-LS color chart ได้ 5 เฉดสี คือ 1) Ral-Ls 8000 2) Ral-Ls 1036 3) Ral-Ls 1000 4) Ral-Ls 1035 และ 5) Ral-Ls 7032 และ 3. ส่วนผสมระหว่าง เบนทอไนต์ ผสมกับ นิเกิลออกไซด์ ทั้งหมดมีโทนสีน้ำตาล แบ่งตาม RAL-LS color chart ได้ 3 เฉดสี คือ 1) Ral-Ls 7034 2) Ral-Ls 1020 3) Ral-Ls 1036

1.2 ผลการทดสอบความสว่างและค่าสีของเคลือบเซรามิกส์ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส มีผลการทดสอบดังตารางที่ 6 และภาพที่ 2

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบความสว่าง (L*) และค่าสี (a*) (b*) ของเคลือบเซรามิกส์

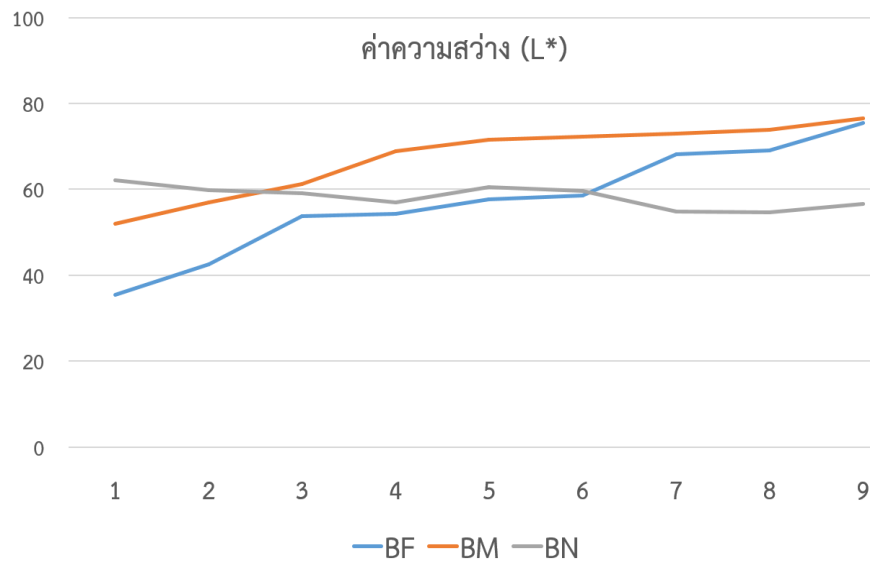
สูตร ที่	ค่าความ สว่าง (L*)	ค่าสี a*	ค่าสี b*	สูตร ที่	ค่าความ สว่าง (L*)	ค่าสี a*	ค่าสี b*	สูตร ที่	ค่าความ สว่าง (L*)	ค่าสี a*	ค่าสี b*
BF1	35.46	6.48	22.55	BM1	52.04	6.43	29.54	BN1	62.08	-8.00	22.19
BF2	42.50	1.34	24.15	BM2	57.00	5.03	28.56	BN2	59.80	-7.98	22.10
BF3	53.78	0.57	26.75	BM3	61.23	3.80	27.68	BN3	59.17	-7.88	22.51
BF4	54.31	0.45	25.53	BM4	68.83	0.83	26.34	BN4	57.04	-6.63	21.69
BF5	57.66	-0.88	30.38	BM5	71.51	0.06	25.53	BN5	60.51	-6.59	22.16
BF6	58.63	-1.27	29.78	BM6	72.24	-0.74	24.40	BN6	59.66	-4.79	22.75
BF7	68.24	-2.70	26.83	BM7	73.05	-1.40	22.61	BN7	54.84	-2.17	20.72
BF8	69.09	-3.14	27.24	BM8	73.89	-1.11	22.55	BN8	54.74	1.44	24.64
BF9	75.39	-3.96	23.07	BM9	76.51	-2.31	20.28	BN9	56.66	4.54	28.08

จากตารางที่ 6 ผลการทดสอบเคลือบเซรามิกส์ทุกส่วนผสม มีค่าความสว่าง (L*) อยู่ที่ 60.96 มีค่าสี a* อยู่ระหว่าง 6.48 ถึง -8.00 โดยที่ค่า a บวก* (6.48) จะแสดงถึงโทนสีที่มีความแดงหรือน้ำตาลแดง ซึ่งทำให้สีเคลือบมีลักษณะที่อบอุ่นหรือเข้มข้น และค่า a ลบ* (-8.00) จะแสดงถึงโทนสีเขียว ซึ่งจะทำให้สีเคลือบมีลักษณะที่เย็นลงและลดความเข้มของสีลง ซึ่งความแตกต่างนี้จะทำให้สีเคลือบมีความหลากหลายจากโทนสีอบอุ่น (แดงหรือน้ำตาลแดง) ไปจนถึงโทนเย็น (เขียว) และค่าสี b* อยู่ระหว่าง 20.28 ถึง 30.38 โดยค่า b บวก* (20.28 ถึง 30.38) แสดงถึงโทนสีเหลือง ซึ่งทำให้สีเคลือบมีความเข้มขึ้นของสีเหลือง และเมื่อแบ่งตามส่วนผสมได้ผลการทดสอบดังนี้

1. ส่วนผสมระหว่าง เบนทอไนต์ผสมกับเฟอร์ริกออกไซด์ มีค่าความสว่าง (L*) อยู่ระหว่าง 35.46 ถึง 75.39 หรือเฉลี่ยความสว่างที่ 57.23 ค่าสี a* อยู่ระหว่าง 6.48 ถึง -3.96 และค่าสี b* อยู่ระหว่าง 22.55 ถึง 30.38

2. ส่วนผสมระหว่างเบนทอไนต์ผสมกับแมงกานีสไดออกไซด์ มีค่าความสว่าง (L*) อยู่ระหว่าง 52.04 ถึง 76.51 หรือเฉลี่ยความสว่างที่ 67.37 ค่าสี a* อยู่ระหว่าง 6.43 ถึง -2.31 และค่าสี b* อยู่ระหว่าง 20.28 ถึง 29.54

3. ส่วนผสมระหว่างเบนทอไนต์ผสมกับนิเกิลออกไซด์ มีค่าความสว่าง (L^*) อยู่ระหว่าง 54.74 ถึง 62.08 หรือเฉลี่ยความสว่างที่ 58.27 ค่าสี a^* อยู่ระหว่าง 4.54 ถึง -8.00 และค่าสี b^* อยู่ระหว่าง 20.72 ถึง 28.08



ภาพที่ 2 กราฟค่าความสว่าง (L^*) ส่วนผสม BF BM และBN

2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอไนต์ เฟอร์ริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิเกิลออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะที่ปรากฏของผิวเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส มีผลดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของผิวเคลือบ ระดับความมัน (GU) และความสมบูรณ์ของเคลือบเซรามิกส์

สูตรที่	ลักษณะ	GU	ความสมบูรณ์	สูตรที่	ลักษณะ	GU	ความสมบูรณ์	สูตรที่	ลักษณะ	GU	ความสมบูรณ์
BF1	แวววาว	65	ไม่มีตำหนิ	BM1	แวววาว	83	ไม่มีตำหนิ	BN1	กึ่งด้าน กึ่งมัน	33	ไม่มีตำหนิ
BF2	แวววาว	63	ไม่มีตำหนิ	BM2	แวววาว	77	ไม่มีตำหนิ	BN2	กึ่งด้าน กึ่งมัน	35	ไม่มีตำหนิ
BF3	แวววาว	63	ไม่มีตำหนิ	BM3	แวววาว	76	ไม่มีตำหนิ	BN3	กึ่งด้าน กึ่งมัน	39	ไม่มีตำหนิ



สูตร ที่	ลักษณะ	GU	ความ สมบูรณ์	สูตร ที่	ลักษณะ	GU	ความ สมบูรณ์	สูตร ที่	ลักษณะ	GU	ความ สมบูรณ์
BF4	แวววาว	64	ไม่มีตำหนิ	BM4	แวววาว	76	ไม่มีตำหนิ	BN4	กึ่งด้าน กึ่งมัน	42	ไม่มีตำหนิ
BF5	แวววาว	63	ไม่มีตำหนิ	BM5	แวววาว	74	ไม่มีตำหนิ	BN5	แวววาว	54	ไม่มีตำหนิ
BF6	แวววาว	62	ไม่มีตำหนิ	BM6	แวววาว	64	ไม่มีตำหนิ	BN6	แวววาว	56	ไม่มีตำหนิ
BF7	กึ่งด้าน กึ่งมัน	46	ไม่มีตำหนิ	BM7	แวววาว	64	ไม่มีตำหนิ	BN7	แวววาว	64	ไม่มีตำหนิ
BF8	กึ่งด้าน กึ่งมัน	45	ไม่มีตำหนิ	BM8	แวววาว	63	ไม่มีตำหนิ	BN8	แวววาว	65	ไม่มีตำหนิ
BF9	กึ่งด้าน กึ่งมัน	45	ไม่มีตำหนิ	BM9	แวววาว	62	ไม่มีตำหนิ	BN9	แวววาว	66	ไม่มีตำหนิ

จากตารางที่ 7 พบว่าทุกส่วนผสมลักษณะของเคลือบ มีความมันแวววาวและกึ่งด้านกึ่งมัน โดยส่วนผสมที่ผิวมีความมันแวววาวจะมีค่าระดับความมันของผิวเคลือบ Gloss unit (GU) มีค่าความเงาอยู่ระหว่าง 54 GU ถึง 83 GU และส่วนผสมที่มีลักษณะกึ่งด้านกึ่งมัน มีค่าความเงาอยู่ระหว่าง 33 GU ถึง 46 GU และทุกสูตรส่วนผสมมีความสมบูรณ์ไม่มีตำหนิ

แบ่งตามส่วนผสมได้ดังนี้ 1. ส่วนผสมระหว่าง เบนทอไนต์ ผสมกับ เพอร์ริกออกไซด์ มีผลการวิเคราะห์สรุปดังนี้ 1) ลักษณะของเคลือบ สูตรที่มีความมันแวววาว ได้แก่ สูตร BF1 ถึง BF6 สูตรที่มีลักษณะกึ่งด้านกึ่งมัน ได้แก่ สูตร BF7 ถึง BF9 2) ค่าระดับความมันของผิวเคลือบ Gloss unit (GU) มีค่าความเงาอยู่ระหว่าง 45 GU ถึง 65 GU และ 3) ทุกสูตรมีความสมบูรณ์ไม่มีตำหนิ 2. ส่วนผสมระหว่างเบนทอไนต์ ผสมกับ แมงกานีสไดออกไซด์ มีผลการวิเคราะห์สรุปดังนี้ 1) ลักษณะของเคลือบทุกสูตรส่วนผสมมีความมันแวววาว 2) ค่าระดับความมันของผิวเคลือบ Gloss unit (GU) มีค่าความเงาอยู่ระหว่าง 62 GU ถึง 83 GU และ 3) ทุกสูตรมีความสมบูรณ์ไม่มีตำหนิ 3. ส่วนผสมระหว่างเบนทอไนต์ ผสมกับ นิเกิลออกไซด์ มีผลการวิเคราะห์สรุปดังนี้ 1) ลักษณะของเคลือบ สูตรที่มีลักษณะกึ่งด้านกึ่งมัน ได้แก่ สูตร BN1 ถึง BN4 สูตรที่มีความมันแวววาว ได้แก่ สูตร BN5 ถึง BN9 2) ค่าระดับความมันของผิวเคลือบ Gloss unit (GU) มีค่าความเงาอยู่ระหว่าง 33 GU ถึง 66 GU และ 3) ทุกสูตรมีความสมบูรณ์ไม่มีตำหนิ

จากผลการทดลองที่มีการแปรผันปริมาณของเบนทอไนต์ร่วมกับออกไซด์ให้สีทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เพอร์ริกออกไซด์, แมงกานีสไดออกไซด์ และนิเกิลออกไซด์ สามารถสรุปแนวโน้มของผลการทดลองดังนี้

1. การเพิ่มปริมาณเบนทอไนต์ในส่วนผสมเคลือบจะมีแนวโน้มส่งผลทำให้สีเคลือบมีความเข้มข้นไปในโทนสีแดงน้ำตาล และมีแนวโน้มลดความมันแวววาวของเคลือบเมื่อลดปริมาณการใช้เฟอร์ริกออกไซด์ในส่วนผสม หรือมีปริมาณของนิกเกิลออกไซด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เคลือบมีลักษณะกึ่งด้านกึ่งมัน และมีแนวโน้มเพิ่มความมันแวววาวของเคลือบเมื่อผสมกับแมงกานีสไดออกไซด์ และลดปริมาณการใช้นิกเกิลออกไซด์

2. การปรับอัตราส่วนผสมของออกไซด์ให้สีในสูตรเคลือบเซรามิกส์จากผลการทดลองพบว่า มีแนวโน้มส่งผลต่อลักษณะของสีและความสว่างของเคลือบ สูตรที่มีเฟอร์ริกออกไซด์และแมงกานีสไดออกไซด์ (BF, BM) จะมีค่าความสว่างสูงกว่า สีอยู่ในโทนแดงน้ำตาล และค่าสี b^* ที่สูง (สีเหลือง) สูตรที่ผสมกับนิกเกิลออกไซด์ (BN) จะมีความสว่างปานกลาง สีอยู่ในโทนเขียว และค่าสี b^* ที่ต่ำกว่าทำให้สีเคลือบมีลักษณะหม่น

5. อภิปรายผล

การวิจัยเรื่องการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอไนต์ เฟอร์ริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิกเกิลออกไซด์ต่อลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียสในครั้งนี้ ภายหลังจากดำเนินการทดลองสามารถอภิปรายผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์การวิจัยได้ ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอไนต์ เฟอร์ริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิกเกิลออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส อภิปรายผลการวิจัยได้ ดังนี้

1.1 การเกิดสีของเคลือบเซรามิกส์ทุกส่วนผสมอยู่ในโทนสีน้ำตาล ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีคือ เฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) แมงกานีสไดออกไซด์ (Manganese dioxide) นิกเกิลออกไซด์ (Nickel oxide) เป็นออกไซด์ให้สีในกลุ่มสีโทนน้ำตาล (สุขุมาล, 2564) และสอดคล้องกับงานวิจัยของ กฤตยชญ์ และคณินนิต (2559) ที่พบว่า เคลือบเซรามิกซีไ่มันสำปะหลังโดยใช้เฟอร์ริกออกไซด์จะให้สีน้ำตาลแดง ส่วนเบนทอไนต์ (Bentonite) มีสูตรทางเคมี คือ $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 9H_2O$ เมื่อเผาจะมีสีครีมอ่อน และนิกเกิลออกไซด์จะให้สีน้ำตาลอมเขียว (สุขุมาล, 2548)

1.2 ผลการทดสอบความสว่างและค่าสีของเคลือบเซรามิกส์ ทุกส่วนผสม มีค่าความสว่าง (L^*) เฉลี่ยอยู่ที่ 60.96 มีค่าสี a^* อยู่ระหว่าง 6.48 ถึง -8.00 และ มีค่าสี b^* อยู่ระหว่าง 20.28 ถึง 30.38 ซึ่งเป็นไปตามอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง แต่มีข้อสังเกตว่าส่วนผสมระหว่างเบนทอไนต์ผสมกับเฟอร์ริกออกไซด์ และส่วนผสมระหว่างเบนทอไนต์ผสมกับแมงกานีสไดออกไซด์ จะมีค่าความสว่าง (L^*) เป็นไปตามลำดับการใช้ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเฟอร์ริกออกไซด์กับแมงกานีสไดออกไซด์ แต่ในส่วนผสมระหว่างเบนทอไนต์ผสมกับนิกเกิลออกไซด์ มีค่าความ

สว่าง (L^*) ใกล้เคียงกัน โดยเฉลี่ยมีค่าความสว่างอยู่ที่ 58.27 สอดคล้องกับ สุขุมาล (2564) ที่กล่าวว่า สีที่เกิดจากนิเกิลออกไซด์จะเป็นสีน้ำตาลที่ค่อนข้างหม่นไม่สดใส

2. การเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอนไนต์ เพอร์ริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิเกิลออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะที่ปรากฏของผิวเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส อภิปรายผลการวิจัยได้ ดังนี้

ผลการศึกษาลักษณะของผิวเคลือบ ระดับความมัน และความสมบูรณ์ของผิวเคลือบเซรามิกส์ พบว่า ส่วนผสมลักษณะของเคลือบเซรามิกส์มีความมันแวววาว และมีผิวกึ่งด้านกึ่งมัน โดยส่วนผสมที่ผิวมีความมันแวววาวจะมีค่าระดับความมันของผิวเคลือบ Gloss unit (GU) มีค่าความเงาอยู่ระหว่าง 54 GU ถึง 83 GU และส่วนผสมที่มีลักษณะกึ่งด้านกึ่งมัน มีค่าความเงาอยู่ระหว่าง 33 GU ถึง 46 GU และทุกสูตรส่วนผสมมีความสมบูรณ์ไม่มีตำหนิ โดยที่ส่วนผสมระหว่างเบนทอนไนต์ผสมกับเพอร์ริกออกไซด์ ที่ลักษณะของเคลือบมีความมันแวววาว ได้แก่ สูตร BF1 ถึง BF6 สูตรที่มีลักษณะกึ่งด้านกึ่งมัน ได้แก่ สูตร BF7 ถึง BF9 และสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศิริมา (2557) ที่พบว่าสาเหตุที่เคลือบมีความมันวาวนั้นเพราะมีส่วนประกอบของวัตถุดิบกลุ่มต่างปริมาณมาก โดยในสูตรเคลือบพื้นฐานจะมีปริมาณกลุ่มต่างรวม ร้อยละ 68 แบ่งเป็น เฟลด์สปาร์ ร้อยละ 45 โดโลไมท์ ร้อยละ 10 และ แคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 13 สอดคล้องกับ สมศักดิ์ (2549) ที่กล่าวว่า เบนทอนไนต์ (Bentonite) มีสูตรทางเคมี คือ $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 9H_2O$ จัดตามสมบัติทางเคมีจะอยู่ในวัตถุดิบกลุ่มกลาง (Neutral group) มีผลให้เป็นตัวทนไฟในเคลือบลดความมันแวววาวของเคลือบ และสอดคล้องกับ ปริดา (2547) ที่กล่าวว่า เพอร์ริกออกไซด์ เป็นตัวช่วยลดจุดหลอมตัวของเคลือบ ดังนั้นเมื่อลดปริมาณการใช้เพอร์ริกออกไซด์ในส่วนผสมจึงส่งผลให้เคลือบมีลักษณะกึ่งด้านกึ่งมัน ในขณะที่ส่วนผสมระหว่างเบนทอนไนต์ผสมกับนิเกิลออกไซด์ ลักษณะของเคลือบ สูตรที่มีลักษณะกึ่งด้านกึ่งมัน ได้แก่ สูตร BN1 ถึง BN4 จะสอดคล้องกับ สุขุมาล (2564) ที่กล่าวว่า การเผาเคลือบในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น การผสมนิเกิลปริมาณมากจะช่วยเพิ่มจุดสุกตัวของเคลือบให้สูงขึ้นเนื่องจากมีความทนไฟสูง ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้นิเกิลออกไซด์ในส่วนผสมเคลือบจึงส่งผลให้เคลือบมีลักษณะกึ่งด้านกึ่งมัน และส่วนผสมที่หลอมตัวได้ดีมีความมันแวววาว สอดคล้องกับงานวิจัยของ ปราโมทย์ (2552) ที่พบว่าสูตรเคลือบที่มีการหลอมตัวสมบูรณ์ มีความมันแวววาวเนื่องจากมีส่วนผสมของเฟลด์สปาร์และหินปูนในปริมาณมาก ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยการหลอมตัวในเคลือบ และมีดินขาวในปริมาณน้อยทำให้เคลือบเกิดการหลอมตัวได้ดีมีความมันแวววาว ที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส และสอดคล้องกับงานวิจัยของ รมลรัตน์ (2565) ที่พบว่าเมื่อใช้เฟลด์สปาร์ชนิดโพแทส (Potash) ปริมาณมากในส่วนผสมของเคลือบจะมีบทบาทสำคัญต่อการหลอมตัวของเคลือบ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ พรชัย (2558) ที่

พบว่าอัตราส่วนผสมของเคลือบที่เหมาะสมหลอมละลายได้ดีจะมีส่วนผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตในสูตรเคลือบ ร้อยละ 6 ถึง ร้อยละ 9

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยเรื่องการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอนไนต์ เพอร์ริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิเกิลออกไซด์ต่อลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียสในครั้งนี้ ภายหลังจากดำเนินการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัย แบ่งออกเป็น 2 ด้านดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอนไนต์ เพอร์ริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิเกิลออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1.1 การเกิดสีของเคลือบเซรามิกส์ทุกส่วนผสมอยู่ในโทนสีน้ำตาล แบ่งตามส่วนผสมได้ดังนี้ 1. ส่วนผสมระหว่างเบนทอนไนต์ผสมกับเพอร์ริกออกไซด์ ทั้งหมดมีโทนสีน้ำตาล แบ่งตาม RAL-LS color chart ได้ 5 เฉดสี คือ 1) Ral-Ls 8007 2) Ral-Ls 7008 3) Ral-Ls 1020 4) Ral-Ls 1001 และ 5) Ral-Ls 1014 2. ส่วนผสมระหว่างเบนทอนไนต์ผสมกับแมงกานีสไดออกไซด์ ทั้งหมดมีโทนสีน้ำตาล แบ่งตาม RAL-LS color chart ได้ 5 เฉดสี คือ 1) Ral-Ls 8000 2) Ral-Ls 1036 3) Ral-Ls 1000 4) Ral-Ls 1035 และ 5) Ral-Ls 7032 และ 3. ส่วนผสมระหว่างเบนทอนไนต์ผสมกับนิเกิลออกไซด์ ทั้งหมดมีโทนสีน้ำตาล แบ่งตาม RAL-LS color chart ได้ 3 เฉดสี คือ 1) Ral-Ls 7034 2) Ral-Ls 1020 3) Ral-Ls 1036

1.2 ผลการทดสอบความสว่างและค่าสีของเคลือบเซรามิกส์ ทุกส่วนผสม มีค่าความสว่าง (L^*) อยู่ที่ 60.96 มีค่าสี a^* อยู่ระหว่าง 6.48 ถึง -8.00 และ มีค่าสี b^* อยู่ระหว่าง 20.28 ถึง 30.38 แบ่งตามส่วนผสมได้ดังนี้ 1. ส่วนผสมระหว่างเบนทอนไนต์ผสมกับเพอร์ริกออกไซด์ มีค่าความสว่าง (L^*) อยู่ระหว่าง 35.46 ถึง 75.39 หรือเฉลี่ยความสว่างที่ 57.23 ค่าสี a^* อยู่ระหว่าง 6.48 ถึง -3.96 และค่าสี b^* อยู่ระหว่าง 22.55 ถึง 30.38 2. ส่วนผสมระหว่างเบนทอนไนต์ผสมกับ แมงกานีสไดออกไซด์ มีค่าความสว่าง (L^*) อยู่ระหว่าง 52.04 ถึง 76.51 หรือเฉลี่ยความสว่างที่ 67.37 ค่าสี a^* อยู่ระหว่าง 6.43 ถึง -2.31 และค่าสี b^* อยู่ระหว่าง 20.28 ถึง 29.54 และ 3. ส่วนผสมระหว่างเบนทอนไนต์ผสมกับนิเกิลออกไซด์ มีค่าความสว่าง (L^*) อยู่ระหว่าง 54.74 ถึง 62.08 หรือเฉลี่ยความสว่างที่ 58.27 ค่าสี a^* อยู่ระหว่าง 4.54 ถึง -8.00 และค่าสี b^* อยู่ระหว่าง 20.72 ถึง 28.08

2. การเปลี่ยนแปลงปริมาณของเบนทอนไนต์ เพอร์ริกออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ และนิเกิลออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะที่ปรากฏของผิวเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

ผลการศึกษาลักษณะของผิวเคลือบ ระดับความมัน และความสมบูรณ์ของผิวเคลือบ เซรามิกส์ พบว่าทุกส่วนผสมลักษณะของเคลือบ มีความมันแวววาวและกึ่งด้านกึ่งมัน โดยส่วนผสมที่ ผิวมีความมันแวววาวจะมีค่าระดับความมันของผิวเคลือบ Gloss unit (GU) มีค่าความเงาอยู่ระหว่าง 54 GU ถึง 83 GU และส่วนผสมที่มีลักษณะกึ่งด้านกึ่งมัน มีค่าความเงาอยู่ระหว่าง 33 GU ถึง 46 GU และทุกสูตรส่วนผสมมีความสมบูรณ์ไม่มีตำหนิ

แบ่งตามส่วนผสมได้ดังนี้ 1. ส่วนผสมระหว่างเบนทอไนต์ผสมกับเพอร์ริกออกไซด์ มีผลการวิเคราะห์สรุปดังนี้ 1) ลักษณะของเคลือบ สูตรที่มีความมันแวววาว ได้แก่ สูตร BF1 ถึง BF6 สูตร ที่มีลักษณะกึ่งด้านกึ่งมัน ได้แก่ สูตร BF7 ถึง BF9 2) ค่าระดับความมันของผิวเคลือบ Gloss Unit (GU) มีค่าความเงาอยู่ระหว่าง 45 GU ถึง 65 GU และ 3) ทุกสูตรมีความสมบูรณ์ไม่มีตำหนิ 2. ส่วนผสมระหว่างเบนทอไนต์ผสมกับ แมงกานีสไดออกไซด์ มีผลการวิเคราะห์สรุปดังนี้ 1) ลักษณะของเคลือบทุกสูตรส่วนผสมมีความมันแวววาว 2) ค่าระดับความมันของผิวเคลือบ Gloss unit (GU) มีค่าความเงาอยู่ระหว่าง 62 GU ถึง 83 GU และ 3) ทุกสูตรมีความสมบูรณ์ไม่มีตำหนิ 3. ส่วนผสมระหว่าง เบนทอไนต์ผสมกับ นิเกิลออกไซด์ มีผลการวิเคราะห์สรุปดังนี้ 1) ลักษณะของเคลือบ สูตรที่มีลักษณะ กึ่งด้านกึ่งมัน ได้แก่ สูตร BN1 ถึง BN4 สูตรที่มีความมันแวววาว ได้แก่ สูตร BN5 ถึง BN9 2) ค่าระดับความมันของผิวเคลือบ Gloss unit (GU) มีค่าความเงาอยู่ระหว่าง 33 GU ถึง 66 GU และ 3) ทุกสูตรมีความสมบูรณ์ไม่มีตำหนิ

โดยสรุปสูตรส่วนผสมของสารเพิ่มเติมที่มีความเหมาะสมกับเคลือบเซรามิกส์ที่ประกอบด้วย 1) เฟลด์สปาร์ (Potash feldspar) ร้อยละ 45 2) โดโลไมท์ (Dolomite) ร้อยละ 10 3) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) ร้อยละ 13 4) ดินขาว (Kaolin) ร้อยละ 7 5) ควอตซ์ (Quartz) ร้อยละ 25 โดยสามารถใช้สารเพิ่มเติมในส่วนผสมของสูตรเคลือบเซรามิกส์ ได้จำนวน 3 ส่วนผสม ดังนี้ 1) เบนทอไนต์ ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 6 ผสมกับ เพอร์ริกออกไซด์ ร้อยละ 4 ถึงร้อยละ 9 2) เบนทอไนต์ ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 9 ผสมกับ แมงกานีสไดออกไซด์ ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 9 3) เบนทอไนต์ ร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 9 ผสมกับ นิเกิลออกไซด์ ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 5

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีและนวัตกรรมเซรามิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย ซึ่งทำให้การดำเนินการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณ มา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- กฤตยชญ์ คำมิ่ง, และคณินนิต ปทุมมาเกษตร. (2559). การพัฒนาเคลือบเซรามิกซีเมนต์สำหรับ
จังหวัดกำแพงเพชร. **วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์**, 11 (3),
85-94.
- ดรุณี วัฒนศิริเวช, และสุธี วัฒนศิริเวช. (2552). การวิเคราะห์แร่ดินเคลือบและตำหนิในผลิตภัณฑ์
เซรามิก. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธมลวัฒน์ หิรัญชาติอนันต์. (2565). การพัฒนาสูตรเคลือบดอกซากุระโดยใช้สีสกัดจากเปลือกเป็น
สารให้สี. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ**, 2(2), 23-31.
- ปราโมทย์ ปิ่นสกุล. (2552). การทำน้ำเคลือบเซรามิกส์จากเศษผงปูนปลาสเตอร์. **วารสารวิจัยและ
พัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์**, 4(1), 63-71.
- พรชัย ปานทุ่ง. (2558). การพัฒนาน้ำเคลือบเซรามิกส์จากเนื้อดินพื้นบ้าน. **วารสารวิจัยสหวิทยาการ
ไทย**, 10(3), 38-44.
- ไพจิตร อังศิริวัฒน์. (2546). **สีเซรามิกส์**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ไพจิตร อังศิริวัฒน์. (2547). **รวมสูตรเคลือบเซรามิกส์** (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ศิริมา เอมวงษ์. (2557). การพัฒนาเคลือบโครมทินเรด อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส.
วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, 7(1), 52-57.
- สมศักดิ์ ขวลาวัฒน์. (2549). **เซรามิกส์**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- สุขุมล เล็กสวัสดิ์. (2548). **เครื่องปั้นดินเผาพื้นฐานการออกแบบและปฏิบัติงาน**. กรุงเทพฯ :
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุขุมล สารเกษตริน. (2564). **เครื่องปั้นดินเผาการออกแบบและปฏิบัติงาน**. กรุงเทพฯ: 50 Press
Printing.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556). **เครื่องปั้นดินเผาสโตนแวร์** (มผช. 930/2556).
สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.



DEVELOPING A DATA VISUALIZATION DASHBOARD FOR DECISION SUPPORT IN MULTI-BRANCH SHOP ORDERING: A CASE STUDY OF A DRUGSTORE IN PHITSANULOK, THAILAND

Woramol C. Watanabe, Chiraphat Khamhinlat, Natnicha Kornsootwong, Suchanya
chanraksa, Thanyada Wongthanyakorn, Titaya Luechakam, Sunun Tati*

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

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

Submitted: 6 December 2024

Revision received: 14 December 2024

Accepted: 19 December 2024

Abstract

Managing inventory efficiently across multiple branches poses significant challenges, particularly in the drugstore industry. This paper explored these challenges through a case study of drugstores in Phitsanulok, Thailand, which operate under a central ordering system yet struggle with discrepancies between ordered and received inventory due to a lack of visibility across branches. To address these inefficiencies, we proposed a data visualization dashboard designed to support inventory decisions and enhanced inventory management by providing updated inventory data for all branches. This study introduced a conceptual framework for the dashboard, analyzing current ordering processes, identifying key challenges, and suggesting system improvements. Our findings suggest that implementing such a dashboard can significantly improve decision-making and operational efficiency, serving as a model for similar multi-branch businesses.

Keywords: Business intelligent, Dashboard, Decision making, Inventory, Procurement



1. Introduction

In recent years, businesses with multiple branches have faced significant logistical challenges, particularly in inventory management. These businesses often face the dual task of managing a centralized inventory while also keeping track of individual stock levels at each branch. This configuration necessitates a smooth integration of inventory data across the network to ensure efficiency and accuracy in stock replenishment and order fulfillment (Axsäter, 2015). The requirement for such integration becomes particularly critical in sectors where service delivery impacts health and safety, such as the drugstore industry.

Drugstores play a key role not only in retail but also in the healthcare system, dealing directly with consumer health needs. They must efficiently manage two major operational aspects: customer service and management their internal processes such as procurement or inventory management. The customer service process involves managing prescriptions, advising customers, and selling over-the-counter products, while the internal processes entail ordering, receiving, and managing inventory. Balancing these processes requires precise inventory management to prevent stockouts and overstock situations, which can directly affect service quality and operational costs (Singh *et al.*, 2015). Despite the availability of advanced technologies capable of showcasing real-time inventory levels, these systems often need to be personalized specifically to the unique demands of the drugstore sector. Generic systems may not address the nuances of pharmaceutical management, such as compliance with health regulations, handling of perishables, and managing controlled substances, which demand stringent oversight and tracking.

In response to these challenges, this paper proposes the conceptual development of a data visualization dashboard to aid decision-makers in managing inventory across all branches of a drugstore chain. The goal is to harness technology to streamline the ordering process by offering comprehensive visibility into inventory status, thus enabling informed decision-making, and enhancing operational efficiency. The effectiveness of the proposed system will be analyzed through a case study of a drugstore in Phitsanulok, Thailand. This study will assess how the dashboard can bridge



the gap between inventory management needs and the demand for data visibility, crucial for supporting key business operations. Through this investigation, we aim to demonstrate the transformative potential of such technological advancements in inventory management for multi-branch businesses, with the drugstore industry serving as a primary example.

2. Literature Review

The ordering process in multi-branch shops is inherently complex, requiring coordination across various locations to ensure product availability and customer satisfaction. One significant limitation in this system is the lack of real-time inventory data, which makes it exceedingly difficult for decision-makers to effectively manage stock levels (Cheng & Chou, 2008; Jian-fang, 2008). Without real-time data, branches may face frequent issues with understocking or overstocking, leading to lost sales or increased holding costs, respectively (Shinde, 2023; Xu *et al.*, 2009). The inability to access updated inventory information in a timely manner also hampers the efficiency of supply chain operations, as decisions are often made based on outdated or incomplete data. This gap in information can significantly impact the overall responsiveness and agility of the business, leading to inefficiencies that affect both the top line and the bottom line.

The integration of advanced technologies, particularly business intelligence and data analytics tools like Microsoft Power BI, has revolutionized the management of inventory across distributed retail environments. These tools support the creation of interactive, real-time dashboards that can aggregate and visualize data from multiple branches simultaneously. By implementing such technology, businesses can gain instant insights into inventory dynamics, which facilitates rapid decision-making and better alignment of supply with demand. The use of Microsoft Power BI in inventory management has been explored in various studies. Ridho (2023) emphasizes the need for a Business Intelligence (BI) Dashboard to monitor IT software asset inventory, which can be effectively addressed using Power BI. Parks (2014) highlights the self-service business intelligence features of Power BI, which can help in visualizing data and

sharing insights. Liu (2022) demonstrates the application of Power BI in sales forecasts, which can be extended to inventory management for demand forecasting.

Moreover, dashboards can be customized to highlight key metrics such as sales trends, stock turnover rates, and potential shortages, enabling managers to proactively adjust their strategies rather than reacting to crises. This technological advancement not only optimizes inventory management but also enhances operational efficiency and improves service levels across all branches (Vlahakis *et al.*, 2020). Numerous research studies have applied dashboards to support decision-making across various fields. Examples include dashboards supporting dynamic pricing decisions in wholesale (Chapparadalli, 2019), a decision support system for procurement operations (Moynihan *et al.*, 2006), the adoption of e-procurement for savings in staff time (Aisbett *et al.*, 2005), and the use of proactive decision-making to enhance efficiency, agility, and cost management in supply chains (Vlahakis *et al.*, 2020).

Given the considerable benefits demonstrated by existing research and case studies in various sectors, we propose the implementation of a customized Power BI dashboard tailored specifically for multi-branch shop ordering processes. This solution is designed to streamline operations, enhance decision-making accuracy, and improve overall supply chain efficiency. By adopting this advanced technological approach, multi-branch shops can expect not only to overcome the current limitations but also to achieve greater operational agility and competitive advantage. Therefore, moving forward with the development and deployment of a Power BI dashboard is not just an operational improvement but a strategic necessity for modern retail environments.

3. Methodology

This section outlines the methodology of the research as depicted in Figure 1, which comprises four steps for the development and evaluation of a data visualization dashboard for decision making support for a multi-branch shop in the ordering process.

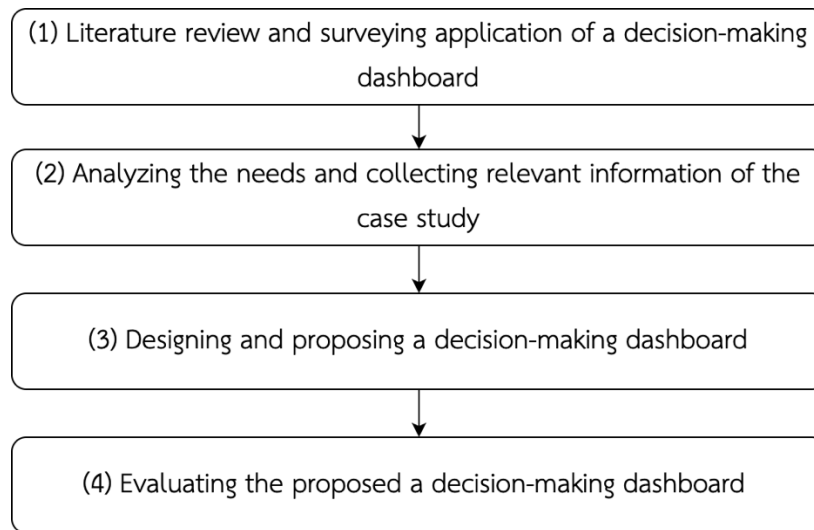


Figure 1 Research Methodology

Initially, a literature review and survey of existing data visualization dashboard applications establish a foundational understanding, essential for informing the subsequent design process. In this study, a drugstore serves as the case study. The second step involves a deeper analysis of the drugstore's specific needs and the collection of relevant information, while also reviewing additional literature to solidify the theoretical framework underpinning the dashboard. This step includes designing a preliminary dashboard using feedback from the case study to ensure alignment with operational requirements. The design is then refined and implemented using Microsoft Power BI, chosen for its robust data visualization capabilities. The final step involves evaluating the effectiveness of the dashboard by comparing error rates, such as the number of incorrect orders, before and after its deployment, and assessing user satisfaction. For instance, this evaluation might demonstrate a decrease in the percentage of incorrect orders received following the implementation of the proposed system.

4. Case Study

This section describes a case study which is a drugstore located near Nuresuan University, Phitsanulok, Thailand. This store mainly provides services to students, teachers, and residents while also serving as a training center for pharmacy students.



The pharmacy collaborates primarily with another branch from which it orders products. However, it operates on a standalone system that does not support data linkage between branches.

The operational processes of the pharmacy are included: 1) Customer service, which includes taking medical histories, selecting, and dispensing pharmaceuticals, and educating customers about the properties and usage of medical supplies and medicines. 2) Internal operations, which encompass the ordering process, inspection of received goods, logging products into the system, managing inventory, and checking drug expiration dates.

The internal ordering operations start with placing orders for medical supplies, where specific items and quantities are specified and sent to a primary supplier, which could be another branch, a pharmaceutical company, or a wholesale store. Upon receiving the goods, the pharmacy staff checks the quantity and expiration dates of the medicines. Products are then logged into the system according to the order list. Care is also taken in the placement of products on the shelves to ensure accuracy and prevent errors.

5. A Data Visualize Dashboard to Support Decision in Ordering Process of Multi-Branche Shop

In this section, we present a conceptual data visualization dashboard designed to support the decision-making process for ordering in multi-branch shops, as demonstrated in our case study. Figure 2 depicts a proposed enhancement to a drugstore's inventory management system, which integrates a decision support system into the ordering process. The existing system, equipped with inventory tracking, stock control, and reporting functionalities, communicates with a centralized database. However, it lacks updated feedback for decision-makers at critical moments. To address this gap, we propose an extended system where data is processed using Microsoft Excel and visualized through a Power BI dashboard, providing essential information for salesclerks, pharmacists, and store managers. This proposed system aims to enhance inventory visibility and decision-making efficiency across multiple

branches, ensuring that decision-makers have all the necessary information to make informed choices.

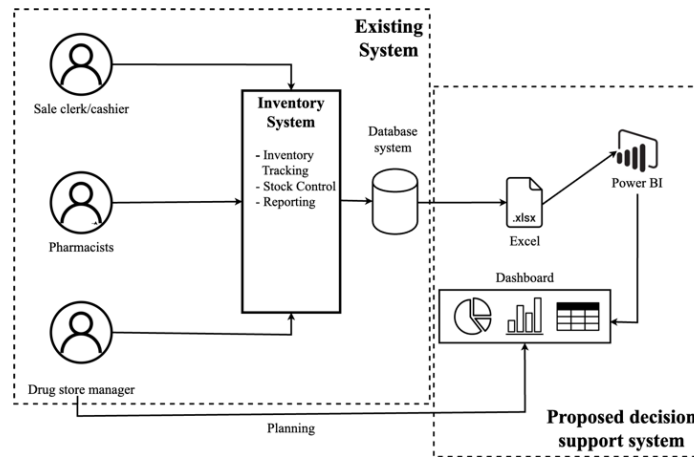


Figure 2 The proposed system.

In the case study, there are two branches for drugstore which share some part of their inventory. This proposed dashboard enables the decision maker of the case study to easily check the current inventory status at both branches by simply downloading an Excel document and importing it into the Microsoft Power BI program. This system streamlines decision-making, saves time, and reduces errors in the ordering and receiving processes. Additionally, the dashboard displays data in various formats such as charts, graphs, tables, and includes report filters that allow users to drill down into the data and focus on specific information of interest.

The proposed dashboard provides a single-screen overview of the total inventory at the second branch and the quantities that should be ordered, facilitating easy navigation and efficient management. It also allows for the recorded information to be used to create reports and analyze data related to product orders. The proposed dashboard is structured into four pages as follows:

- **Home:** As illustrated in Figure 3, this page displays the total number of products, the quantities that should be ordered, and products that are nearly out of stock, offering a comprehensive view of the ordering decisions for the case study

- **Low-level stock:** This page provides details of the items that need to be ordered and displays them in a bar chart to effectively compare the quantities of products that are low in stock. This visual representation is fundamental for decision-makers to assess which products are nearing critical low levels and may require immediate ordering. By presenting the items in a bar chart from the smallest to the largest quantity, it helps prioritize orders based on urgency and stock levels, as shown in Figure 4.

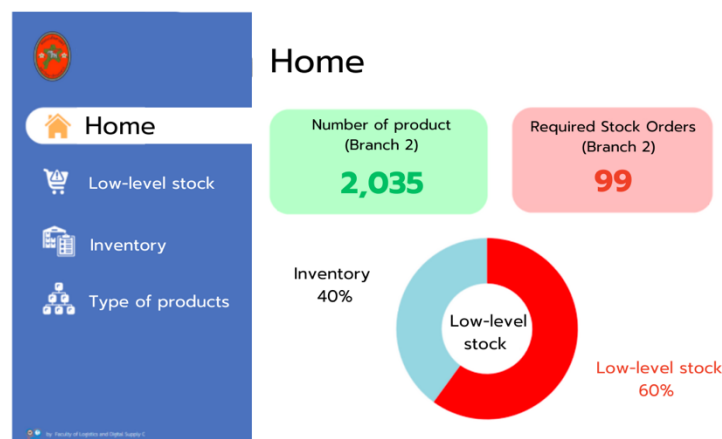


Figure 3 An example proposed dashboard screen: home

- **Inventory:** Displayed in Figure 5, this page shows details of medical supplies from both branches, such as medicines, medical equipment, herbs, and cosmetics, in bar charts for easy comparison of product quantities between the case study and Branch 1.

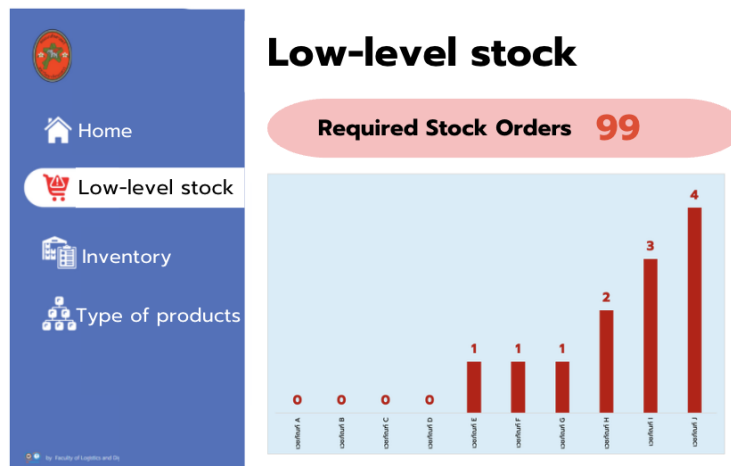


Figure 4 An example proposed dashboard screen: low-level stock

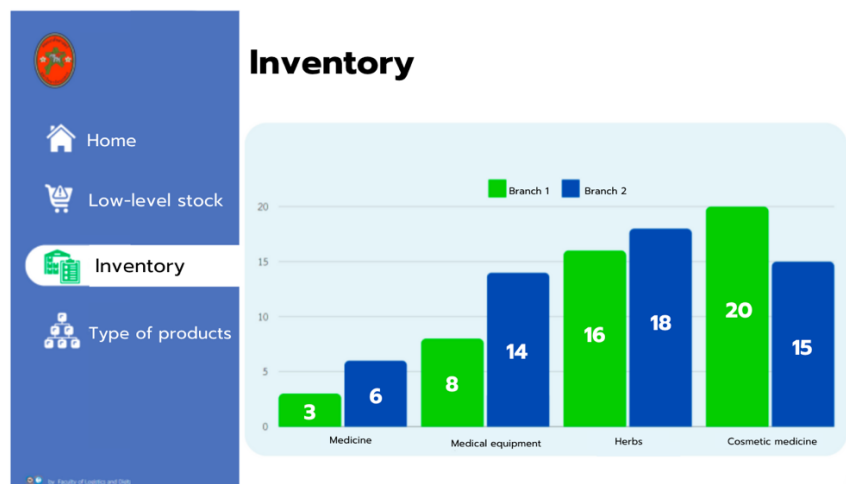


Figure 5 An example proposed dashboard screen: inventory

- Type of products:** As shown in Figure 6, this page details the types of medical supply products in the warehouse, including product code, product list, and quantity for each item. It also highlights products that are nearly out of stock according to product type, simplifying purchasing decisions across various product categories.

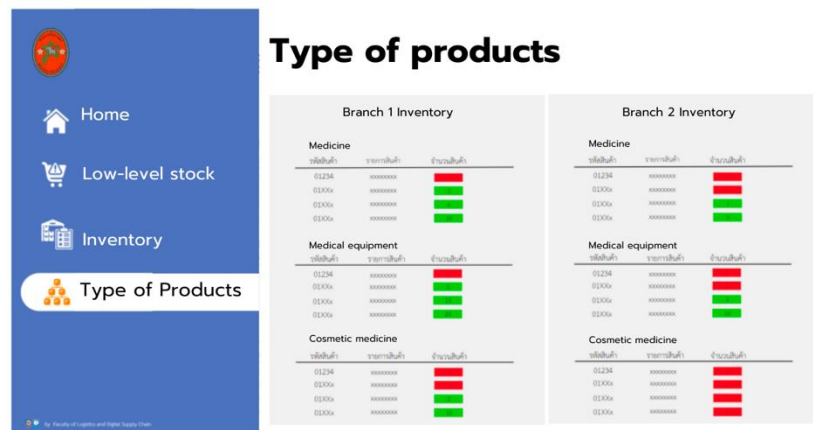


Figure 6 An example proposed dashboard screen: type of products

6. Expected Results and Discussion

From the previous section, we have explained the proposed dashboard. In this section, we illustrate the expected results of utilizing the dashboard. By developing a decision-making dashboard for ordering using the Microsoft Power BI program, the ordering process is anticipated to become more efficient. The comparison of the processes before and after implementing the dashboard is shown in Figure 7.

The current process, as shown in Figure 6 (a), involves manual checks of orders in the system by officers, followed by exporting and sending these orders to the decision maker, who then decides on the types and amounts of medical supplies needed. This method is time-consuming and error-prone, involving multiple steps of handling and transferring data. In contrast, the revised process (Figure 6 (b)) introduces the dashboard to enhance efficiency, reducing the number of steps from 5 to 4. Officers from both branches directly export inventory data to Microsoft Power BI, which is then displayed on a dashboard. This integration allows the decision maker to access real-time inventory data and make informed ordering decisions directly from the dashboard. The availability of real-time data not only simplifies the workflow but also ensures more accurate and timely order placements, leading to more precise decision-making and minimizing errors associated with manual data handling.

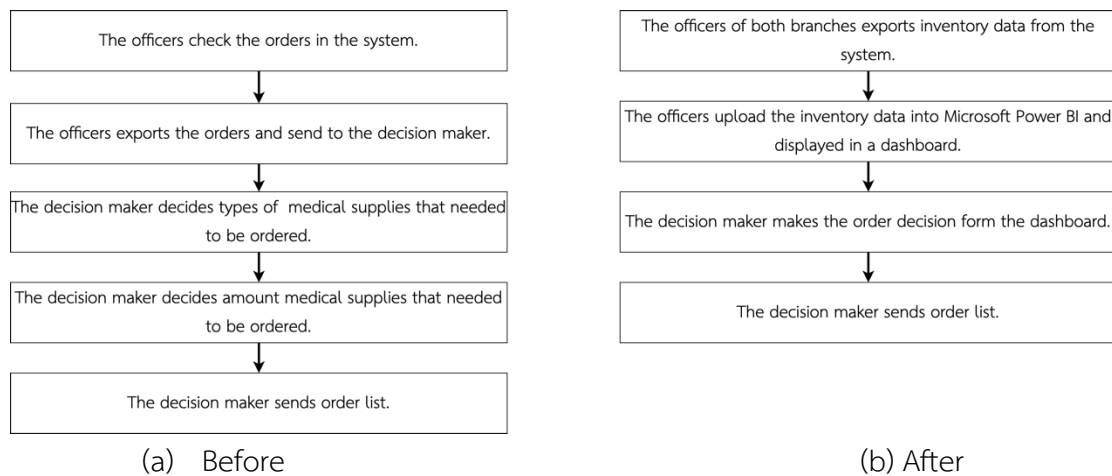


Figure 7 The ordering process comparison

7. Conclusion

Due to one of the limitations in the ordering process of a multi-branch shop, particularly the lack of shared inventory information across multiple branches, complexities often arise in the receiving process. Each branch operates independently without real-time access to the inventory levels of others, leading to inefficient and unnecessary processes. For the case study, the decision makers are required to predict the inventory that other branches can supply, resulting in wasted time and effort in guessing and comparing product list information. To address these challenges, a conceptual framework for developing a data visualization dashboard for supporting ordering medical supplies for the case study is proposed. The aim is for the dashboard to ease constraints in the ordering process by displaying inventory quantities from both branches in various graphical formats, thereby supporting quick and convenient decision-making. In developing the dashboard, the goal was to create a tool that responds to these emerging challenges and aligns with the operations of the case study. The proposed dashboard will be practically applicable in the future, representing a technological adjustment to enhance organizational operations by providing essential inventory visibility across branches.

From the literature, it highlights the critical issue of lacking real-time inventory data, leading to challenges such as understocking, overstocking, and inefficient decision-making due to outdated or incomplete information (Cheng & Chou, 2008; Jian-



fang, 2008; Xu et al., 2009; Shinde, 2023). The proposed dashboard addresses these challenges by providing real-time inventory visibility across branches, enabling proactive stock management and timely decision-making. Unlike traditional systems, it enhances operational efficiency and reduces stock-related risks. This technological solution aligns with literature findings, offering a practical adjustment to improve supply chain operations and meet modern organizational needs.

This study represents an initial step towards implementing a decision-making system for a drugstore case study, focusing primarily on data visualization to support decision-making processes. At this stage, the case study is constrained by limited resources, which restricts the deployment of a fully automated system. Current limitations include the lack of advanced tools for automatically updating data and insufficient human resources, requiring that data updates be conducted manually by staff. Consequently, this paper only addresses the development and application of a data visualization dashboard. However, further research involves proposing a more comprehensive system that will automate supply ordering decisions by providing precise recommendations on the quantity of supplies needed, as well as the optimal times and locations for placing orders, thereby offering enhanced support to decision-makers in managing the supply ordering process.

8. Reference

- Aisbett, J., Lasch, R., & Pires, G. D. (2005). A decision-making framework for adoption of e-procurement. *International Journal of Integrated Supply Management*, 1, 278-293.
- Axsäter, S. (2015). Multi-Echelon Systems: Structures and Ordering Policies. *International Series in Operations Research & Management Science*, 187-219
- Chapparadalli, N.L. (2019). *Designing a dashboard to support the decision process of dynamic pricing*. (Business Information Technology MSc). University of Twente, Netherlands



- Cheng, J.C., & Chou, C.Y. (2008). A real-time inventory decision system using Western Electric run rules and ARMA control chart. **Expert Syst**, 35, 755-761.
- Jian-fang, Z. (2008). Schedule-based Real Time Inventory Possessing. **Journal of Wuhan Polytechnic University**.
- Liu, Y., & Chen, X. (2022, October). **Application of Big Data Analysis Based on Power BI in Sales Forecasts**. Proceedings of the 5th International Conference on Computer Science and Software Engineering, Guilin, China.
- Moynihan, G. P., Saxena, P., & Fonseca, D. J. (2006). Development of a decision support system for procurement operations. **International Journal of Logistics Systems and Management**, 2, 1.
- Parks, M. (2014). **Microsoft Business Intelligence**. POWER BI.
- Ridho, M., Gutandjala, I. I., Windart, A. T., & Pransandy, T. (2023, June). **Business Intelligence Dashboard for Asset Inventory Management Monitoring at PT Indonesia Power Head Office**. 2023 8th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR), Bangkok, Thailand.
- Shinde, S.S., Karadkhele, G., Lohakare, P., & Vaidya, V. (2023). Live Inventory Tracking System Using IOT. **International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology**, 11(5), 7161-7166.
- Singh, V.V., Singh, H., & Singh, S. (2015). Drug Inventory Management of A Pharmacy Store by Combined Abc-Ved Analysis. **International Journal on Mechanical Engineering and Robotics (IJMER)**, 3, 19-22.
- Vlahakis, G., Kopanaki, E., & Apostolou, D. (2020). Proactive decision making in supply chain procurement. **Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce**, 30, 28 - 50.
- Xu, P. J., Allgor, R. J., & Graves, S. C. (2009). Benefits of Reevaluating Real-Time Order Fulfillment Decisions. **Manufacturing & Service Operations Management**, 11, 340-355.



การจัดเส้นทางและตารางเวลาเดินทางสำหรับการจัดส่งไข่ไก่ VEHICLE ROUTING AND SCHEDULING PROBLEM FOR EGGS DELIVERY

ศักดิ์ดีดา คำจันทร์, หทัยชนก ศรีบุญเรือง, วิเรखा คำจันทร์*

Sakda Khamjan, Hathaichanok Sriboonruang, Wirekha Khamjan*

คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

อ.เมือง จ.สกลนคร ประเทศไทย 47000

Faculty of Science and Engineering, Kasetsart University Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus,

Muang, Sakon Nakhon, Thailand, 47000

*Corresponding author e-mail: wirekha.kh@ku.th

วันที่เข้าระบบ 22 มีนาคม 2567

วันที่แก้ไขบทความ 23 ธันวาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 23 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายขนส่งสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางและตารางเวลาเดินทางการจัดส่งไข่ไก่ของกรณีศึกษาโดยการแก้ปัญหาที่มี 2 ระยะคือการสร้างคำตอบเริ่มต้น (Initial solution) และพัฒนาคำตอบ ระยะแรกเป็นการสร้างคำตอบเริ่มต้นด้วยวิธีฮิวริสติก 3 วิธีซึ่งประกอบด้วยวิธีเพื่อนบ้านใกล้สุด (Nearest neighbor method) วิธีการกวาด (Sweep algorithm) และวิธีการแบบประหยัด (Saving algorithm) ผลพบว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ 7.41% 8.94% และ 11.42% ตามลำดับ ในระยะที่สองแผนการจัดส่งจะถูกพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาแบบทาบู (Tabu search algorithm) ซึ่งผลการศึกษพบว่าแผนขนส่งที่ได้จากพัฒนาคำตอบของแผนจากวิธีปัจจุบัน วิธีเพื่อนบ้านใกล้สุด วิธีการกวาด และวิธีการแบบประหยัดสามารถลดค่าใช้จ่ายจากวิธีการปัจจุบันได้ 12.67% 12.42% 12.44% และ 12.67% ตามลำดับ

คำสำคัญ: ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง, การวางแผนขนส่งหลายช่วงเวลา, วิธีการแบบประหยัด, วิธีค้นหาแบบทาบู

Abstract

This article aims to reduce transportation costs of vehicle routing and scheduling problems for a case study of egg delivery. The problem solutions were separated into two phases: generating an initial solution and developing a solution. The first phase was to create the initial solution using three heuristic methods, including the nearest neighbor method, the sweep algorithm, and the saving algorithm. The results showed that the cost can be reduced by 7.41%, 8.94% and 11.42% respectively. In the second phase, all transportation plans were further advanced using the Tabu search algorithm. The study results found that the developed transportation plans using the current method, the nearest neighbor method, the sweep algorithm, and the savings algorithm resulted in cost reductions of 12.67%, 12.42%, 12.44%, and 12.67%, respectively, compared to the current method.

Keywords: Vehicle routing problem, Multi-period transportation problem, Saving algorithm, Tabu search algorithm

1. บทนำ

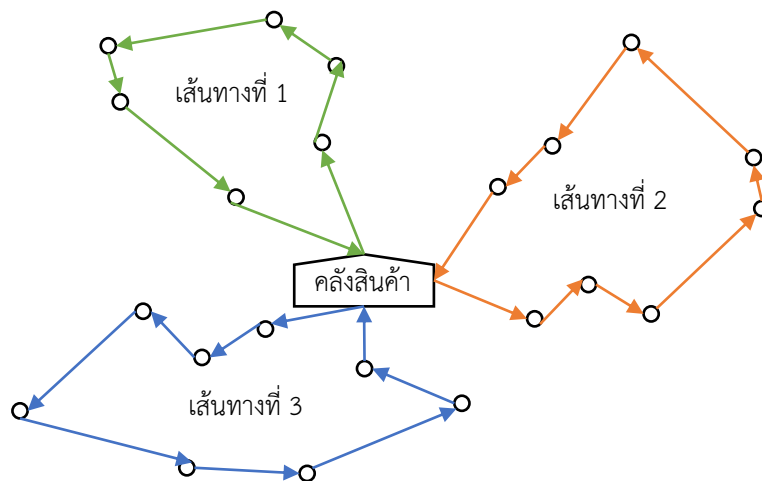
ไข่ไก่เป็นแหล่งโปรตีนที่ทรงคุณค่า ราคาถูก และสามารถหาซื้อได้ง่ายทำให้เป็นที่นิยมบริโภคอย่างกว้างขวาง โรงคัดไข่เป็นส่วนหนึ่งในระบบโซ่อุปทานไข่ไก่โดยรับไข่ไก่แบบคละขนาดที่ผลิตจากฟาร์มไข่ไก่ จากนั้นนำไปคัดแยกขนาดตามน้ำหนักเป็นไข่ขนาดเบอร์ 0 ถึง 5 โดยเรียงจากขนาดใหญ่ไปเล็กเพื่อนำบรรจุลงบนแผงตามขนาดที่ได้ ไข่ที่คัดขนาดลงแผงแล้วจะถูกจำหน่ายและจัดส่งไปยังร้านขายไข่สดตามท้องที่ต่างๆ ธุรกิจโรงคัดไข่ไก่เป็นธุรกิจที่มีการแข่งขันด้านการตลาดค่อนข้างสูง กระบวนการขนส่งจึงเป็นช่องทางกระจายสินค้าไปยังลูกค้าและเป็นกลยุทธ์หลักการขายที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการดำเนินธุรกิจค้าส่งไข่ไก่ เพื่อสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างพอเพียงและรวดเร็ว

บริษัทกรณีศึกษาตั้งอยู่อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร ประกอบธุรกิจคัดแยกขนาดไข่ไก่และค้าส่งไข่ไก่โดยมีการทำงานหลักคือการขนส่งไข่ไก่ไปยังลูกค้าประจำในแต่ละเขตโดยอาศัยแนวคิดและประสบการณ์จากเจ้าของบริษัทเอง โดยรูปแบบการขนส่งสินค้าของผู้ประกอบธุรกิจค้าส่งไข่ไก่จะทำการใช้รถขนส่งจำนวน 3 คัน รถที่ขนส่งที่ใช่เป็นกระบะ 4 ล้อติดตั้งตู้ทึบเพื่อปกป้องไข่ไก่จากแสงแดดและฝน ซึ่งรถแต่ละคันจะสามารถบรรทุกไข่ไก่ได้คันละจำนวน 1,200 แผง รถขนส่งแต่ละคันจะมีเส้นทางจัดส่งวันละหนึ่งเส้นทางตลอดสัปดาห์ทั้ง 7 วันทำให้มีเส้นทางจัดส่งไข่ไก่ 21 เส้นทางเพื่อ

กระจายสินค้าให้ครอบคลุมลูกค้าทั้งหมดภายในรอบสัปดาห์ เมื่อวิเคราะห์เส้นทางขนส่งพบว่า มีเส้นทางและระยะทางเกิดขึ้นเกินความจำเป็นทำให้ไม่มีประสิทธิภาพในการขนส่งและค่าใช้จ่ายในการจัดส่งสินค้าสูงตามไปด้วย ทางผู้ประกอบการเริ่มตระหนักถึงปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นและต้องการปรับปรุงแผนการจัดส่งสินค้าของโรงงานกรณีศึกษา ดังนั้นคณะผู้วิจัยมุ่งศึกษาหาแนวทางการจัดเส้นทางและตารางเดินรถสำหรับขนส่งไขไก่ของกรณีศึกษาเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งซึ่งประกอบด้วยค่าแรงของพนักงานจัดส่งและค่าใช้จ่ายของน้ำมันเชื้อเพลิง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัญหาการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะ (Vehicle routing problem, VRP) คือ การออกแบบเส้นทางเดินรถที่เหมาะสมที่สุดในด้านงบประมาณค่าใช้จ่ายให้กับรถขนส่งสินค้าที่ทราบปริมาณความจุ เส้นทางขนส่งจะเริ่มต้นจากคลังสินค้าไปสู่กลุ่มลูกค้าที่ทราบตำแหน่งที่ตั้ง ทราบปริมาณสินค้าที่ต้องการแน่นอนและกลับมาสิ้นสุดเส้นทางที่คลังสินค้าเริ่มต้นโดยมีข้อจำกัดที่ว่าลูกค้าแต่ละรายจะได้รับบริการโดยส่งสินค้าคันเดียวและปริมาณสินค้าที่นำส่งต้องไม่เกินความจุของรถขนส่งคันนั้นๆ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ

ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งมีการศึกษาครอบคลุมหลากหลายสินค้า ได้แก่ การจัดเส้นทางจัดส่งชิ้นส่วนรถยนต์ (รวีโรจน์ และธัญภัส, 2564) บริษัทจัดจำหน่ายเครื่องมือช่าง (เกศินี, 2563) การกระจายสินค้าประเภทเครื่องดื่ม (ศทาทรัพย์, 2563) การจัดส่งสินค้าประเภทเทกองและกระสอบ (พิชญ์ และเปรมพร, 2562) การขนส่งวัตถุดิบและการกระจายสินค้าของธุรกิจนม (ณัฐนิชา และคณะ,



2561) การจัดส่งของบริษัทจำหน่ายอุปกรณ์ระบบงานไฟฟ้า (นฤมล, 2560) การขนส่งในธุรกิจโรงงานน้ำแข็ง (วุฒิไกร, 2560) และการกระจายสินค้าของโรงงานน้ำดื่ม (นคร และคณะ, 2558)

2.2 วิธีการประหยัด (Saving algorithm) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในทางปฏิบัติ เพราะเป็นวิธีที่ง่ายแม้ว่าวิธีนี้จะไม่ได้ประกันถึงการให้คำตอบที่ดีที่สุดก็ตาม สำหรับปัญหาการตัดสินใจที่มีขนาดไม่ใหญ่นักวิธีการประหยัดยังคงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งซึ่งเราสามารถคำนวณหาคำตอบได้โดยปราศจากการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ หรือเพียงแค่อาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการประมวลผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในหลายๆครั้ง โดยเริ่มต้นจากการคำนวณค่าประหยัดของระหว่างจุดจัดส่งสินค้า 2 ตำแหน่ง ดังสมการ (1) และนำจากจัดเส้นทางโดยเลือกค่าประหยัดที่มีค่ามากที่สุดก่อน

$$vS_{i,j} = D_{i,0} + D_{0,j} - D_{i,j} \quad (1)$$

โดยที่

- $S_{i,j}$ เป็นค่าประหยัดระหว่างคู่จุดส่งสินค้า i และ j
- $D_{i,0}$ เป็นระยะทางจากจุดส่งสินค้า i ไปยังคลังสินค้า
- $D_{0,j}$ เป็นระยะทางจากคลังสินค้าไปยังจุดรับส่ง j
- $D_{i,j}$ เป็นระยะทางจากจุดส่งสินค้า i ไปยังจุดส่งสินค้า j

งานวิจัยที่ใช้วิธีอัลกอริทึมประหยัด ได้แก่ งานวิจัยของรวีโรจน์ และธัญภัส (2564) ได้ประยุกต์วิธีการประหยัดจัดเส้นทางขนส่งชิ้นส่วนรถยนต์ ผลที่ได้สามารถลดต้นทุนรวมในการขนส่งสินค้าได้ 4,241,705.71 บาทต่อปีคิดเป็นร้อยละ 23.33 ระยะทางขนส่งรวมลดลง 395,740.8 กิโลเมตรต่อปีคิดเป็นร้อยละ 18.83 ระยะเวลาขนส่งรวมลดลง 438,766.89 นาทีต่อปีคิดเป็นร้อยละ 17.37 ปริมาณเชื้อเพลิงรวมลดลง 65,956.8 ลิตรต่อปีคิดเป็นร้อยละ 18.38 จำนวนรถบรรทุกลดลง 4 คัน คิดเป็นร้อยละ 26.67 และจำนวนพนักงานลดลง 8 คน คิดเป็นร้อยละ 26.67 งานวิจัยของนคร และคณะ (2558) ได้ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมประหยัดและตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขายของโรงงานน้ำดื่ม สามารถลดระยะทางในเส้นทางตัวอย่างได้จากเดิม 41,537 เมตร เหลือ 39,810 เมตร หรือลดลงร้อยละ 4.16

2.3 วิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (Nearest neighbor) เป็นวิธีค้นหาจุดส่งสินค้าที่อยู่ใกล้กับจุดส่งจุดสุดท้าย โดยปริมาณจะต้องไม่เกินความจุของยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งสินค้า และกลับสู่คลังสินค้า เมื่อปริมาณความจุของยานพาหนะเต็มความจุจากนั้นสร้างเส้นทางใหม่จนครบทุกจุดรับส่งสินค้า โดยการสร้างเส้นทางเริ่มต้นจะสร้างจากจุดที่อยู่ใกล้คลังสินค้ามากที่สุด จากนั้นค้นหาจุดที่อยู่

ใกล้จุดสุดท้ายของเส้นทางมากที่สุดและเพิ่มจุดที่อยู่กับจุดสุดท้ายมากที่สุดลงในเส้นทางทำซ้ำจนครบทุกจุด

งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้วิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดได้แก่ งานวิจัยของเกศินี (2563) นำเสนอการจัดส่งสินค้าของธุรกิจจำหน่ายเครื่องมือช่างของกรณีศึกษา 5,440.68 บาทหรือคิดเป็นร้อยละ 80.25 งานวิจัยของ พิชญ์ และเปรมพร (2562) ได้ประยุกต์ใช้วิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดและวิธีการประหยัดจัดเส้นทางการขนส่งของรถบรรทุกขนาดใหญ่สำหรับสินค้าประเภทเทกองและกระสอบ ผลที่ได้วิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดให้ผลลัพธ์การจัดเส้นทางเดินรถที่ดีที่สุด สำหรับงานวิจัยที่เปรียบเทียบวิธีอัลกอริทึมประหยัดกับวิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด งานวิจัยของนฤมล (2560) ได้ผลลัพธ์ของการประหยัดดีกว่าโดยเปรียบเทียบจากวิธีการอื่นๆทั้งในด้าน ระยะทาง จำนวนรถที่ใช้ จำนวนเส้นทาง และค่าใช้จ่ายรวม งานวิจัยเกศินี (2563) พิชญ์ และเปรมพร (2562) มีผลลัพธ์ของวิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดดีกว่า

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาแผนการจัดส่งไปรษณีย์ปัจจุบัน

การจัดส่งไปรษณีย์ของบริษัทกรณีศึกษาขนส่งโดยรถกระบะติดตู้ตู้ที่บ 3 คันที่มีสามารถบรรทุกไปรษณีย์ได้ 1,200 แผง โดยรถแต่ละคันดำเนินการจัดส่งไปรษณีย์ 7 เส้นทางต่อสัปดาห์ กระจายไปยังจุดส่งสินค้าทั้งหมด 19 อำเภอ ซึ่งมีร้านค้า 12 อำเภอที่มีแผนการรับสินค้า 1 เทียบต่อสัปดาห์สามารถจัดส่งไปรษณีย์ได้ทุกวัน และมีร้านค้าอีก 6 อำเภอ ที่มีแผนการรับสินค้า 2 เทียบต่อสัปดาห์โดยมีระยะเวลาห่างกัน 3 วันดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงเลขของจุดส่งและจำนวนไปรษณีย์ที่ต้องจัดส่ง ตัวอย่างแผนการจัดส่งไปรษณีย์จะมีเส้นทางประจำวันของรถแต่ละคัน ได้แก่ แผนการจัดส่งในวันจันทร์ ประกอบด้วยเส้นทางของรถคันที่ 1 เริ่มต้นจากโรงคัดไข่ (แทนด้วยจุดที่ 0) ไปยังร้านค้าไข่อำเภอเมืองมุกดาหาร (แทนด้วยจุดที่ 16) และกลับมายังโรงคัดไข่ เส้นทางของรถคันที่ 2 เริ่มต้นจากโรงคัดไข่ (แทนด้วยจุดที่ 0) ไปยังร้านค้าไข่อำเภอดอนตาล (แทนด้วยจุดที่ 17) และกลับมายังโรงคัดไข่ และเส้นทางของรถคันที่ 3 เริ่มต้นจากโรงคัดไข่ (แทนด้วยจุดที่ 0) ไปยังร้านค้าไข่อำเภอเจริญศิลป์ (แทนด้วยจุดที่ 4) และกลับมายังโรงคัดไข่ โดยเส้นทางจัดส่งในวันอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 2 โดยแผนการจัดส่งไปรษณีย์ปัจจุบันมี 21 เส้นทางเป็นระยะทางรวม 4,348.4 กิโลเมตรต่อสัปดาห์

ตารางที่ 1 จุดส่งไข่ไก่และปริมาณจัดส่ง

จุดส่ง ที่	ชื่อร้านค้าไข่	ปริมาณจัดส่ง (แผง)		จุดส่ง ที่	ชื่อร้านค้าไข่	ปริมาณจัดส่ง (แผง)	
		รอบ 1	รอบ 2			รอบ 1	รอบ 2
		0	โรงคัดไข่			-	-
1	อำเภอเมืองสกลนคร	200	200	11	อำเภอนาแก	500	
2	อำเภอพังโคน	500	500	12	อำเภอปลาปาก	500	
3	อำเภอสว่างแดนดิน	500		13	อำเภอเมืองอุดรธานี	1,200	
4	อำเภอเจริญศิลป์	800		14	อำเภอหนองหาน	1,000	
5	อำเภอกุดบาก	500		15	อำเภอวังสามหมอ	1,000	
6	อำเภอนาหว้า	500		16	อำเภอเมืองมุกดาหาร	1,200	
7	อำเภอเต่างอย	500		17	อำเภอดอนตาล	1,000	
8	อำเภอโพนนาแก้ว	200	200	18	อำเภอเมืองกาฬสินธุ์	1,200	1,200
9	อำเภอโคกศรีสุพรรณ	200	200	19	อำเภอเมืองร้อยเอ็ด	1,200	1,200

ตารางที่ 2 แผนการจัดส่งไข่ไก่ในปัจจุบัน

วัน	รถคันที่ 1		รถคันที่ 2		รถคันที่ 3	
	เส้นทาง	ระยะทาง	เส้นทาง	ระยะทาง	เส้นทาง	ระยะทาง
	ขนส่ง	(km.)	ขนส่ง	(km.)	ขนส่ง	(km.)
จันทร์	0-16-0	210.0	0-17-0	276.0	0-4-0	210.0
อังคาร	0-2-0	135.6	0-14-0	304.0	0-19-0	426.0
พุธ	0-18-0	292.0	0-15-0	342.0	0-8-0	54.6
พฤหัสบดี	0-1-6-0	113.7	0-7-0	27.4	0-9-11-0	66.0
ศุกร์	0-19*-0	426.0	0-10-0	210.0	0-5-0	100.0
เสาร์	0-18*-0	292.0	0-2*-0	135.6	0-8*-0	54.6
อาทิตย์	0-13-0	398.0	0-9*-12-0	82.1	0-1*-3-0	192.8
จำนวนเส้นทาง (เส้นทาง)						21
ระยะทางรวม (km)						4,348.4

หมายเหตุ * คือจุดส่งสินค้าครั้งที่ 2 ในรอบสัปดาห์

จากการวิเคราะห์ข้อมูลจากทางบริษัทรถจักรยานยนต์ศึกษา ทำให้พบว่าการจัดเส้นทางการขนส่งใช้รถในการขนส่งมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาปัญหานี้เพื่อเป็นแนวทางช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเส้นทาง โดยการใช้วิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (Nearest neighbor method) วิธีการกวาด (Sweep heuristic) วิธีการประหยัด (Saving algorithm) และนำแผนการจัดส่งไปแก้ไขที่ได้จากวิธีการทั้งหมดมาพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาแบบทาบ (Tabu search algorithm)

4.2 วิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (Nearest neighbor method)

วิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดเป็นวิธีการสร้างเส้นทางของรถคันที่ 1 ($k=1$) ในแผนขนส่งวันแรก ($t=1$) โดยค้นหาจุดส่งสินค้าที่อยู่ใกล้กับบริษัทรถจักรยานยนต์ศึกษามากที่สุดก่อนและจากนั้นทำการค้นหาจุดที่ใกล้จุดถัดไปเรื่อย ๆ จนรวมครบทุกจุด โดยพิจารณาพร้อมกับความจุของรถบรรทุกควบคู่ไปด้วย เมื่อมีความจุเกินให้ทำการสร้างเส้นทางของรถคันถัดไปหรือแผนวันถัดไปและเลือกจุดส่งสินค้าที่ใกล้กับบริษัทรถจักรยานยนต์ศึกษาในจุดถัดไปจนจัดเส้นทางครบทุกจุดส่งสินค้า ผลลัพธ์ของเส้นทางการขนส่งแก้ไขที่ได้พัฒนาขึ้นจากการใช้วิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (Nearest neighbor) จะใช้รถบรรทุกในการขนส่งที่มีปริมาณความจุของไซโกไม่เกิน 1,200 แฝง จำนวน 3 คัน โดยได้เส้นทางในการขนส่งไซโกทั้งหมด 17 เส้นทาง และมีระยะทางรวม 4,197.4 กิโลเมตร ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แผนการจัดส่งโดยวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด

วัน	รถคันที่ 1		รถคันที่ 2		รถคันที่ 3	
	เส้นทางขนส่ง	ระยะทาง (km.)	เส้นทางขนส่ง	ระยะทาง (km.)	เส้นทางขนส่ง	ระยะทาง (km.)
จันทร์	0-9-7-1-0	69.1	0-11-12-8-0	117.6	0-5-2-0	164.7
อังคาร	0-6-3-0	233.7	0-18-0	292.0	0-19-0	426.0
พุธ	0-4-0	210.0	0-10-0	210.0	0-16-0	210.0
พฤหัสบดี	0-9*-1*-0	52.4	0-8*-14-0	342.3	0-2*-0	135.6
ศุกร์	0-17-0	276.0	0-18*-0	292.0	0-19*-0	426.0
เสาร์	0-15-0	342.0	0-13-0	398.0		
จำนวนเส้นทาง (เส้นทาง)						17
ระยะทางรวม (km)						4,197.4

หมายเหตุ * คือจุดส่งสินค้าครั้งที่ 2 ในรอบสัปดาห์

4.3 วิธีการกวาด (Sweep heuristic)

เป็นการจัดเส้นทางโดยการแบ่งกลุ่มจุดส่งสินค้าเป็น 4 ส่วนและเริ่มกวาดจุดส่งสินค้าในทิศตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาได้ โดยใช้บริษัทกรณีศึกษาเป็นจุดศูนย์กลางในการกวาด และทำการรวมจุดส่งสินค้าที่ถูกกวาดเข้าในเส้นทาง พร้อมทำการรวมความจุของแต่ละจุดที่ถูกกวาดไม่ให้เกินความจุของรถบรรทุกที่ใช้ขนส่งสินค้า ถ้าความจุเกินในการขนส่งสินค้าให้สร้างเส้นทางของรถคันถัดไปหรือแผนวันถัดไปและกวาดรวบรวมจุดส่งสินค้าจนครบทุกจุด เส้นทางขนส่งของรถไฟที่พัฒนาขึ้นจากการใช้วิธีการกวาด (Sweep Heuristic) จะใช้รถบรรทุกในการขนส่งที่มีปริมาณความจุของรถไฟไม่เกิน 1,200 แพง จำนวน 3 คัน ได้เส้นทางในการขนส่งรถไฟทั้งหมด 16 เส้นทาง และมีระยะทางรวม 4,185 กิโลเมตร ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แผนการจัดส่งโดยวิธีการกวาด

วัน	รถคันที่ 1		รถคันที่ 2		รถคันที่ 3	
	เส้นทางขนส่ง	ระยะทาง (km)	เส้นทางขนส่ง	ระยะทาง (km)	เส้นทางขนส่ง	ระยะทาง (km)
จันทร์	0-8-12-9-0	93.9	0-10-0	210.0	0-1-6-2-0	191.1
อังคาร	0-5-3-0	213.3	0-18-0	292.0	0-19-0	426.0
พุธ	0-4-0	210.0	0-16-0	210.0	0-17-0	276.0
พฤหัสบดี	0-9*-7-8*-0	94.7	0-15-0	342.0	0-1*-2*-11-0	199.4
ศุกร์	0-18*-0	292.0	0-19*-0	426.0	0-14-0	304.0
เสาร์	0-13-0	398.0				
จำนวนเส้นทาง (เส้นทาง)						16
ระยะทางรวม (km)						4,178.4

หมายเหตุ * คือจุดส่งสินค้าครั้งที่ 2 ในรอบสัปดาห์

4.4 วิธีการประหยัด (Saving algorithm)

วิธีการประหยัดเริ่มต้นจากการคำนวณค่าประหยัด (Saving value) ของจุดส่งสินค้าแต่ละคู่โดยคำนวณได้จากสมการ (1) ตัวอย่างในการคำนวณค่าประหยัดของคู่จุดส่ง 1,2 ($i=1, j=2$) มีระยะทางจากบริษัทไปยังจุดส่งที่ 1 ($D_{0,1}$) 13 กิโลเมตร ระยะทางจากจุดส่งสินค้า 2 ไปยังบริษัท ($D_{2,0}$) 67.8 กิโลเมตร และระยะทางจากจุดส่งสินค้า 1 ไปยังจุดส่งที่ 2 ($D_{1,2}$) 55.9 กิโลเมตร จะได้ค่าประหยัดระหว่างคู่จุดส่งสินค้า 1 และ 2 ($S_{1,2}$) เท่ากับ $13 + 67.8 - 55.9 = 24.9$ กิโลเมตร การจัดเส้นทางเริ่มจากรถคันที่หนึ่ง ($k=1$) ของวันแรก ($t=1$) เลือกคู่ที่มีระยะทางประหยัดมากที่สุดเป็นคู่แรก



และแทรกจุดเชื่อมจุดส่งจุดแรกหรือจุดสุดท้ายที่มีค่าประหัยมากที่สุดโดยต้องสามารถบรรจุทุกไซ้ไ้รวมต้องไม่เกิน 1,200 แผง เมื่อรถที่จัดเส้นทางไม่สามารถแทรกเส้นทางได้แล้วให้จัดเส้นทางของรถคันถัดไปหรือวันถัดไป จนกระทั่งครบทุกจุดจัดส่ง เส้นทางการขนส่งที่ได้จากวิธีการประหัยนี้มีทั้งหมด 15 เส้นทางเป็นระยะทางรวม 4,103.7 กิโลเมตร ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แผนการจัดส่งไซ้โดยวิธีการประหัย

วัน	รถคันที่ 1		รถคันที่ 2		รถคันที่ 3	
	เส้นทางขนส่ง	ระยะทาง (km)	เส้นทางขนส่ง	ระยะทาง (km)	เส้นทางขนส่ง	ระยะทาง (km)
จันทร์	0-3-2-8-0	236.8	0-12-6-1-0	154.8	0-11-9-7-0	82.7
อังคาร	0-18-0	292.0	0-19-0	426.0	0-10-0	210.0
พุธ	0-16-0	210.0	0-17-0	276.0	0-15-0	342.0
พฤหัสบดี	0-4-8*-1*-0	265.1	0*-9-5-2*-0	188.3	0-14-0	304.0
ศุกร์	0-18*-0	292.0	0-19*-0	426.0	0-13-0	398.0
จำนวนเส้นทาง (เส้นทาง)						15
ระยะทางรวม (km)						4,103.7

หมายเหตุ * คือจุดส่งสินค้าครั้งที่ 2 ในรอบสัปดาห์

4.5 วิธีการค้นหาแบบทาบู (Tabu search algorithm)

วิธีการค้นหาแบบทาบูจะนำคำตอบที่ได้จากวิธีปัจจุบันของกรณีศึกษา และวิธีการฮิวริสติกทั้ง 3 วิธี ประกอบด้วย วิธีเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด วิธีการกวาดและวิธีการประหัยมาปรับปรุงคำตอบในการจัดเส้นทางและตารางขนส่งไซ้ให้ดีขึ้น โดยมีขั้นตอนของวิธีการค้นหาแบบทาบูดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดเกณฑ์การหยุดค้นหา จำนวนรอบในรายการทาบู สร้างรหัสคำตอบจากคำตอบเริ่มต้น (Initial solution) นำคำตอบเริ่มต้นมากำหนดเป็นคำตอบที่ดีที่สุด (Best solution) และคำตอบที่ได้ (Candidate solution) ของรอบปัจจุบัน และจากคำตอบสร้างรายการทาบู (Tabu list)

ขั้นตอนที่ 2 สร้างคำตอบใกล้เคียง (Neighborhood solution) จากการสลับตำแหน่งของรหัสคำตอบของคำตอบในรอบก่อนหน้าและถอดรหัสคำตอบเพื่อหาค่าฟังก์ชันเป้าหมาย (Fitness function) และคำตอบที่ได้จะซ้ำกับรายการทาบู

ขั้นตอนที่ 3 เลือกคำตอบในรอบปัจจุบัน โดยเลือกคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันเป้าหมายน้อย และปรับปรุงคำตอบเมื่อคำตอบปัจจุบันที่ค่าฟังก์ชันเป้าหมายต่ำกว่าเดิม

ขั้นตอนที่ 4 กลับไปทำซ้ำในขั้นตอน 3 และ 4 จนเกณฑ์การหยุดค้นหาเป็นจริง
แผนการจัดส่งด้วยวิธีการค้นหาแบบทาบูโดยใช้คำตอบเริ่มต้นจากวิธีปัจจุบันได้แผนการ
ขนส่งสินค้า 15 เส้นทาง และมีระยะทาง 4,031.2 กิโลเมตร ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แผนการจัดส่งวิธีการค้นหาแบบทาบูที่พัฒนาจากวิธีการปัจจุบัน

วัน	คันที่ 1		คันที่ 2		คันที่ 3	
	เส้นทาง ขนส่ง	ระยะทาง (km)	เส้นทาง ขนส่ง	ระยะทาง (km)	เส้นทาง ขนส่ง	ระยะทาง (km)
จันทร์	0-17-9-0	277.9	0-3-2-0	199.4	0-14-1-0	305.0
อังคาร	0-18-0	292.0	0-19-0	426.0	0-6-8-12-0	159.2
พุธ	0-16-0	210.0	0-13-0	398.0	0-10-0	210.0
พฤหัสบดี	0-5-2*-0	164.7	0-15-1*-0	343.0	0-11-9*-7-0	82.7
ศุกร์	0-19*-0	426.0	0-18*-0	292.0	0-8*-4-0	245.3
จำนวนเส้นทาง (เส้นทาง)						15
ระยะทางรวม (km)						4,031.2

หมายเหตุ * คือจุดส่งสินค้าครั้งที่ 2 ในรอบสัปดาห์

แผนการจัดส่งด้วยวิธีการค้นหาแบบทาบูโดยใช้คำตอบเริ่มต้นวิธีการเพื่อนบ้านใกล้สุดได้
แผนการขนส่ง 15 เส้นทาง และมีระยะทาง 4,045.9 กิโลเมตร ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แผนการจัดส่งวิธีการค้นหาแบบทาบูที่พัฒนาจากวิธีการเพื่อนบ้านใกล้สุด

วัน	รถคันที่ 1		รถคันที่ 2		รถคันที่ 3	
	เส้นทาง ขนส่ง	ระยะทาง (km)	เส้นทาง ขนส่ง	ระยะทาง (km)	เส้นทาง ขนส่ง	ระยะทาง (km)
จันทร์	0-18-0	292.0	0-9-15-0	364.9	0-11-12-8-0	117.6
อังคาร	0-1-14-0	305.0	0-2-3-0	199.4	0-19-0	426.0
พุธ	0-16-0	210.0	0-13-0	398.0	0-10-0	210.0
พฤหัสบดี	0-18*-0	292.0	0-9*-17-0	277.9	0-7-6-8*-0	150.7
ศุกร์	0-5-2*-0	164.7	0-1*-4-0	211.7	0-19*-0	426.0
จำนวนเส้นทาง (เส้นทาง)						15
ระยะทางรวม (km)						4,045.9

หมายเหตุ * คือจุดส่งสินค้าครั้งที่ 2 ในรอบสัปดาห์

แผนการจัดส่งด้วยวิธีการค้นหาแบบทาบโดยใช้คำตอบเริ่มต้นวิธีการกวาดได้แผนการขนส่ง 15 เส้นทาง และมีระยะทาง 4,044.7 กิโลเมตร ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แผนการจัดส่งวิธีการค้นหาแบบทาบที่พัฒนาจากวิธีการกวาด

วัน	คันที่ 1		คันที่ 2		คันที่ 3	
	เส้นทางขนส่ง	ระยะทาง (km)	เส้นทางขนส่ง	ระยะทาง (km)	เส้นทางขนส่ง	ระยะทาง (km)
จันทร์	0-11-12-8-0	117.6	0-9-2-5-0	187.1	0-4-0	210.0
อังคาร	0-1-15-0	343.0	0-18-0	292.0	0-19-0	426.0
พุธ	0-10-0	210.0	0-16-0	210.0	0-13-0	398.0
พฤหัสบดี	0-2*-3-0	199.4	0-17-9*-0	277.9	0-8*-6-7-0	150.7
ศุกร์	0-19*-0	426.0	0-18*-0	292.0	0-1*-14-0	305.0
จำนวนเส้นทาง (เส้นทาง)						15
ระยะทางรวม (km)						4,044.7

หมายเหตุ * คือจุดส่งสินค้าครั้งที่ 2 ในรอบสัปดาห์

แผนการจัดส่งด้วยวิธีการค้นหาแบบทาบโดยใช้คำตอบเริ่มต้นวิธีการประหยัดได้แผนการขนส่ง 15 เส้นทาง และมีระยะทาง 4,031.2 กิโลเมตร ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แผนการจัดส่งวิธีการค้นหาแบบทาบที่พัฒนาจากวิธีการประหยัด

วัน	คันที่ 1		คันที่ 2		คันที่ 3	
	เส้นทางขนส่ง	ระยะทาง (km)	เส้นทางขนส่ง	ระยะทาง (km)	เส้นทางขนส่ง	ระยะทาง (km)
จันทร์	0-3-2-0	199.4	0-14-1-0	305.0	0-12-8-6-0	159.2
อังคาร	0-11-9-7-0	82.7	0-18-0	292.0	0-19-0	426.0
พุธ	0-10-0	210.0	0-16-0	210.0	0-13-0	398.0
พฤหัสบดี	0-4-8-0	245.3	0-1-15-0	343.0	0-5-2-0	164.7
ศุกร์	0-18-0	292.0	0-19-0	426.0	0-17-9-0	277.9
จำนวนเส้นทาง (เส้นทาง)						15
ระยะทางรวม (km)						4,031.2

หมายเหตุ * คือจุดส่งสินค้าครั้งที่ 2 ในรอบสัปดาห์

4. ผลการวิจัย

เพื่อหาเส้นทางการขนส่งไข่ไก่ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบผลลัพธ์บนมิติของเส้นทาง ระยะทางและค่าใช้จ่ายในการขนส่ง โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์จากวิธีการปัจจุบันของกรณีศึกษากับวิธีอีวิริสติกอีก 4 วิธี ได้แก่ 1) วิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด 2) วิธีการกวาด 3) วิธีการประหยัด และ 4) วิธีการค้นหาแบบทาบูซึ่งพัฒนาค่าตอบเริ่มต้นจากวิธีการปัจจุบันและวิธีอีวิริสติกทั้ง 3 วิธี ซึ่งมีต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการจัดส่งไข่ไก่ประกอบด้วยค่าแรงของพนักงานแปรผันตามจำนวนเส้นทางขนส่งเป็นค่าใช้จ่าย 350 บาทต่อเที่ยว และค่าน้ำมันเชื้อเพลิงแปรผันตามระยะทางขนส่งเป็นค่าใช้จ่าย 5 บาทต่อกิโลเมตร ได้ผลดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการเปรียบเทียบวิธีการจัดตารางและเส้นทางจัดส่งไข่ไก่

วิธีการ	จำนวนเส้นทาง (เส้นทาง)	ระยะทาง (กิโลเมตร)	ค่าใช้จ่ายในการขนส่ง (บาท)
1. วิธีการปัจจุบัน	21	4,348.4	29,092.0
2. วิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด	17 (-19.05%)	4,197.4 (-3.47%)	26,937.0 (-7.41%)
3. วิธีการกวาด	16 (-23.81%)	4,178.4 (-3.91%)	26,492.0 (-8.94%)
4. วิธีการประหยัด	15 (-28.57%)	4,103.7 (-5.63%)	25,768.5 (-11.42%)
5. วิธีการค้นหาแบบทาบู โดยใช้ค่าตอบเริ่มต้นจากวิธีการดังนี้			
5.1 วิธีการปัจจุบัน	15 (-28.57%)	4,031.2 (-7.29%)	25,406.0 (-12.67%)
5.2 วิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด	15 (-28.57%)	4,045.9 (-6.98%)	25,479.5 (-12.42%)
5.3 วิธีการกวาด	15 (-28.57%)	4,044.7 (-6.98%)	25,473.5 (-12.44%)
5.4 วิธีการประหยัด	15 (-28.57%)	4,031.2 (-7.29%)	25,406.0 (-12.67%)

จากตารางที่ 10 เมื่อเปรียบเทียบวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด วิธีการกวาดและวิธีการประหยัด พบว่าวิธีการประหยัดได้แผนการจัดส่งที่มีค่าใช้จ่ายขนส่งต่ำสุดจาก 3 วิธี โดยมีค่าใช้จ่ายขนส่งรวม 25,768.5 บาทต่อสัปดาห์สามารถลดค่าใช้จ่ายได้ 3,323.5 บาท ซึ่งค่าใช้จ่ายที่ได้ไม่ต่างจากแผนการจัดส่งที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบทาบูมากนัก โดยวิธีการกวาดและวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดให้แผนการขนส่งที่มีค่าใช้จ่ายมากขึ้นตามลำดับ

ผลการเปรียบเทียบพบว่าวิธีอีวิริสติก 4 วิธีสามารถลดจำนวนเส้นทาง ระยะทางและต้นทุนการขนส่งจากวิธีการจัดเส้นทางปัจจุบันที่มีการจัดส่งไข่ไก่ 21 เส้นทางต่อสัปดาห์ ระยะทางรวม 4,348.4 กิโลเมตรต่อสัปดาห์ และเป็นค่าใช้จ่าย 29,092 บาทต่อสัปดาห์ แผนการขนส่งที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบทาบูโดยใช้ค่าตอบเริ่มต้นจากวิธีปัจจุบันและวิธีการประหยัดสามารถลดค่าใช้จ่าย

ได้มากที่สุดคิดเป็น 12.67% จากแผนขนส่งฉบับปัจจุบัน ซึ่งได้เส้นทางขนส่ง 15 เส้นทางต่อสัปดาห์ลดลงจำนวน 3 เส้นทาง ได้ระยะทางรวม 4,031.2 กิโลเมตรต่อสัปดาห์ลดลง 317.2 กิโลเมตร โดยมีค่าใช้จ่ายรวม 25,406 บาทต่อสัปดาห์ลดลง 3,686 บาท และแผนการขนส่งที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบทาบูที่ใช้ค่าตอบเริ่มต้นจากวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดและวิธีการกวาดมีค่าใช้จ่ายขนส่ง 25,473.5 บาทต่อสัปดาห์ สามารถลดค่าใช้จ่ายจากวิธีการปัจจุบันได้ถึง 12.42% และ 12.44% ตามลำดับ โดยก็มีค่าใช้จ่ายใกล้เคียงกับแผนขนส่งที่ค่าใช้จ่ายที่น้อยสุดที่มีความต่างเพียง 67.5 บาทต่อสัปดาห์

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การวางแผนตารางและเส้นทางจัดส่งไข่ไก่ของกรณีศึกษาประกอบด้วยรถบรรทุกตู้ทึบ 4 ล้อจำนวน 3 คัน ดำเนินการจัดส่งไข่ไก่ไปยังลูกค้า 19 ราย โดยมี 6 รายที่ต้องจัดส่ง 2 รอบต่อสัปดาห์ โดยแผนการจัดส่งปัจจุบัน ในรอบสัปดาห์มีเส้นทางจัดส่ง 21 เส้นทางเป็นระยะทาง 4,348.4 กิโลเมตรและเป็นค่าใช้จ่าย 29,092 บาท ซึ่งมีจำนวนเส้นทางขนส่งและระยะทางเกินจำเป็น เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งสำหรับกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ 4 วิธีการ ประกอบด้วยวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด วิธีการกวาด วิธีการประหยัดและวิธีการค้นหาแบบทาบู พบว่า วิธีการค้นหาแบบทาบูสามารถลดจำนวนเส้นทาง ระยะทางขนส่งรวมและค่าใช้จ่ายในการขนส่งรวมได้มากที่สุด ซึ่งแผนการจัดส่งในรอบสัปดาห์ที่ได้มีจำนวน 15 เส้นทางขนส่งเป็นระยะทาง 4,103.2 กิโลเมตรและคิดเป็นค่าใช้จ่าย 25,406 บาท สามารถลดจำนวนเส้นทางขนส่งได้ 3 เส้นทาง ลดระยะทางลดได้ 317.2 กิโลเมตร และลดค่าใช้จ่ายรวม 3,686 บาทต่อสัปดาห์ แผนการจัดส่งที่ได้จากวิธีการประหยัดมีค่าใช้จ่ายใกล้เคียงกับวิธีการค้นหาแบบทาบูโดยมีค่าใช้จ่ายรวม 25,768.5 บาท หรือความต่างเพียง 362.5 บาท หรือคิดเป็น 1.43% การต่อยอดงานวิจัยในอนาคตอาจจะศึกษาสถานการณ์ของปัญหาการจัดส่งไข่ไก่มีความผันผวนของความต้องการของลูกค้า ขนาดและจำนวนของรถบรรทุกที่มีการเปลี่ยนแปลง

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

7. เอกสารอ้างอิง

- เกศินี สื่อนิ (2563). การจัดเส้นทางการขนส่งสินค้าโดยการเปรียบเทียบระหว่างการใช้วิธีเซฟวิ่ง อัลกอริทึมและวิธีขั้นตอนวิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดอัลกอริทึม. **วารสารเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยทักษิณ**, 12(2), 1-14.
- คชาทรัพย์ คำสอน, ศศิธร ร่องกลิน, และนราธิป สุพัฒน์ธนานนท์. (2563). **การจัดเส้นทางการขนส่งสินค้าที่เหมาะสม โดยใช้วิธีการหาตำแหน่งจากระยะทางที่ใกล้ที่สุด กรณีศึกษา บริษัทกระจายสินค้าเครื่องดื่ม**. (วิทยานิพนธ์). มหาวิทยาลัยศรีปทุม วิทยาเขตขอนแก่น, ขอนแก่น.
- ณัฐนิชา ประยูรสุข, ณัฐพัชร์ ภัทรเสฏฐ์, พงศ์สิริ จันทรสว่าง และสหรัฐ ผลดีประสิทธิ์. (2561). **การจัดเส้นทางการขนส่งวัตถุดิบและการกระจายสินค้าของธุรกิจนม**. (ปัญหาพิเศษปริญญาตรี). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นคร ไชยวงศ์ศักดิ์, ประเวช อนันต์เอื้อ, นิเวศ จินะบุญเรือง, เสกสรร วินยางค์กุล, ขวัญเรือน สิ้นณรงค์, ธนากร จักรแก้ว, วุฒิชัย ใจบาล และณัฐวุฒิ ศรีสว่าง. (2558). **การจัดเส้นทางการขนส่งโดยใช้เซฟวิ่งอัลกอริทึมและตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย กรณีศึกษาโรงงานน้ำดื่ม**. **วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน**, 3(1), 51-61.
- นฤมล ไชยโคตร. (2560). **การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการฮิวริสติกในการจัดการการขนส่งสำหรับโรงงานกรณีศึกษาโรงงานจำหน่ายอุปกรณ์ระบบงานไฟฟ้า**. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**, 12(2), 169-177.
- พิชญ์ พันธุ์พิพัฒน์ และเปรมพร เขมาวุฒม์. (2562). **การจัดเส้นทางการขนส่งของรถบรรทุกขนาดใหญ่สำหรับสินค้าประเภทเทกองและกระสอบ กรณีศึกษาบริษัทผู้ให้บริการขนส่ง**. **วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต**, 9(1), 136-151.
- รวีโรจน์ ป่องทรัพย์, และธัญภัส เมืองปิ่น. (2564). **การจัดเส้นทางการขนส่งชิ้นส่วนรถยนต์ กรณีศึกษาบริษัทขนส่งชิ้นส่วนรถยนต์**. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี**, 5(2), 12-23.
- วุฒิไกร ไชยปัญญา. (2560). **การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในการปรับปรุงเส้นทางจัดส่งสินค้า สำหรับผู้ประกอบการธุรกิจโรงน้ำแข็ง ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม**. **วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต**, 7(2), 1-13.



การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้า
และความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์
FEASIBILITY STUDY OF GENERATING ELECTRICITY AND HEAT
FROM A SOLAR CELL

สรวิศ สอนสารี^{1*}, สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์²

Sorawit Sonsaree^{1*}, Somchai Jiajitsawat²

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

²วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹ Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

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

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

วันที่เข้าระบบ 7 พฤศจิกายน 2567

วันที่แก้ไขบทความ 21 ธันวาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 22 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตไฟฟ้าและความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการศึกษาจะเป็นการทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งไม่เกิน 500 W และมีการติดตั้งชุดระบายความร้อนที่ทำจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2” ยาว 1,050 mm. จำนวน 12 ท่อต่อร่วมกับท่อร่วม หรือ ท่อ Header ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8” ที่มีความยาว 800 mm. จำนวน 2 ท่อ (ด้านบนและด้านล่าง) ผลการทดสอบที่อัตราการไหลของน้ำ ระบายความร้อนแตกต่างกัน 3 ค่า 50, 100 และ 150 LPH พบว่า การติดตั้งชุดระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะช่วยให้ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยรวมของระบบเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากระบบสามารถนำเอาน้ำร้อนที่เกิดจากการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ ซึ่งโดยปกติไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ โดยประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อระบบมีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเท่ากับ 150 LPH และระบบจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำจาก 27.5 °C ไปเป็นอุณหภูมิสุดท้าย 41.4 °C โดยคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ 10,684.08 kJ

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพ, เซลล์แสงอาทิตย์, ความร้อนเหลือทิ้ง

Abstract

This research investigates the generation of electricity and heat using a solar cell power generation system with a maximum installed capacity of no more than 500 W. A cooling system consists of 12 copper pipes, each with a 1/2" diameter and a length of 1,050 mm connected (at both the upper and lower sides) to two manifold or header pipes with a 5/8" diameter and a length of 800 mm to enhance system performance. By physically separating the heat sink from the solar panels, the system was able to capture and utilize the waste heat generated during the cooling process. Experimental data collected at cooling water flow rates of 50, 100, and 150 LPH indicated a significant increase in overall power generation efficiency compared to a traditional integrated configuration. An increase in cooling water flow rate resulted in a corresponding increase in solar cell efficiency. The optimal performance was observed at a flow rate of 150 LPH, where the system was capable of absorbing 10,684.08 kJ of heat energy, leading to a temperature rise of 13.9 °C from 27.5 °C to 41.4 °C.

Keywords: Efficiency, Solar cell, Waste heat

1. บทนำ

จากเป้าหมาย (ร่าง) แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2567 – 2580 หรือ AEDP 2024 (สถาบันวิทยาการพลังงาน, 2567) พบว่า ประเทศไทยมีแผนที่จะเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกร้อยละ 36 ภายในปี พ.ศ. 2580 และมีเป้าหมายในการผลิตและใช้งานพลังงานทดแทนให้บรรลุความเป็นกลางทางคาร์บอนภายในปี พ.ศ. 2593 ด้วยเหตุนี้เองประเทศไทยจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาหาเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่จะสามารถนำมาใช้ให้เหมาะสมกับศักยภาพพลังงานทดแทนในด้านต่างๆ นอกจากนี้ยังเป็นที่ยอมรับกันว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานทดแทนโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีศักยภาพพลังงานค่อนข้างสูง โดยมีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 17.5 MJ/m²-day (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2565) จึงทำให้ในปัจจุบันภาครัฐได้ให้การสนับสนุนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นจำนวนมาก ประกอบกับราคาค่าใช้จ่ายของเทคโนโลยีที่มีแนวโน้มที่ถูกลง จึงทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ทำให้ภาครัฐเร็ววันสามารถที่จะเข้าถึงเทคโนโลยีดังกล่าวได้ ซึ่งจะส่งผลให้เป้าหมายของแผน AEDP 2024 ของประเทศไทยประสบความสำเร็จตามเป้าหมายที่วางไว้ได้

อย่างไรก็ตามการใช้พลังงานในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม มักจะมีการใช้พลังงานทั้งพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน และจากที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นเป็นที่ทราบกันว่าเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เพียงอย่างเดียว แต่หากต้องการพลังงานความร้อน (น้ำร้อน) เพื่อนำมาใช้งานมักจะนำเอาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไปป้อนให้กับเครื่องทำน้ำร้อนหรือระบบทำความร้อนอื่นๆ ที่ใช้พลังงานไฟฟ้า โดยกระบวนการดังกล่าวเปรียบเสมือนการลดคุณภาพของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่สามารถผลิตได้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน (น้ำร้อน) ที่เรียกว่า แผงรับความร้อนแบบ PV-thermal (PVT) (Herez *et al.*, 2020) ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ทั้งในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรมที่มีสัดส่วนการใช้พลังงานในภาพรวมของประเทศในระดับสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ให้ความสำคัญไปที่การศึกษาการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าและความร้อนโดยการติดตั้งชุดระบายความร้อนจากท่อทองแดงที่สามารถหาซื้อได้โดยทั่วไปในประเทศ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา บรรณพงศ์ (2562) อุณหภูมิส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงได้ศึกษาการระบายความร้อนด้วยการระเหยผ้าเปียกบนแผ่นเรียบเพื่อประยุกต์ใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการศึกษาพบว่า สามารถใช้ผ้าชุมน้ำติดตั้งไว้ด้านหลังแผงเพื่อช่วยลดอุณหภูมิได้ โดยผ้าที่ใช้ควรเป็นผ้าที่หนาหรือผ้าที่มีความพรุนมากเพื่อยืดระยะเวลาในการลดอุณหภูมิ (นเรศ และปราโมทย์, 2565) เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานเป็นเวลานานจะเกิดความร้อนขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง จึงได้ออกแบบระบบระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 330 W ขึ้น ประกอบด้วย (1) ติดตั้งพัดลมชนิด StormTech รุ่น STM001-002 จำนวน 10 ตัว และใช้ไม้อัดปิดพื้นที่ด้านหลัง (2) ติดตั้งชุดสายพ่นน้ำสเปรย์ไปยังด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยติดตั้งห่างจากแผงเป็นระยะ 10 cm กระจายทั่วแผง 25 จุด ผลการศึกษาพบว่า เมื่อติดตั้งระบบระบายความร้อนด้วยอากาศและระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ จะสามารถเพิ่มการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ร้อยละ 7.52 และ 6.02 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อน (ขจรเดช และพัฒน์พงษ์, 2560) เปรียบเทียบระบบระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 6 วิธี ประกอบไปด้วย (1) ระบายความร้อนออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ออกสู่สภาพแวดล้อมโดยตรง (2) ระบายความร้อนโดยใช้พัดลมระบายความร้อน (3) ระบายความร้อนโดยใช้เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับพัดลมระบายความร้อน (4) ระบายความร้อนโดยใช้ครีบบระบายความร้อน (5) ระบายความร้อนโดยใช้เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับครีบบระบายความร้อน และ (6) ระบายความร้อนโดยใช้เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับครีบบระบายความร้อนและพัดลมระบายความร้อน ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของระบบระบายความร้อนของระบบที่ 1 ถึงระบบที่ 6 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 41.49, 50.00, 53.06, 60.42, 69.96 และ 91.82 °C ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบระบายความร้อน (6) ประกอบไปด้วยเซลล์

เทอร์โมอิเล็กทริก ครีบบระบายความร้อนและพัลลระบายความร้อนมีความสามารถในการระบายความร้อนออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีที่สุด (สิทธิพัฒน์ และคณะ, 2561) ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้งชุดการพ่นละอองน้ำที่ด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการศึกษาพบว่า ระบบจะช่วยลดอุณหภูมิเฉลี่ยด้านหน้าและด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 19.90 °C และ 24.90 °C ตามลำดับ โดยคิดเป็นประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 13.79 (ธนภุต, 2564) เพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยระบบฮีทไปป์คู่ลิ่งที่ทำจากท่อทองแดงกลมมีเกลียวภายในที่ทำหน้าที่เป็นวิก ท่อฮีทไปป์จำนวน 7 ท่อ ที่ใช้น้ำกลั่นเป็นของไหลทำงาน จะถูกติดตั้งด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อติดตั้งระบบฮีทไปป์จะสามารถลดอุณหภูมิเฉลี่ยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ 1.44 °C หรือคิดเป็นร้อยละ 2.70 และสามารถผลิตพลังงานต่อปีมากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการติดตั้งได้เท่ากับ 22.60 kWh หรือคิดเป็นร้อยละ 11.30 (ยุธนา, 2565; อนุรัตน์ และยุธนา, 2561) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้งท่อความร้อนเพื่อระบายความร้อน ผลการศึกษาเปรียบเทียบ (1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ติดตั้งท่อความร้อน (2) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนที่ใช้เอทานอลเป็นสารทำงาน และ (3) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนที่ใช้ R-11 เป็นสารทำงาน ผลการศึกษาพบว่า กรณีชุดความร้อน (ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.00 mm บีบให้มีขนาด 20.00 mm และรัศมี 2.60 mm ภายในติดตั้งวัสดุพูนแบบตาข่ายทองแดงขนาด 100 Mesh) ที่ใช้ R-11 เป็นสารทำงานจะช่วยให้การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยมีอุณหภูมิผิวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ย 49.20 °C และมีประสิทธิภาพร้อยละ 11.80

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานในการผลิตไฟฟ้าลดลง นอกจากนี้จากการศึกษางานวิจัยภายในประเทศยังพบอีกว่า มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ศึกษาถึงเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการลดความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ยกตัวอย่างเช่น การติดตั้งท่อความร้อน การติดตั้งพัลลระบายความร้อน และการติดตั้งชุดสเปร์รน้ำลดความร้อน เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการศึกษการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการติดตั้งท่อทองแดงเพื่อระบายความร้อนและนำความร้อนดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆ ประกอบกับผลงานวิจัยของทีมผู้วิจัยโดย Sorawit & Somchai (2021); ขจิตร และคณะ (2566); พงศธร และคณะ (2564); สรวิต และสมชาย (2564); สรวิต และคณะ (2564) ที่ได้ดำเนินการศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ กล่าวคือ การระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการติดตั้งชุดระบายความร้อนอย่างง่ายที่ได้ดำเนินการในงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น ได้มีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนและแผ่นไม้อัด ที่ทำหน้าที่เสมือนกรอบป้องกันไม่ให้ความร้อนสามารถระบายออกจากหลังแผง

เซลล์แสงอาทิตย์ได้ ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดความร้อนสะสม ส่งผลให้การระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ดี (ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง (Kaldellis *et al.*, 2014; Skoplaki & Palyvos, 2009)) ถึงแม้จะสามารถผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิต่ำมาใช้ประโยชน์ได้สำหรับงานวิจัยนี้จึงเป็นการออกแบบเพื่อแก้ปัญหาการสะสมความร้อนที่เกิดภายใต้หลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการนำเอาฉนวนกันความร้อนและแผ่นไม้ที่ทำหน้าที่เสมือนกรอบป้องกันความร้อนออก หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการติดตั้งชุดท่อทองแดงเพื่อระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง อีกทั้งในการศึกษายังเพิ่มจำนวนท่อทองแดงเป็น 2 ท่อ ทั้งนี้ก็เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการระบายความร้อนว่าดีขึ้นหรือไม่

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาการระบายความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการติดตั้งท่อน้ำที่ทำจากท่อทองแดงแบบท่อนคู่

2.2 เพื่อทดสอบสภาวะการทำงานจริงของการทำงานร่วมกันระหว่างชุดระบายความร้อนที่ถูกติดตั้งร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้า

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อน

การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนของชุดระบายความร้อนที่ติดตั้งบริเวณหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (สรวิศ สอนสารี และคณะ, 2564) แสดงดังสมการที่ (1)

$$\dot{Q}_{System} = \frac{Mc_p}{t} (T_{Final} - T_{Initial}) \quad (1)$$

เมื่อ \dot{Q}_{System} คือ ปริมาณความร้อนที่ระบบผลิตได้ (kW), M คือ ปริมาณของน้ำในถังน้ำ (Liter), c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg-K), t คือ เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (วินาที), $T_{Initial}$ คือ อุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$) และ T_{Final} คือ อุณหภูมิของน้ำสุดท้าย ($^{\circ}\text{C}$)

3.2 ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การคำนวณประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Sun, V. *et al.*, 2020) แสดงดังสมการที่ (2) (งานวิจัยนี้ไม่คิดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับปั้มน้ำระบายความร้อน)

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{I_T \times A} \quad (2)$$

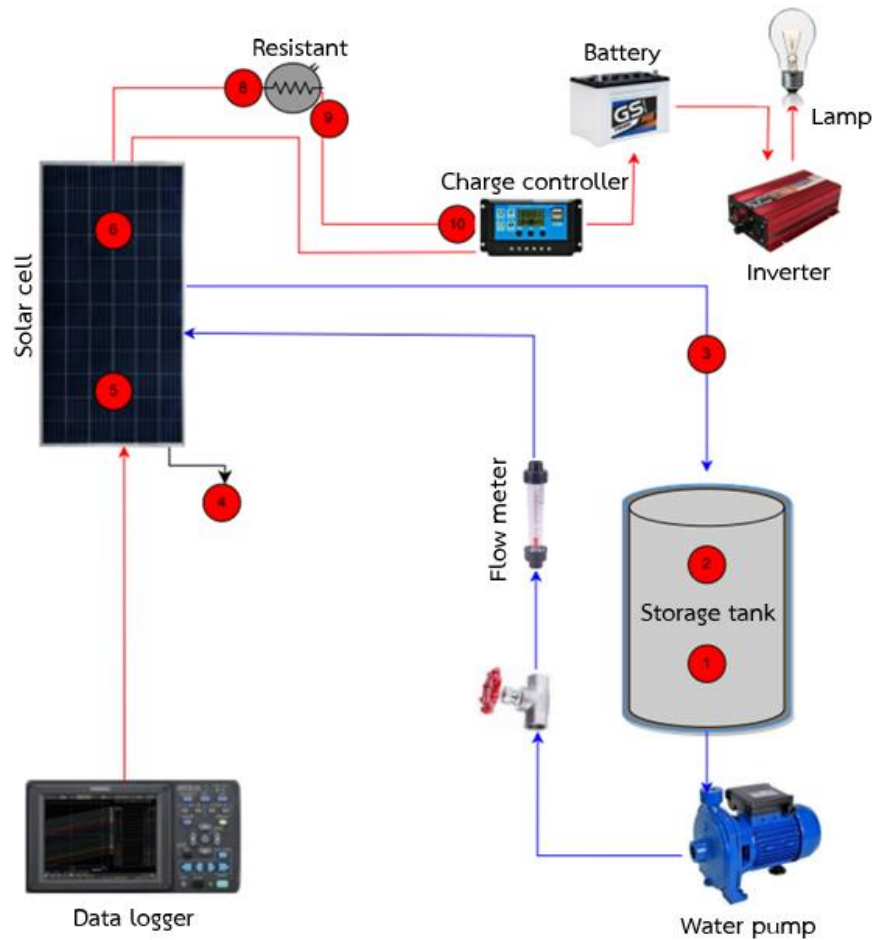
$$P_{PV} = I \times V \quad (3)$$

เมื่อ η_{PV} คือ ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (%), I_T คือ ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ (W/m^2), A คือ พื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (m^2), I คือ กระแสไฟฟ้า (Amp), V คือ แรงดันไฟฟ้า (Volt), P_{PV} คือ กำลังไฟฟ้า (Watt)

4. วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการติดตั้งชุดระบายความร้อนที่ทำจากท่อทองแดงหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ระบบแสดงดังภาพที่ 1 มีหลักการทำงานคือ ระยะเวลาระหว่างวันระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic) จะทำการผลิตพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง และพลังงานไฟฟ้างดักจะถูกส่งไปยังเครื่องควบคุมการประจุไฟฟ้า (Charge controller) เพื่อควบคุมการประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ ในช่วงระยะเวลาว่างวันไฟฟ้าที่ถูกบรรจุในแบตเตอรี่จะถูกดึงมาใช้งานผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) จากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับภาระโหลด (Load) (ในงานวิจัยนี้ใช้หลอดไฟแบบหลอดไส้เป็นโหลดในการดึงพลังงานไฟฟ้าออกจากระบบ) ในขณะเดียวกันปั้มน้ำจะปั้มน้ำอุณหภูมิต่ำจากถังเก็บสะสมความร้อนมารับความร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ซึ่งมีการติดตั้งท่อทองแดงไว้ใต้แผงเพื่อระบายความร้อน แสดงดังภาพที่ 2 โดยในการศึกษาได้ดำเนินการสร้างและทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (PVT) ที่มีกำลังการผลิตติดตั้งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เกิน 500 W โดยอุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัยสามารถแสดงได้ดังนี้

4.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic) แบบ Multicrystalline ยี่ห้อ Trinasolar รุ่น TSM-345PE15H โดยมีรายละเอียดของแผงเซลล์ดังนี้ Maximum power (P_{max}) 345 Wp \pm 2.5%, Maximum power voltage (V_{mp}) 37.7 V, Maximum power current (I_{mp}) 9.15 A, Open circuit voltage (V_{oc}) 46.4V \pm 3%, Short circuit current (I_{sc}) 9.62A \pm 4% และขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์กว้าง \times ยาว 2,024 \times 959 mm

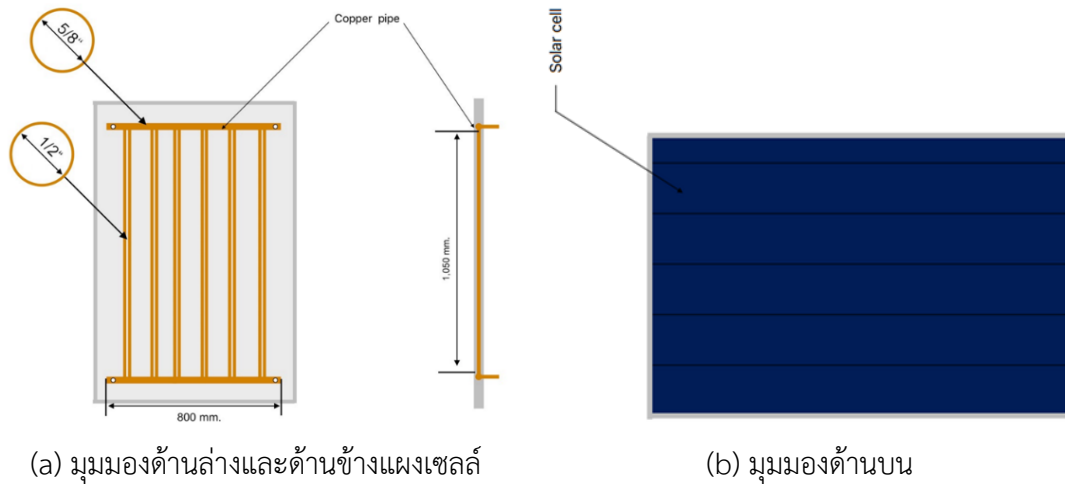


ภาพที่ 1 ไดอะแกรมอย่างง่ายการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ที่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อน

4.2 ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2" ยาว 1,050 mm จำนวน 12 ท่อ (2 ท่อต่อ 1 ชุด จำนวน 6 ชุด) ต่อร่วมกับท่อรวม (ท่อ Header) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8" ที่มีความยาว 800 mm จำนวน 2 ท่อ (ด้านบนและด้านล่าง) แผงท่อทองแดงดังกล่าวจะถูกวางยึดติดกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ลักษณะการวางตำแหน่งของชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังภาพที่ 3

4.3 ถังน้ำร้อน (Storage tank) (แสดงดังภาพที่ 3 (a)) ขนาด 200 L (บรรจุน้ำ 180 L) เก็บสะสมน้ำร้อนที่ได้จากการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

4.4 ปั๊มน้ำหมุนเวียนในระบบ ยี่ห้อ MINUMA Model YDQ-60 (แสดงดังภาพที่ 3 (b)) ใช้สำหรับปั๊มน้ำร้อนอุณหภูมิต่ำจากถังน้ำร้อนไปยังระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (PVT) จากนั้นน้ำร้อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนถูกส่งไปเก็บยังถังน้ำร้อน



(a) มุมมองด้านข้างและด้านข้างแผงเซลล์

(b) มุมมองด้านบน



(c) ลักษณะของท่อทองแดงที่ได้ติดตั้งจริง

ภาพที่ 2 แสดงการติดตั้งชุดระบายความร้อนแบบท่อคู่ใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์

4.5 อุปกรณ์ควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ ยี่ห้อ SUOER รุ่น PWMST-W1230 30A 12V/24V (แสดงดังภาพที่ 3(c)) ทำหน้าที่ประจุไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลงในแบตเตอรี่จนเต็ม และควบคุมไม่ให้ประจุไฟฟ้ามากเกินไปเมื่อมีการประจุไฟฟ้าเต็ม

4.6 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า หรือ Inverter ยี่ห้อ SUOER รุ่น SDB-1000A (แสดงดังภาพที่ 3(d)) ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากแบตเตอรี่หรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ก่อนนำไปใช้งาน

4.7 แบตเตอรี่ ยี่ห้อ Focus รุ่น Turbo ขนาด 12 V (แสดงดังภาพที่ 3(e)) ต่ออนุกรมจำนวน 2 ลูก (เนื่องจากแรงดันที่ออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาด 24 V)

4.8 หลอดไส้ขนาด 20 W (แสดงดังภาพที่ 3(f)) สำหรับเป็นหลอดไฟฟ้าให้กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

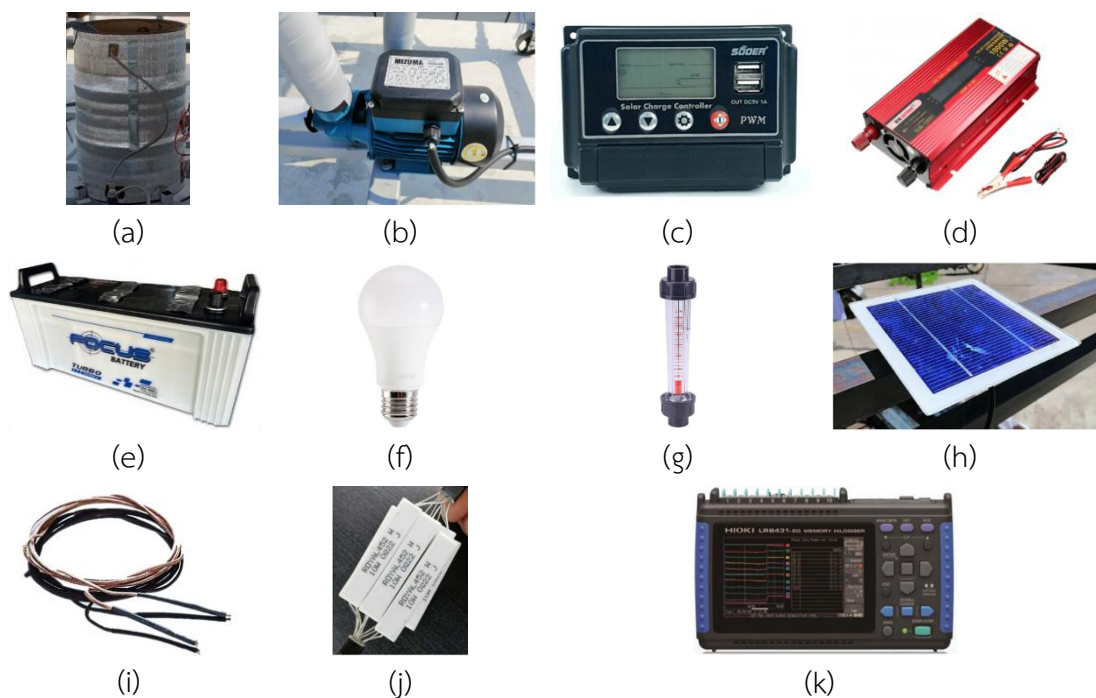
4.9 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ ยี่ห้อ Durable plastic tube type flow meter LS-E/ G Series ที่มีย่านการวัด 25 – 250 LPH และความคลาดเคลื่อน +4% (แสดงดังภาพที่ 3(g))

4.10 เซลล์อ้างอิง (Reference cell) (แสดงดังภาพที่ 3(h)) ใช้สำหรับวัดปริมาณรังสีอาทิตย์ในหน่วย mV (มิลลิโวลต์)

4.11 Thermocouple type K (แสดงดังภาพที่ 3(i)) ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ

4.12 ตัวต้านทานขนาด 0.02 Ohm ต่อขนานจำนวน 10 ตัว ทำหน้าที่วัดกระแสไฟฟ้า (Amp) ที่ได้จากการวัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน (แสดงดังภาพที่ 3(j))

4.13 เครื่องบันทึกข้อมูลลอกประสงค์ LR8431 ยี่ห้อ HIOKI (แสดงดังภาพที่ 3(k)) ใช้สำหรับเก็บบันทึกข้อมูลผลการทดสอบแบบอัตโนมัติ เช่น อุณหภูมิ ปริมาณรังสีอาทิตย์ และแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น



ภาพที่ 3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการทดสอบ

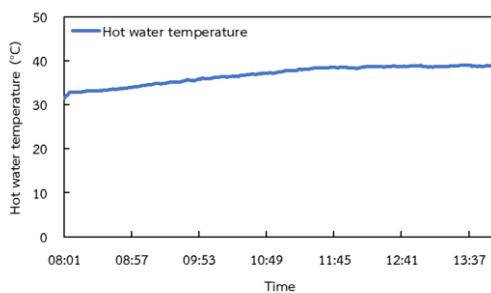
5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตไฟฟ้าและความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการติดตั้งท่อทองแดงที่ใช้น้ำเป็นของไหลทำงานเพื่อดึงความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการศึกษาแบ่งออกเป็น (1) ผลการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งท่อทองแดงกับชุดทดสอบที่ไม่มีการติดตั้งท่อทองแดงเพื่อระบายความร้อน และ (2) การหาอัตราการไหลเวียนของน้ำระบายความร้อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ผลการศึกษาจากการทดสอบในช่วงเวลา 8.00 – 14.00 น. เมื่ออัตราการไหล

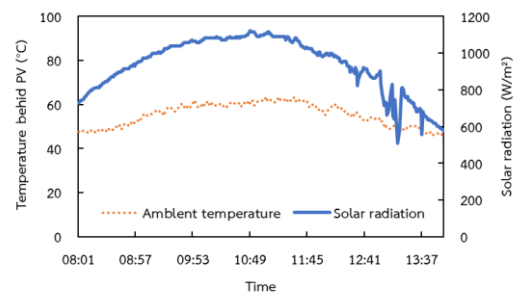
ของน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ได้จากการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยผลการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 50 LPH

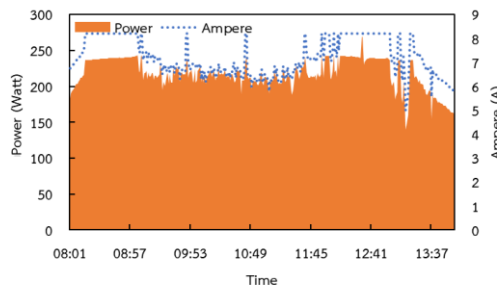
ระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้น 31.50 °C ไปเป็นอุณหภูมิสุดท้าย 38.90 °C ($\Delta T = 7.40$ °C) เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 935.55 kW โดยคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ 5,567.76 kJ (แสดงดังภาพที่ 4)



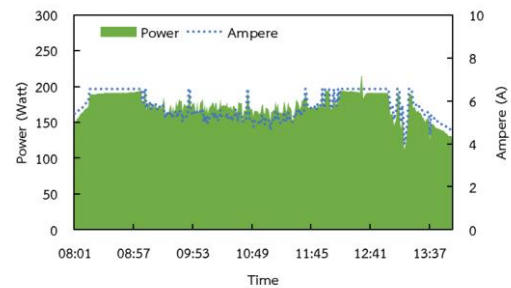
(a) ปริมาณรังสีอาทิตย์ (W/m^2) และอุณหภูมิแวดล้อม (°C)



(b) อุณหภูมิน้ำร้อน (°C) ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์



(c) กระแส (Amp) และ พลังงานไฟฟ้า (Power) ของระบบ (ติดตั้งชุดระบายความร้อน)

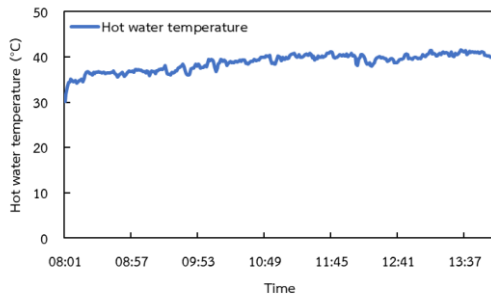


(d) กระแส (Amp) และ พลังงานไฟฟ้า (Power) ของระบบ (ไม่ติดตั้งชุดระบายความร้อน)

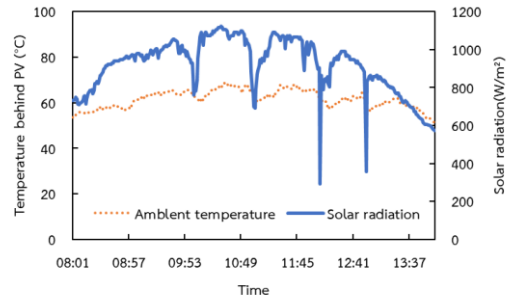
ภาพที่ 4 ผลการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 50 LPH

5.2 อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 100 LPH

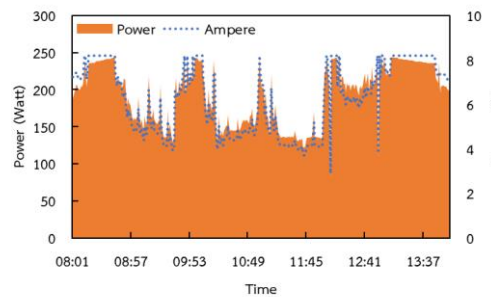
ระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้น 30.10 °C ไปเป็นอุณหภูมิสุดท้าย 40.30 °C ($\Delta T = 10.20$ °C) เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 852.70 kW โดยคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ 7,674.48 kJ (แสดงดังภาพที่ 5)



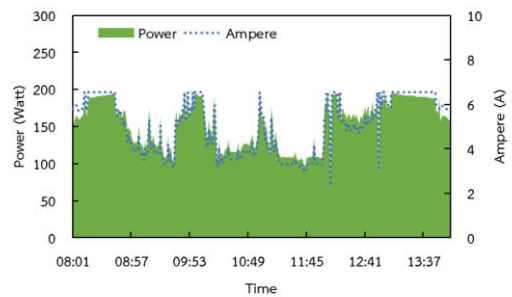
(a) ปริมาณรังสีอาทิตย์ (W/m^2) และอุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}C$)



(b) อุณหภูมิน้ำร้อน ($^{\circ}C$) ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์



(c) กระแส (Amp) และ พลังงานไฟฟ้า (Power) ของระบบ (ติดตั้งชุดระบายความร้อน)

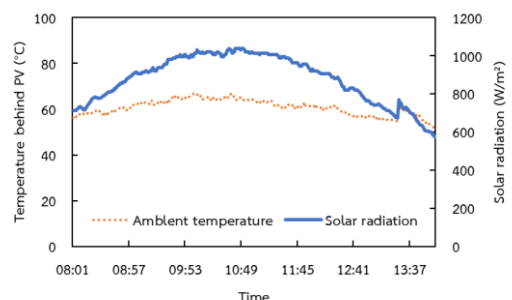
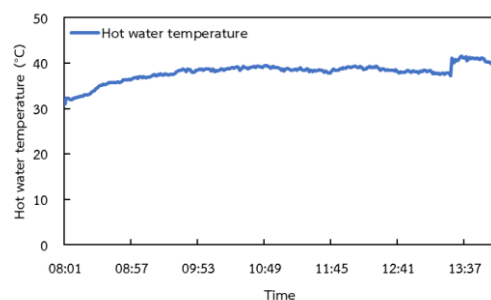


(d) กระแส (Amp) และ พลังงานไฟฟ้า (Power) ของระบบ (ไม่ติดตั้งชุดระบายความร้อน)

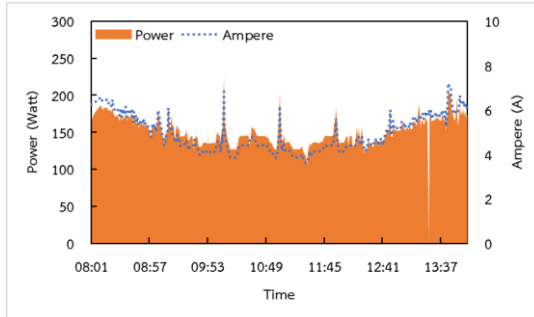
ภาพที่ 5 ผลการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 100 LPH

5.3 อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 150 LPH

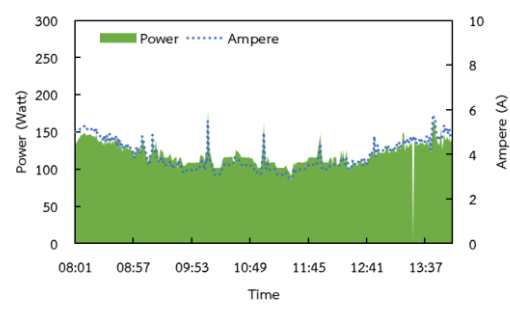
ระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้น $27.50^{\circ}C$ ไปเป็นอุณหภูมิสุดท้าย $41.40^{\circ}C$ ($\Delta T = 13.90^{\circ}C$) เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์เฉลี่ย $874.87 kW$ โดยคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ $10,684.08 kJ$ (แสดงดังภาพที่ 6)



(a) ปริมาณรังสีอาทิตย์ (W/m^2) และอุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}C$)



(b) อุณหภูมิน้ำร้อน ($^{\circ}C$) ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์



(c) กระแส (Amp) และ พลังงานไฟฟ้า (Power) ของระบบ (ติดตั้งชุดระบายความร้อน)

(d) กระแส (Amp) และ พลังงานไฟฟ้า (Power) ของระบบ (ไม่ติดตั้งชุดระบายความร้อน)

ภาพที่ 6 ผลการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน กรณีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 150 LPH

ตารางที่ 1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน เมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนแตกต่างกัน (50, 100 และ 150 LPH)

Flow rate (LPH)	$T_{Initial}$ ($^{\circ}C$)	T_{Final} ($^{\circ}C$)	Thermal Energy (kJ)	With cooling		Without cooling	
				Power (W)	η_{PV} (%)	Power (W)	η_{PV} (%)
50	31.5	38.9	5,567.76	217.32	21	173.85	18
100	30.1	40.3	7,674.48	196.67	22	154.13	20
150	27.5	41.7	10,684.08	193.30	28	154.64	26

ผลการศึกษาเปรียบเทียบการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการติดตั้งท่อทองแดงเพื่อระบายความร้อน เมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนมีค่าแตกต่างกัน 3 อัตราการไหล 50, 100 และ 150 LPH แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า ผลการทดสอบในช่วงเวลา 8.00 – 14.00 น. กระแสไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ได้รับตลอดช่วงระยะเวลาระหว่างวัน และเมื่อพิจารณาอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังพบอีกว่า อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อระบบ



มีอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน 150 LPH นอกจากนี้ผลการศึกษายังถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ สรวิศ และคณะ (2564) ที่มีการติดตั้งระบบระบายความร้อนที่ประกอบไปด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8" ความยาว 1,815 mm จำนวน 6 ท่อ ต่อร่วมกับท่อร่วมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7/8" ที่มีความยาว 799 mm จำนวน 2 ท่อ พบว่า ผลการพัฒนาปรับปรุงเมื่อเพิ่มจำนวนท่อจาก 1 ท่อ เป็น 2 ท่อ ที่อัตราการไหลของน้ำภายในชุดระบายความร้อนใกล้เคียงกันเมื่อมีท่อทองแดงเพิ่มเป็น 2 ท่อ และไม่มีฉนวนกันความร้อนหุ้มอยู่ด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากไม่มีความร้อนสะสมจากการติดตั้งฉนวนกันความร้อน และการเพิ่มท่อทองแดงเสมือนเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน อย่างไรก็ตามจำเป็นที่จะต้องเก็บข้อมูลการทดสอบระยะยาวเพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ ทั้งนี้ก็เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์เพื่อนำไปตัดสินใจต่อไป

ดังจะเห็นได้ว่าการติดตั้งชุดระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการตัดสินใจเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบกับสามารถนำน้ำร้อนที่ได้จากการระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานต่อได้ และการลดอุณหภูมิให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังสามารถยืดอายุการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเทียบกับแผงเซลล์ที่ไม่มีการติดตั้งชุดระบายความร้อนที่ประสิทธิภาพน้อยกว่า

6. สรุปผลและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าและความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์ การศึกษาจะเป็นการทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งไม่เกิน 500 W ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 ผลการทดสอบเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนที่มีอัตราการไหลแตกต่างกัน 3 อัตราการไหล 50, 100 และ 150 LPH พบว่า ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่ออัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนมีอัตราการไหล 150 LPH โดยที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 28

6.2 พลังงานความร้อนที่ผลิตได้ พบว่า ระบบสามารถผลิตอุณหภูมิสุดท้ายได้ 41.70 °C จากอุณหภูมิเริ่มต้น 27.50 °C ดังจะเห็นได้ว่าชุดระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ถูกพัฒนาสามารถนำมาประยุกต์ใช้ระบายความร้อนใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แล้วยังจะช่วยให้สามารถนำความร้อนเหลือทิ้งในรูปแบบน้ำร้อนอุณหภูมิต่ำมาใช้งานได้



อย่างไรก็ตามควรมีการเก็บผลการทดสอบในระยะยาว ทั้งนี้ก็เพื่อให้ทราบถึง จุดเด่น จุดด้อย ที่จะสามารถต่อยอดทางด้านวิศวกรรมได้ ประกอบกับควรมีการวิเคราะห์ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อให้ทราบถึงสภาวะการทำงานที่ดีที่สุด

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุน ววน.) ที่ได้สนับสนุนงบประมาณด้าน ววน. ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2566 ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม สำหรับสถานที่ทำงานวิจัย ขอขอบคุณ หน่วยวิจัยพลังงานสะอาด ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือต่างๆ ที่ช่วยทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

8. เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2565). รายงานฉบับสมบูรณ์ พัฒนาปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย แขวงรองเมือง เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 1 ระบบ
- บรรณพงษ์ กลีบประทุม. (2562). การพัฒนาแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของการระบายความร้อนด้วยการระเหยผ้าเปียกบนแผ่นเรียบเพื่อประยุกต์ใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์. (วิทยานิพนธ์). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ขจรเดช เวียงสงค์, และพัฒน์พงษ์ จำรัสประเสริฐ. (2560). ผลของการระบายความร้อนโดยใช้เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่ใช้ร่วมกับระบบรวมแสง. การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 8, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, กรุงเทพฯ.
- ขจิตร์ ไชยมงคล, อีรพงษ์ แรดทอง, พงศกร เสือผึ้ง, และสรวิศ สอนสารี. (2566, ธันวาคม). การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพลังงานความร้อนที่ได้จากการระบายความร้อนทิ้งของเซลล์แสงอาทิตย์. การประชุมวิชาการระดับชาติ "ราชภัฏกรุงเก่า" ครั้งที่ 6, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา, อยุธยา.
- นเรศ สิริวรารุช, และปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์. (2565). การศึกษาและเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและจุดคุ้มทุนของการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นายเรืออากาศ, 18, 38-49.



- พงศธร เต็มชำนาญ, ธนภัทร เขียวหวาน, ธวัชชัย ไพโรคนาม, วัชรพงษ์ สุขประเสริฐ, สรวิต สอนสารี, และสมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์. (2564, กรกฎาคม). **การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยการติดตั้งชุดระบายความร้อนอย่างง่าย**. นเรศวรวิจัยและนวัตกรรม ครั้งที่ 17 Resilience for Never Normal Era, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- ยุธนา ศรีอุดม, สังคม สัพโส, ชัยณรงค์ แสนเปา, และวิศิษฐ์ ชัดสาย. (2565). การเปรียบเทียบผลของสารทำงานภายในท่อความร้อนที่มีผลต่อการระบายความร้อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ท**, 3(3), 92-108.
- สถาบันวิทยาการพลังงาน (Thailand Energy Academy). (2567). นโยบายด้านพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานของประเทศไทย. ค้นจาก <https://www.thailand-energy-academy.org/assets/upload/coursedocument/file/01%20คุณวิวัฒน์พงษ์%20คูโรวาท%20Panel%20วพน.19%20v.1.pdf>
- สรวิต สอนสารี, และสมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์. (2564). สมการอย่างง่ายสำหรับใช้ทำนายอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วม. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม**, 40(3), 285-295.
- สรวิต สอนสารี, สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์, และสหัสยา ทองสาร. (2564). อัตราการไหลเวียนของน้ำระบายความร้อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์. **วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต**, 11(1), 74-90.
- ชนกฤต ลาภภูมิพจน์. (2564). **การเพิ่มประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ด้วยระบบฮีทไปป์คูลิ่ง**. (วิทยานิพนธ์), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- สิทธิพัฒน์ ภูทอง, วิชาญ วิมานจันทร์, และปรีดา จันทวงษ์. (2561, พฤศจิกายน). **การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ละอองน้ำลดอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์**. การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 2, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, กรุงเทพฯ.
- อนุรัตน์ เทวตา, และยุธนา ศรีอุดม. (2561). การศึกษาเชิงทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ท่อความร้อนแบบแบน. **วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร**, 12(2), 83-94.
- Herez, A., El Hage, H., Lemenand, T., Ramadan, M., & Khaled, M. (2020). Review on photovoltaic/thermal hybrid solar collectors: Classifications, applications and new systems. **Solar energy**, 207, 1321-1347.



- Sorawit, S., & Somchai, J. (2021). Paper presented at the The 11th SOLARIS 2021, International Symposium on Solar Energy and Efficient Energy Usage, Tokyo, Japan.
- Kaldellis, J. K., Kapsali, M., & Kavadias, K. A. (2014). Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. **Experience obtained from outdoor measurements in Greece. Renewable energy**, 66, 612-624.
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. **Solar energy**, 83(5), 614-624.
- Sun, V., Asanakham, A., Deethayat, T., & Kiatsiriroat, T. (2020). Increase of power generation from solar cell module by controlling its module temperature with phase change material. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 34, 2609-2618.



การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการ
คำสั่งซื้อในธุรกิจค้าส่งอาหารสด

DEVELOPMENT OF A WEB APPLICATION TO ENHANCE ORDER
MANAGEMENT EFFICIENCY IN WHOLESALE FRESH FOOD BUSINESS

วัชรระ กลางกระโทก, ชิตณรงค์ เฟ็งแดง, พันธุ์ธิดา ลิ้มศรีประพันธ์, วชิระ ลิ้มศรีประพันธ์*

Watchara Klang, Chitnarong Phengtaeng, Phantida Limsripraphan,

Wachira Limsripraphan*

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

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

*Corresponding author e-mail: wachira.l@psru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 12 ธันวาคม 2567

วันที่แก้ไขบทความ 30 ธันวาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 30 ธันวาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่รองรับการทำงานในทุกอุปกรณ์ (Responsive design) สำหรับการจัดการคำสั่งซื้อในธุรกิจค้าส่งอาหารสด ซึ่งเดิมประสบปัญหาจากการใช้ไลน์แชท ทำให้เกิดการสื่อสารที่ผิดพลาด คำสั่งซื้อสูญหาย และการจัดลำดับคำสั่งซื้อที่ไม่ถูกต้อง ส่งผลให้เกิดความเสียหายทางการเงินและกระบวนการทำงานที่ล่าช้า การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันนี้ใช้หลักการ CRUD (Create, Read, Update, Delete) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการข้อมูล ลดระยะเวลาและข้อผิดพลาดในการดำเนินการ ผลการทดสอบแอปพลิเคชันเป็นเวลา 60 วัน พบว่า สามารถลดเวลาเฉลี่ยในการจัดการคำสั่งซื้อจาก 4 นาทีเหลือ 1 นาที (ลดลง 75%) และลดความผิดพลาดในการจัดเตรียมสินค้าจากเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 2 รายการต่อวัน เหลือ 0 รายการ (ลดลง 100%) ส่งผลให้สามารถลดมูลค่าความเสียหายได้ถึง 13,087,000 บาทต่อปี นอกจากนี้ จากการสำรวจความพึงพอใจของพนักงาน 18 คน พบว่า แอปพลิเคชันได้รับคะแนนเฉลี่ยความพึงพอใจภาพรวมที่ 4.82 จาก 5 ซึ่งแสดงถึงความพึงพอใจที่สูงในด้านการใช้งาน ความเสถียร และรูปแบบการแสดงผล การพัฒนาแอปพลิเคชันนี้จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการจัดการคำสั่งซื้อ ลดความเสียหาย และเพิ่มความพึงพอใจในการทำงานของพนักงานได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: CRUD เว็บแอปพลิเคชัน, Responsive เว็บแอปพลิเคชัน, การจัดการคำสั่งซื้อ, การเพิ่มประสิทธิภาพ, ธุรกิจค้าส่งอาหารสด

Abstract

This research aimed to develop a responsive web application for managing orders in a wholesale fresh food business, which previously faced issues using LINE chat, resulting in communication errors, lost orders, and incorrect order sequencing, leading to financial losses and delayed work processes. The development of this web application employed CRUD (Create, Read, Update, Delete) principles to enhance data management efficiency and reduce processing time and errors. The application testing over 60 days revealed that the average time to manage an order was reduced from 4 minutes to 1 minute (a 75% reduction), and errors in preparing goods were reduced from an average of no less than 2 items per day to zero (a 100% reduction). Consequently, the application helped to reduce financial losses by 13,087,000 Baht per year. Additionally, a satisfaction survey of 18 employees showed that the application received an overall average satisfaction score of 4.82 out of 5, indicating high satisfaction with usability, stability, and display design. The development of this application significantly improved the order management process, reduced losses, and increased employee satisfaction.

Keywords: CRUD web application, Responsive web application, Order management, Efficiency improvement, Wholesale fresh food

1. บทนำ

ในยุคดิจิทัลที่การดำเนินงานขององค์กรต้องพึ่งพาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ การจัดการคำสั่งซื้อในธุรกิจค้าส่งอาหารสดมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากแผนกขายและแผนกอาหารสดต้องจัดการคำสั่งซื้อในปริมาณมากและมีมูลค่าสูง จากงานวิจัยของธีรพร (2559) และ พรพิมลและเพ็ญจิรา (2014) พบว่า การใช้แอปพลิเคชันไลน์ในการสื่อสารภายในองค์กรมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น การสื่อสารที่ไม่ชัดเจนและการสูญหายของข้อมูล ซึ่งสอดคล้องกับปัญหาที่พบในระบบเดิมของบริษัทที่ใช้เป็นกรณีศึกษาวิจัย ซึ่งมีการใช้เทคโนโลยีไลน์แชทแบบกลุ่ม ทำให้เกิดปัญหาหลายประการ เช่น การสื่อสารที่ไม่ชัดเจน การสูญหายของคำสั่งซื้อ และการจัดลำดับคำสั่งซื้อที่ผิดพลาด ปัญหาเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานและเพิ่มต้นทุนทางการเงิน

จากการศึกษาของผู้วิจัย พบว่า ระบบเดิมมีความผิดพลาดเฉลี่ยอย่างน้อย 2 ออเดอร์ต่อวัน ซึ่งนำไปสู่ความเสียหายทางการเงินเฉลี่ย 35,800 บาทต่อวัน หรือประมาณ 13,087,000 บาทต่อปี



และกระบวนการจัดการคำสั่งซื้อต้องใช้ระยะเวลาเฉลี่ยนานถึง 4 นาทีต่อคำสั่งซื้อหนึ่งรายการ การชะลอประสิทธิภาพในกระบวนการทำงานดังกล่าว ส่งผลกระทบต่อความพึงพอใจของลูกค้าและผลลัพธ์ในระยะยาว

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวและตอบสนองต่อแนวคิดจากงานวิจัยข้างต้น ทีมวิจัยจึงได้พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันโดยใช้ภาษา PHP และฐานข้อมูล MySQL ในการจัดการข้อมูลตามหลักของ CRUD (Create, Read, Update, Delete) ซึ่งช่วยให้การสั่งซื้อและจัดการออเดอร์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ (Meghana *et al.*, 2023). นอกจากนี้ งานวิจัยของพิชญ์พิมล และคณะ (2014) ได้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการพัฒนาเว็บไซต์ที่รองรับการแสดงผลบนหลายหน้าจอ (Responsive design) เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้จากหลากหลายอุปกรณ์ การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันนี้ได้นำหลักการ Responsive design มาใช้การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันนี้มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการข้อมูลคำสั่งซื้อ ลดระยะเวลาและความผิดพลาดในการดำเนินงาน และเพื่อทดแทนระบบการจัดการคำสั่งซื้อแบบเดิมที่ใช้ไลน์แชท ซึ่งมีข้อจำกัดหลายประการ โดยการใช้หลักการ CRUD จะช่วยให้สามารถเพิ่ม แก้ไข ค้นหา และลบข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการออกแบบให้รองรับ Responsive design ทำให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงระบบได้บนทุกอุปกรณ์

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่รองรับการทำงานในทุกอุปกรณ์ (Responsive Design) สำหรับการจัดการคำสั่งซื้อในธุรกิจค้าส่งอาหารสด

2.2 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันที่พัฒนาในการลดระยะเวลาและข้อผิดพลาดในการจัดการคำสั่งซื้อ

2.3 เพื่อสำรวจความพึงพอใจของพนักงานในแผนกขายและแผนกอาหารสดต่อการใช้งานแอปพลิเคชันที่พัฒนา

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการจัดการคำสั่งซื้อในธุรกิจค้าส่งอาหารสด โดยมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพ ลดระยะเวลา และข้อผิดพลาดในการดำเนินงาน โดยใช้ประชากรและกลุ่มตัวอย่างในการวิจัย คือ พนักงานในแผนกขายและแผนกอาหารสดของบริษัทกรณีศึกษา จำนวน 18 คน ซึ่งเป็นผู้ใช้งานหลักของระบบ ขอบเขตการศึกษาครอบคลุมการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่รองรับการทำงานบนทุกอุปกรณ์ (Responsive design) และการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในการจัดการคำสั่งซื้อ ในระยะเวลาการทดสอบ 60 วัน เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย:



- การวิเคราะห์ระบบเดิม: ศึกษาปัญหาและข้อจำกัดของระบบจัดการคำสั่งซื้อเดิมที่ใช้เทคโนโลยีไลน์แชท
- การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน: ใช้ภาษา PHP ร่วมกับ Bootstrap framework ที่รองรับการทำงานบนทุกอุปกรณ์ (Responsive design) และฐานข้อมูล MySQL เพื่อสร้างแอปพลิเคชันที่รองรับหลักการ CRUD (Create, Read, Update, Delete)
- การทดสอบระบบ: ทดสอบการทำงานของแอปพลิเคชันในสภาพแวดล้อมจริง โดยเน้นการตรวจสอบฟังก์ชันหลัก การเข้าถึงข้อมูล และการแสดงผลบนอุปกรณ์ต่างๆ
- แบบสำรวจความพึงพอใจ: ใช้แบบสำรวจ 5 ระดับเพื่อประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานในด้านความง่ายในการใช้งาน ความเสถียร และรูปแบบการแสดงผล

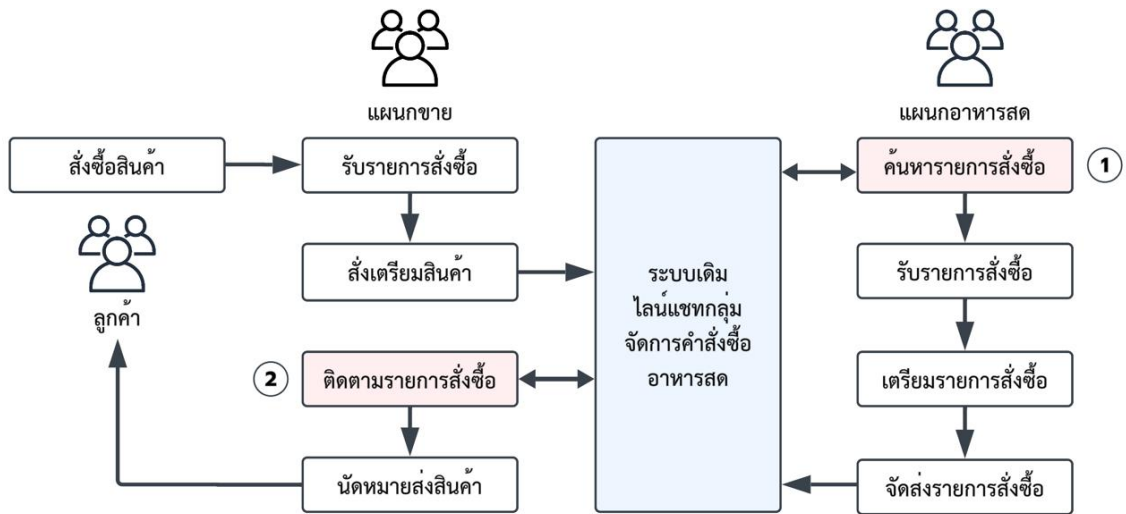
การเก็บรวบรวมข้อมูลจะดำเนินการผ่านการทดสอบการใช้งานจริงของแอปพลิเคชันและแบบสำรวจความพึงพอใจ โดยมีการเก็บข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น ระยะเวลาในการจัดการคำสั่งซื้อ และจำนวนข้อผิดพลาดในการจัดเตรียมสินค้า รวมถึงข้อมูลเชิงคุณภาพจากแบบสำรวจความพึงพอใจ สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและค่าร้อยละ เพื่อสรุปผลการลดลงของระยะเวลาการทำงาน และข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้แอปพลิเคชันใหม่ รวมถึงการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน และสรุปผลการวิจัย โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.1 การศึกษาปัญหาและการวิเคราะห์ระบบการจัดการคำสั่งซื้อเดิม

จากการศึกษาและวิเคราะห์ระบบการจัดการคำสั่งซื้อเดิมของบริษัทที่ใช้เป็นกรณีศึกษาวิจัยใช้เทคโนโลยีไลน์แชทแบบกลุ่มเป็นเครื่องมือหลักในการจัดการคำสั่งซื้อสินค้าระหว่าง แผนกขาย และแผนกอาหารสด ดังแสดงใน ภาพที่ 1 โดยระบบดังกล่าวมีข้อจำกัดในหลายประการ ดังนี้:

3.1.1 ข้อจำกัดในกระบวนการค้นหารายการสั่งซื้อของแผนกอาหารสด ดังแสดงในภาพที่ 1 ตำแหน่งหมายเลข 1 ไม่ได้รับการแจ้งเตือนคำสั่งซื้อโดยตรง ต้องค้นหารายการคำสั่งซื้อจากข้อความในไลน์กลุ่ม ซึ่งอาจถูกรบกวนจากบทสนทนาอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง หรือ คำสั่งซื้อบางรายการอาจสูญหาย จากการเลื่อนข้อความในกลุ่ม และการสื่อสารที่ไม่ชัดเจนทำให้เกิดความผิดพลาดในกระบวนการจัดลำดับคำสั่งซื้อ ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและความถูกต้องในการเตรียมคำสั่งซื้อของแผนกอาหารสด

3.1.2 ข้อจำกัดในกระบวนการติดตามรายการคำสั่งซื้อและนัดหมายส่งสินค้าของแผนกขาย ดังแสดงในภาพที่ 1 ตำแหน่งหมายเลข 2 ใช้เวลามากและไม่มีความชัดเจนในสถานะของคำสั่งซื้อ ทำให้เกิดความล่าช้าในกระบวนการ รวมถึงโอกาสในการเกิดข้อผิดพลาดระหว่างการจัดเตรียมและการส่งมอบสินค้า



ภาพที่ 1 ระบบการจัดการคำสั่งซื้อเดิมที่ใช้เทคโนโลยีไลน์แชทกลุ่ม

จากปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบจัดการคำสั่งซื้อเดิม ส่งผลให้เกิดความสูญเสียในหลายด้าน ทั้งในเชิงเวลาและต้นทุน โดยเมื่อประเมินจากจำนวนรายการสั่งซื้อเฉลี่ย 20 รายการต่อวัน ซึ่งแต่ละรายการมีปริมาณสินค้าเฉลี่ย 100 กิโลกรัม พบว่า ระบบเดิมใช้เวลาเฉลี่ย 4 นาทีต่อรายการ ในการสั่งและรับรายการสินค้า และมีความผิดพลาดจากการไม่ได้รับสินค้าตามคำสั่งซื้อ 2 รายการต่อวัน คิดเป็นมูลค่าความเสียหายต่อสินค้าที่ไม่ได้ส่งถึงลูกค้าความเสียหายนี้ โดยสามารถวิเคราะห์และสรุปในรูปแบบรายวัน รายเดือน และรายปี ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 มูลค่าความเสียหายและต้นทุนเวลาที่สูญเสียในกระบวนการจัดการคำสั่งซื้อเดิม

ประเภทความเสียหาย	การคำนวณ	รายวัน	รายเดือน	รายปี
ความเสียหายต่อสินค้า	100 กก. x 179 บาท x 2 รายการ	35,800 (บาท)	1,074,000 (บาท)	13,087,000 (บาท)
เวลาที่สูญเสียจากกระบวนการต่อพนักงาน	20 รายการ x 4 นาที	1.33 (ชั่วโมง)	40 (ชั่วโมง)	486 (ชั่วโมง)
ต้นทุนเวลาที่สูญเสียต่อพนักงาน	เงินเดือน 18,000 บาท/เดือน 8 ชม./วัน คิดเป็น 1.25 บาท/นาที	100 บาท	3,000 บาท	36,500 บาท

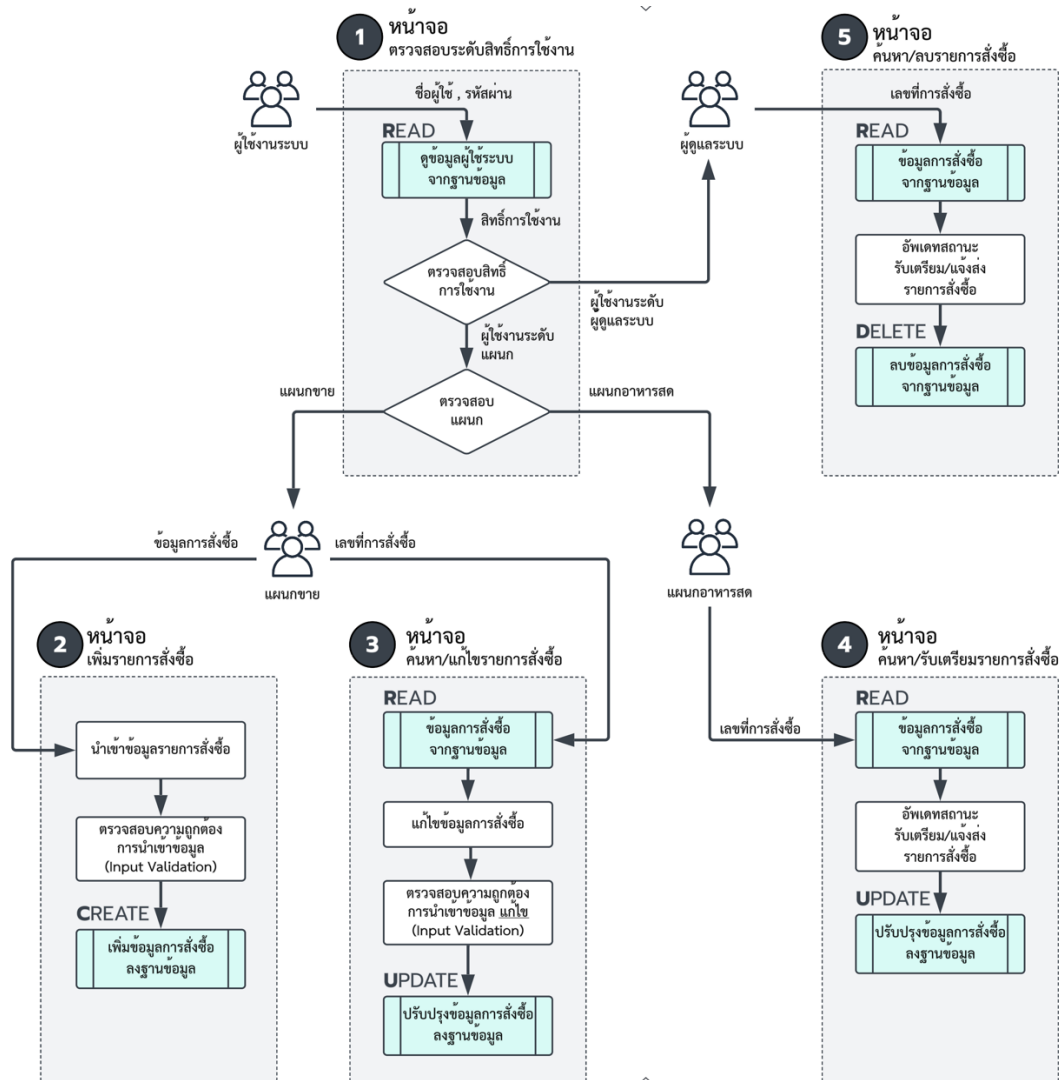
3.2 การออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันที่รองรับการทำงานในทุกอุปกรณ์

ในขั้นตอนนี้ ทีมวิจัยได้พัฒนาแอปพลิเคชันแบบ Web-based application โดยใช้ภาษา PHP เป็นหลักสำหรับการพัฒนาฟังก์ชันการทำงาน และนำ Bootstrap framework มาใช้เพื่อ

ออกแบบอินเทอร์เฟซให้รองรับการแสดงผลแบบ Responsive design บนอุปกรณ์ที่หลากหลาย เช่น คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ แท็บเล็ต และสมาร์ทโฟน ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงและใช้งานแอปพลิเคชันได้อย่างสะดวกบนทุกแพลตฟอร์ม (Bootstrap, n.d.; Marcotte, 2011). และใช้ฐานข้อมูล MySQL ซึ่งเป็นระบบฐานข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับ Web application ขนาดเล็กถึงกลางและรองรับการทำงานร่วมกับ PHP ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (MySQL reference manual). ในการจัดเก็บและจัดการข้อมูลสำคัญ คือ รายการคำสั่งซื้อ รายละเอียดผู้ใช้งาน และสถานะรายการสั่งซื้อ โดยกระบวนการจัดการข้อมูลทั้งหมดถูกพัฒนาตามหลักการ CRUD (Create, Read, Update, Delete) ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยเริ่มต้นจาก การหน้าจอตรวจสอบสิทธิ์ระดับการใช้งานที่มีการ Read ดูข้อมูลผู้ใช้งานระบบจากฐานข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 1 ตำแหน่งหมายเลข 1 เพื่อนำไปตรวจสอบระดับสิทธิ์ โดยหากเป็นแผนกขาย จะสามารถเข้าถึงหน้าจอเพิ่มรายการสั่งซื้อที่จะมีกระบวนการ Create เพื่อเพิ่มข้อมูลการสั่งซื้อ รวมถึงหน้าจอค้นหาและแก้ไขรายการสั่งซื้อที่เริ่มจากกระบวนการ Read ในการเรียกดูข้อมูลก่อนทำการกระบวนการ Update รายการที่ระบุดังแสดงในภาพที่ 1 ตำแหน่งหมายเลข 2 และ 3 ตามลำดับสำหรับระดับสิทธิ์แผนกซื้อ จะสามารถเข้าถึงหน้าจอค้นหาเพื่อปรับปรุงสถานะการเตรียมสั่งซื้อและการจัดส่ง โดยเริ่มจากกระบวนการ Read ในการเรียกดูข้อมูลการสั่งซื้อก่อนทำการกระบวนการ Update ของรายการที่ระบุดังแสดงในภาพที่ 1 ตำแหน่งหมายเลข 4 และท้ายสุดสำหรับระดับสิทธิ์ผู้ดูแลระบบ จะสามารถเข้าถึงหน้าจอค้นหาเพื่อลบรายการสั่งซื้อโดยเริ่มจากกระบวนการ Read ในการเรียกดูข้อมูลการสั่งซื้อก่อนทำการกระบวนการ Delete ของรายการที่ระบุ ดังแสดงในภาพที่ 1 ตำแหน่งหมายเลข 5

จากภาพผังการทำงานของแอปพลิเคชันใหม่ แสดงกระบวนการที่ครอบคลุมทั้งการใช้งานของผู้ใช้และการจัดการคำสั่งซื้อ โดยระบบได้รับการออกแบบเพื่อแก้ไขปัญหาของระบบเดิม เช่น การสื่อสารที่คลาดเคลื่อนระหว่างแผนกหรือการสูญหายของคำสั่งซื้อ รวมถึงช่วยเพิ่มความสะดวกและลดเวลาในการค้นหา กระบวนการทำงานของระบบใหม่ทั้งหมดถูกพัฒนาให้สอดคล้องกับหลักการ CRUD เพื่อให้สามารถเพิ่ม แสดง แก้ไข และลบข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตัวอย่างเช่น การเพิ่มคำสั่งซื้อใหม่ (หมาย 2) สำหรับผู้ใช้งานแผนกขาย และการปรับปรุงสถานะคำสั่งซื้อเพื่อเปลี่ยนสถานะ “รับทราบ” หรือ “จัดส่งสินค้าเสร็จเรียบร้อยแล้ว” (หมาย 4) โดยแผนกอาหารสด ซึ่งกระบวนการนี้ช่วยลดข้อผิดพลาดในการจัดการข้อมูล และเพิ่มความรวดเร็วผ่านการค้นหาด้วยวิธีการต่างๆ เช่น เลขที่คำสั่งซื้อ วันที่ หรือ รายการสินค้า นอกจากนี้ระบบยังเพิ่มความปลอดภัยด้วยการตรวจสอบสิทธิ์การใช้งานที่หน้าจอแรก และการออกแบบที่รองรับ Responsive design ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงระบบได้บนทุกอุปกรณ์ โครงสร้างดังกล่าวไม่เพียงช่วยให้ระบบมีความสมบูรณ์ แต่ยังสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่มุ่งพัฒนาเครื่องมือจัดการข้อมูลที่มีประสิทธิภาพและตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานจริง ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 2 การทำงานของแอปพลิเคชันที่พัฒนาตามหลัก CRUD

3.3 การทดสอบและประเมินผลแอปพลิเคชันที่พัฒนา

แอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นจะถูกทดสอบโดยกลุ่มเป้าหมายจากแผนกขายและแผนกอาหารสด จำนวน 18 คน ระยะเวลาทดสอบคือ 60 วัน หลังจากการติดตั้งแอปพลิเคชันจากสภาพแวดล้อมการพัฒนาของนักพัฒนา (Local development environment) บนโฮสต์เว็บไซต์สาธารณะ (Public web host) เพื่อรองรับการใช้งานจากทุกพื้นที่ที่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต การทดสอบจะเน้นการตรวจสอบฟังก์ชันหลัก เช่น การเพิ่ม แก้ไข ค้นหา และลบข้อมูล รวมถึงการทดสอบการตรวจสอบสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูลของผู้ใช้ตามสิทธิ์ที่กำหนด การทดสอบยังครอบคลุมการทดสอบการแสดงผลแบบ Responsive design บนอุปกรณ์ต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ สมาร์ทโฟน และแท็บเล็ต เพื่อให้มั่นใจว่าแอปพลิเคชันสามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมในทุกสถานการณ์

Create Logout

ว/คค/ปปปป Search by Dept

Search Reset

ID	Date	Dept	Class	Item	Description	Qty	Order By(S)	Remark(S)	Status(FL)	Action By(FL)	Edit
140	12/09/24	2	14	235457	อกไก่เนื้อล้วนติดหนัง กก.ละ	20	ตั้ง SE	คุณพพล โสภี(คุณโบ๊ท) / ร้าน Happy Factory / จัดส่งสินค้าวันที่ 13/09/67 ถึงร้านเวลา 10.15 - 10.45 น. / เอาตรงกลาง ไม่เอาหัวท้าย / จำนวน 20 ชิ้นเลือกชิ้นใหญ่ๆค่ะ / ชิ้นละ 350 กรัมขึ้นไป	รับทราบ	ทิน SM-BUT	Edit
119	01/09/24	2	14	235457	อกไก่เนื้อล้วนติดหนัง กก.ละ	24	ตั้ง SE	คุณพพล โสภี(คุณโบ๊ท) / ร้าน Happy Factory / จัดส่งสินค้าวันที่ 02/89/67 ถึงร้านเวลา 10.15 - 10.45 น. / จำนวน 24 ชิ้นเลือกชิ้นใหญ่ๆค่ะ / ชิ้นละ 350 กรัมขึ้นไป	จัดส่งสินค้าเสร็จเรียบร้อยแล้ว	หนึ่ง Supv BUT	Edit
88	15/08/24	2	14	235457	อกไก่เนื้อล้วนติดหนัง กก.ละ	18	ตั้ง SE	ร้าน Happy Factory / จัดส่งสินค้าวันที่ 16/8/67 ถึงร้านเวลา 10.15 - 10.45 น. / จำนวน 21 ชิ้น ขนาด 210-220 กรัม / เอาตรงกลาง ไม่เอาหัวท้าย / จำนวน 18 ชิ้น ชิ้นละ 150-160 กรัม เอาตรงกลาง / จำนวน 20 ชิ้นเลือกชิ้นใหญ่ๆค่ะ / ชิ้นละ 350 กรัมขึ้นไป	รับทราบ	เชล Supv BUT	Edit

(ก) ตัวอย่างหน้าจอค้นหาติดตามสถานะและแก้ไขคำสั่งซื้อ ของผู้ใช้ระดับแผนกขาย

Create Logout

ว/คค/ปปปป 3 Search by Item

Search Reset

ID	Date	Dept	Class	Item	Description	Qty	Order By(S)	Remark(S)	Status(FL)	Action By(FL)	Edit	Delete
142	12/09/24	3	504	202833	ปลาพอร์คเทร้าสด 5-6กก./ตัว	96	SE เชนนี่	จองออเดอร์ ปลาแซลมอนเทร้า5-6กก/ตัว ร้านซูชิมี๊น พินญโลก แซลมอนเทร้า16ตัว (4ลัง) จัดส่ง 18,21/09/2024	รับทราบ	น้ำโบ้ Supv. Fish	Edit	Delete
141	12/09/24	3	17	863862	กุ้งขาว 21-25 ตัว/กก. (10 กก.)	20	SE เชนนี่	2ลัง (ร้านอาหารบ้านเรา) โทรแมนแก้ว สินค้าเข้าคอนคีย์ สติ๊ดค/หมายเลขออเดอร์9154554401	รับทราบ	น้ำโบ้ Supv. Fish	Edit	Delete
135	10/09/24	3	504	202833	ปลาพอร์คเทร้าสด 5-6กก./ตัว	48	อวิกา โซติ ประดิษฐ์	จองออเดอร์ ปลาแซลมอนเทร้า5-6กก/ตัว ร้านซูชิมี๊น พินญโลก แซลมอนเทร้า8ตัว (2ลัง) จัดส่ง 14/09/2024	รับทราบ	น้ำโบ้ Supv. Fish	Edit	Delete

(ข) ตัวอย่างหน้าจอค้นหาติดตามสถานะ แก้ไขและลบคำสั่งซื้อ ของผู้ใช้ระดับผู้ดูแลระบบ

ภาพที่ 3 ตัวอย่างหน้าการทำงานของแอปพลิเคชันในรูปแบบคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ

3.4 การสำรวจความพึงพอใจและการประเมินผลการใช้งาน

หลังจากการทดสอบแอปพลิเคชันเสร็จสิ้น จะมีการจัดทำแบบสำรวจความพึงพอใจเพื่อประเมินผลการใช้งานใน 3 ด้าน ได้แก่ 1) ความง่ายในการใช้งาน 2) ความเสถียร และ 3) รูปแบบการแสดงผล โดยการประเมินความพึงพอใจจะใช้แบบสำรวจในรูปแบบ 5 ระดับ นอกจากนี้ยังจะมีการรวบรวมข้อมูลจากระบบเพื่อยืนยันการลดลงของความผิดพลาดในการจัดส่งสินค้าให้ลูกค้าจนเป็นศูนย์ ซึ่งจะช่วยยืนยันว่าแอปพลิเคชันสามารถลดข้อผิดพลาดในการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. ผลการวิจัย

ผลการทดสอบและประเมินผลแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นพบว่า แอปพลิเคชันช่วยลดระยะเวลาในกระบวนการจาก 4 นาที เหลือเพียง 1 นาที ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นในกระบวนการทำงาน นอกจากนี้ความผิดพลาดในการจัดเตรียมสินค้าเพื่อส่งให้ลูกค้าลดลงจาก 2 รายการต่อวันเป็น

ศูนย์ ซึ่งแสดงถึงการปรับปรุงที่สำคัญในการลดข้อผิดพลาดในการจัดการคำสั่งซื้อและการส่งสินค้าไปยังลูกค้า โดยแสดงผลกระทบเชิงมูลค่าที่เพิ่มขึ้นเกิดขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 มูลค่าที่เพิ่มขึ้นจากการลดความเสียหายและระยะเวลาในกระบวนการจัดการคำสั่งซื้อ

มูลค่าที่เพิ่มขึ้น	ประสิทธิภาพ	รายวัน	รายเดือน (บาท)	รายปี
การลดความเสียหายต่อสินค้า	เพิ่มขึ้น 100%	35,800	1,074,000	13,087,000
การลดระยะเวลาทำงานต่อพนักงาน	เพิ่มขึ้น 75%	75	2,250	27,000
รวมมูลค่าที่เพิ่มขึ้น		35,875	1,076,250	13,114,000

การประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้งานแอปพลิเคชันที่ผ่านการทดสอบ พบว่า แอปพลิเคชันได้รับคะแนนสูงในทุกด้าน โดยเฉพาะด้านความง่ายในการใช้งานและรูปแบบการแสดงผลที่ได้รับคะแนนเต็ม 5 คะแนน ซึ่งแสดงถึงความพึงพอใจในระดับสูงสุด ด้านความเสถียรได้รับคะแนนเฉลี่ย 4.45 คะแนน ซึ่งยังคงแสดงถึงความพึงพอใจในระดับที่ดีมาก เมื่อคำนวณค่าเฉลี่ยของคะแนนความพึงพอใจทั้งหมด จะได้ค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.82 ซึ่งสะท้อนถึงความพึงพอใจโดยรวมของผู้ใช้งานที่ตอบสนองความต้องการได้ดีในทุกด้าน

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากการพัฒนาแอปพลิเคชันที่รองรับการทำงานในทุกอุปกรณ์ (Responsive Design) สำหรับการจัดการคำสั่งซื้อในธุรกิจค้าส่งอาหารสด พบว่า แอปพลิเคชันมีประสิทธิภาพในการลดระยะเวลาและข้อผิดพลาดในการจัดการคำสั่งซื้ออย่างมีนัยสำคัญ โดยแอปพลิเคชันสามารถลดเวลาที่ใช้ในกระบวนการจัดการคำสั่งซื้อจากเดิมที่ใช้เวลา 4 นาทีเหลือ 1 นาที และลดความผิดพลาดในการจัดเตรียมสินค้าเพื่อส่งจาก 2 รายการต่อวันเหลือเป็นศูนย์ ซึ่งส่งผลให้กระบวนการทำงานมีความแม่นยำและรวดเร็วมากขึ้น ทำให้ช่วยลดมูลค่าความเสียหายจากการดำเนินการที่เกิดจากความผิดพลาดในการจัดเตรียมคำสั่งซื้อและการส่งสินค้าไปยังลูกค้าได้ถึง 13,087,000 บาทต่อปี

การใช้เทคโนโลยี Responsive design ทำให้แอปพลิเคชันสามารถรองรับการใช้งานได้ทั้งบนคอมพิวเตอร์ สมาร์ทโฟน และแท็บเล็ต ซึ่งเพิ่มความสะดวกในการใช้งานของผู้ใช้และรองรับการทำงานในทุกสถานการณ์ได้ดี ขณะเดียวกันการใช้หลักการ CRUD ในการจัดการข้อมูลคำสั่งซื้อทำให้กระบวนการมีความรวดเร็วและแม่นยำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการสำรวจความพึงพอใจของพนักงานในแผนกขายและแผนกอาหารสด พบว่า แอปพลิเคชันได้รับคะแนนเฉลี่ยความพึงพอใจที่ 4.82 ซึ่งแสดง



ถึงการตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ได้ดีและมีความพึงพอใจสูง โดยในด้านความเสถียรที่ได้รับคะแนนเฉลี่ย 4.45 คะแนน นั้นอาจต้องมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมให้ระบบปฏิบัติการและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่อไป

การพัฒนาแอปพลิเคชันในครั้งนี้จึงประสบผลสำเร็จในการลดระยะเวลาและข้อผิดพลาดในการจัดการคำสั่งซื้อ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน และสามารถลดมูลค่าความเสียหายได้อย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ธุรกิจสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในอนาคต.

6. เอกสารอ้างอิง

- กวินทรา บางหลวง. (2564). การออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันระบบจัดการออเดอร์และสต็อก
สินค้า: กรณีศึกษา Penguintory. (วิทยานิพนธ์), มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ.
พรพิมล บุรณเบญญา, และเพ็ญจิรา คันธวงศ์. (2557, เมษายน). **ปัจจัยที่ส่งผลต่อความพึงพอใจ
ของผู้ใช้สื่อสังคมออนไลน์ในกลุ่มคนทำงาน: กรณีศึกษาแอปพลิเคชัน “ไลน์” ที่เป็น
เครือข่ายสังคมออนไลน์.** การประชุมวิชาการระดับชาติ ประจำปี 2557, มหาวิทยาลัยรังสิต,
กรุงเทพฯ.
- พิชญ์พิมล ชูรอด, ทิตยา จันทร์สุข, และธมลวรรณ ชุนไพจิต. (2557). การสร้างเว็บไซต์ที่รองรับการ
แสดงผลหลายหน้าจอของห้องสมุดมหาวิทยาลัยทักษิณ. **วารสารเครือข่ายห้องสมุด
มหาวิทยาลัยส่วนภูมิภาค**, 1(3), 102-106.
- ธีรพร สิริवंต์. (2559). **การศึกษาพฤติกรรมการใช้ไลน์ แอปพลิเคชัน (Line Application) เพื่อ
เป็นช่องทางการสื่อสารการปฏิบัติงานในองค์กร.** (วิทยานิพนธ์), มหาวิทยาลัยมหิดล,
นครปฐม.
- Bootstrap. (n.d.). **Introduction to Bootstrap.** Retrieved from
<https://getbootstrap.com/docs/>
- Marcotte, E. (2011). **Responsive web design.** A Book Apart.
- Meghana, P., Kumar, B. A., Meherish, J., Meenakshi, M., Rao, N. M., Tejaswini, R. M. N., &
Kalyani, P. (2023). **CRUD application on library management system.**
**International Research Journal of Modernization in Engineering Technology
and Science**, 5(6), 1036-1039. Doi: <https://www.doi.org/10.56726/IRJMETS41704>
- Welling, L., & Thomson, L. (2009). **PHP and MySQL web development (4th Edition).**
United States of America: Addison-Wesley.