

JOURNAL OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND

ENGINEERING

PIBULSONGKRAM RAJABHAT UNIVERSITY



วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม



ปีที่ 4 ฉบับที่ 3
กันยายน - ธันวาคม

2565

ISSN 2697-5602(Print)
ISSN 2697-5629 (Online)



ข้อกำหนดมาตรฐาน วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

เพื่อให้วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เป็นวารสารที่มีคุณภาพได้มาตรฐานทางกองบรรณาธิการจึงมีข้อกำหนดของวารสารดังต่อไปนี้

1. วัตถุประสงค์

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

2. ครอบคลุมสาขาที่เกี่ยวข้อง

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

2.2 สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ประยุกต์

2.3 สาขาวิชาที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และวิศวกรรม

3. การพิจารณาบทความ (Peer Review Process)

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



ขั้นตอนการประเมินบทความมีกระบวนการดังต่อไปนี้

1. ผู้เขียนส่งไฟล์บทความไปยังระบบวารสารอิเล็กทรอนิกส์ของวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
2. กองบรรณาธิการดำเนินการแจ้งให้ผู้เขียนทราบ เมื่อกองบรรณาธิการได้รับไฟล์บทความเรียบร้อยแล้ว
3. กองบรรณาธิการดำเนินการตรวจสอบหัวข้อ บทคัดย่อ และเนื้อหาของบทความ รูปแบบการจัดพิมพ์บทความ ประเด็นทางจริยธรรม ตรวจสอบการคัดลอกบทความ (Plagiarism Checker) และความเหมาะสมและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของวารสาร รวมถึงประโยชน์ในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ ในเบื้องต้น
4. ในกรณีที่กองบรรณาธิการพิจารณาเห็นควรรับไว้พิจารณาตีพิมพ์ กองบรรณาธิการจะดำเนินการจัดส่งบทความเพื่อทำการกลั่นกรองต่อไปโดย ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง เพื่อตรวจสอบคุณภาพของบทความ ว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมที่จะลงตีพิมพ์หรือไม่ กระบวนการพิจารณากลั่นกรองนี้เป็นการประเมินแบบปกปิดสองทาง (Double blind review) กล่าวคือ จะไม่เปิดเผยชื่อผู้ส่งบทความให้ผู้ทรงคุณวุฒิทราบ และจะไม่เปิดเผยชื่อผู้ทรงคุณวุฒิให้ผู้เขียนทราบ และกองบรรณาธิการจะไม่เปิดเผยทั้งชื่อผู้เขียนและชื่อผู้ทรงคุณวุฒิให้บุคคลอื่น ทราบด้วยเช่นกัน
5. เมื่อบทความได้รับการทบทวน ประเมิน วิจัยแล้ว จากผู้ทรงคุณวุฒิ และมีความเห็นอย่างไร กองบรรณาธิการจะ ดำเนินการดังต่อไปนี้
 - กรณีมีความเห็นให้ ผู้เขียนแก้ไขบทความ (Revision Require) กองบรรณาธิการ จะจัดส่งผลการประเมิน รวมถึงคำแนะนำจากบรรณาธิการให้ผู้เขียน แก้ไขบทความ และเมื่อแก้ไขเสร็จแล้วให้ ส่งกลับคืนมายังบรรณาธิการ และพิจารณาใหม่อีกครั้งโดยอาจส่งให้ ผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบผลการแก้ไข หรือ บรรณาธิการตรวจสอบ ด้วยตนเอง ซึ่งหากต้องมีการแก้ไขในรอบที่ สอง (round 2) ก็จะต้องดำเนินการส่งกลับไปยังผู้เขียนให้แก้ไข และตรวจสอบผลการแก้ไข จนกว่าจะมีเนื้อหาบทความสมบูรณ์
 - กรณีมีความเห็นให้ ปฏิเสธการรับตีพิมพ์ (Decline Submission) กองบรรณาธิการ จะส่งจดหมายแจ้งผลดังกล่าวให้ผู้เขียนรับทราบ พร้อมทั้งเหตุผลของการปฏิเสธการรับ
 - กรณีมีความเห็นให้ ตอรับการตีพิมพ์ (Accept Submission) กองบรรณาธิการ จะแจ้งผู้เขียนให้ทราบ และดำเนินการส่งไฟล์บทความเข้าสู่ขั้นตอนการปรับแก้ไขต้นฉบับ การพิสูจน์อักษร และการจัดรูปแบบเอกสารตามเทมเพลตบทความของวารสาร ก่อนนำไปเผยแพร่ โดยฝ่ายจัดการวารสาร

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

4. กำหนดออกเล่มวารสาร

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

5. คำแนะนำสำหรับผู้ส่งบทความเพื่อตีพิมพ์

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

5.2 รูปแบบบทความที่ส่งกองบรรณาธิการเพื่อตีพิมพ์

6. จริยธรรมในการตีพิมพ์ผลงาน

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



7. บทบาทและหน้าที่ของผู้นิพนธ์ (Duties of Authors)

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

8. บทบาทและหน้าที่ของบรรณาธิการวารสาร (Duties of Editors)

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

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

9. บทบาทและหน้าที่ของผู้ประเมินบทความ (Duties of Reviewers)

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

6. ผู้ประเมินบทความ ควรประเมินบทความในสาขาวิชาที่ตนมีความเชี่ยวชาญ โดยพิจารณาความสำคัญของเนื้อหาในบทความที่จะมีต่อสาขาวิชานั้น ๆ คุณภาพของการวิเคราะห์ และความเข้มข้นของผลงาน

7. ผู้ประเมินบทความไม่ควรใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่มีข้อมูลรองรับมาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินบทความวิจัย

8. หากผู้ประเมินบทความทราบว่ามีส่วนใดของบทความที่มีความเหมือน หรือซ้ำซ้อนกับผลงานชิ้นอื่น ๆ ผู้ประเมินบทความต้องแจ้งให้บรรณาธิการวารสารทราบด้วย

10. ลิขสิทธิ์และสิทธิ (Copyright and Right)

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

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

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

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

11. นโยบายจริยธรรมการทดลอง (Research Integrity Policy) ในงานวิจัย

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

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

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

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

สำหรับผู้เขียน ต้องมีการใช้ข้อมูลในการเขียนงานวิจัยโดยไม่มีส่วนเกี่ยวข้องที่อาจทำให้เกิดความโน้มเอียงในงานวิจัย ในผลการศึกษา สรุปผล หรือ การอภิปรายผล โดยเฉพาะผลประโยชน์ทางตรงหรือทางอ้อมต่อการทำงานวิจัย

สำหรับผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ควรให้ข้อมูลต่อบรรณาธิการผู้รับผิดชอบบทความ หากมีผลประโยชน์เกี่ยวข้องกับงานวิจัยหรือมีความเกี่ยวข้องอย่างใดอย่างหนึ่ง ให้แจ้งบรรณาธิการ เพื่อยืนยันความโปร่งใสต่อการประเมินบทความ ทั้งนี้การเกี่ยวข้องย่อมมีโอกาสเกิดขึ้นได้เสมอ บรรณาธิการจะเป็นผู้พิจารณาให้ความเห็นในการยอมรับต่อการประเมินบทความอีกครั้ง

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม (Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University) Print ISSN : 2697-5602, E-ISSN : 2697-5629 ฉบับนี้เป็นปีที่ 4 ฉบับที่ 1 มีเนื้อหาที่เน้นด้านทางด้านเทคโนโลยี อุตสาหกรรมและวิศวกรรม วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีเนื้อหาครอบคลุมเกี่ยวข้องกับงานวิจัย ในสาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์สาขาต่างๆ โดยบทความทั้งหมดได้ผ่านการประเมิน โดยผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Review) ในสาขานั้นๆ เพื่อให้ได้ผลงานที่มีคุณภาพก่อน การตีพิมพ์และสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/psru-jite/issue/view/16508> ภายใต้ระบบ ThaiJo ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย

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



รองศาสตราจารย์ ดร.สนธิ ปิ่นสกุล
บรรณาธิการ



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
การอบแห้งกระชายดำด้วยเทคนิคผสมผสานศรีมา แจ้คำ, อภินันต์ นามเขต, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา, ทรงสุภา พุ่มชุมพล, กิตติศักดิ์ วชิรนนท์กิตต์, เอกภูมิ บุญธรรม	266-284
การศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียววินัย บุญมุณี, อภินันต์ นามเขต, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา, เอกภูมิ บุญธรรม, กฤษฎา อ้นอ้าย, ประพันธ์พงษ์ สมศิลา	285-302
THERMAL PERFORMANCE MODELING OF A SOLAR WATER HEATING SYSTEM INTEGRATED WITH PHASE CHANGE MATERIAL IN A FISH POND Somchai Jiajitsawat	303-318
การเลือกทำเลที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อ เชื่อมโยงรถไฟลาว-จีน (บ่อเต็น – เวียงจันทน์): กรณีศึกษาบริษัทขนส่ง XYZภัทรวดี ประสมทรัพย์, ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ	319-336
การวิเคราะห์ปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาทักษะของพนักงานขับรถบรรทุก ในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออกอภิชาติ บัวกล้า, ชัยวัฒน์ แสงศรีจันทร์, นันทพล มหาวาน, ชูพงศ์ อุ่นนันท์, เจษฎา โพธิ์จันทร์	337-353
การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เอปซีและปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดเพื่อจัดการสินค้า คงคลังของร้านจำหน่ายวัสดุอุปกรณ์ก่อสร้าง กรณีศึกษา บริษัทสมนึกอินเตอร์เทรด จำกัดฤดี นิยมรัตน์, กฤษฎา นาคะวงศ์, กษิต์เดช แซ่มสายทอง	354-368
การจำแนกความสุขของผลกาแฟด้วยการประมวลผลภาพปริภูมิสีศิริเรือง พัฒน์ช่วย, อาทิตย์ อยู่เย็น, มหศักดิ์ เกตุฉ่ำ	369-381
การทดลองนวัตกรรมบอลดินเผาโดยใช้ส่วนผสมดินเหนียว ขี้เถ้าแกลบ และขี้เถ้า กากกาแฟ สำหรับการปลูกข้าว	382-396



.....วิมล ทองดอนกลิ้ง, นฤพล สิงห์กลิ่น

การอบแห้งกระชายดำด้วยเทคนิคผสมผสาน BLACK GALINGALE DRYING USING HYBRID TECHNIQUES

ศรีมา แจ้คำ¹, อภินันต์ นามเขต¹, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา¹,
ทรงสุภา พุ่มชุมพล^{1*}, กิตติศักดิ์ วิธินันทกิจ², เอกภูมิ บุญธรรม³

Srima Jaekhom¹, Apinunt Namkhat¹, Umphisak Teeboonma¹,
Songsupa Pumchumpol^{1*}, Kittisak Witinantakit², Eakpoom Boonthum³

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี ประเทศไทย 34190

²สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ประเทศไทย 20110

³คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani, Thailand, 34190

²School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,

Sriracha, Choburi, Thailand, 20110

³Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: pumchumpol.s@gmail.com

วันที่เข้าระบบ 26 ตุลาคม 2565

วันที่แก้ไขบทความ 8 พฤศจิกายน 2565

วันที่ตอบรับบทความ 22 พฤศจิกายน 2565

บทคัดย่อ

กระชายดำมีสรรพคุณทางยารักษาโรคและยังเป็นพืชสมุนไพรเชิงเศรษฐกิจที่สามารถต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายรูปแบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจนพลาสมาสถรรพการอบแห้งกระชายดำโดยใช้ 3 เทคนิค คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานอินฟราเรด การทดลองดำเนินการภายใต้อุณหภูมิอบแห้ง 45 °C และความเร็วลม 2.0 m/s โดยทำการอบแห้งกระชายดำจากความชื้นเริ่มต้น 136.0 %d.b. จนเหลือความชื้นสุดท้าย 8.0 %d.b. สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาสมรรถนะการอบแห้ง ได้แก่ คุณภาพด้านสี ปริมาณน้ำอิสระ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายจนพลาสมาสถรรพการอบแห้ง ผลจากการศึกษาพบว่า ความชื้นกระชายดำลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใช้พลังงานอินฟราเรดกระตุ้น โดยพบว่าการอบแห้งด้วยอินฟราเรด การอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานกับอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 515 557 และ 935 นาที ตามลำดับ ในส่วนของคุณภาพด้านสีพบว่า การอบแห้งด้วยอินฟราเรดมีการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานกับอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยลมร้อนเท่ากับ 2.67 และ 21.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานกับอินฟราเรดมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด สำหรับปริมาณน้ำอิสระพบว่าการอบแห้งทุกเทคนิคอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของอาหารแห้ง และสุดท้ายยังพบว่า แบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งกระชายดำด้วยลมร้อน, อินฟราเรด และลมร้อนผสมผสานอินฟราเรดได้ดีที่สุดคือ Weibull distribution, Two-term และ Weibull distribution ตามลำดับ

คำสำคัญ: การอบแห้งด้วยลมร้อน, การอบแห้งด้วยอินฟราเรด, สมการอบแห้งชั้นบาง

Abstract

Black galingale has medicinal properties and it is also an economic medicinal plant that can be developed into a variety of products. Therefore, this research aimed at studying the drying kinetics of black galingale by using 3 techniques as follows: hot air drying (HA), infrared drying (IR) and hot air combined with infrared drying (HA&IR). The experiment was conducted under the followings condition: drying air temperature of 45°C and air velocity of 2.0 m/s. The black galingale was dried from the initial moisture content of 136.0 %d.b. to the final moisture content of 8.0 %d.b. The parameters used as criteria for investigating the drying performance are color quality, water activity, specific energy consumption, and mathematical models to predict drying kinetics. The experimental results showed that the moisture of black galingale decreased rapidly when it was activated with infrared energy. It was also found that IR, HA&IR and HA yielded the drying time of 515, 557 and 935 minutes, respectively. In terms of color quality, the color change of IR was lower than that for HA&IR and HA by 2.67 % and 21.46 %, respectively. Furthermore, it was found that the specific energy consumption of HA&IR was the lowest. For water activity, all drying techniques were in accordance with the standards of food drying. Finally, results revealed that the best mathematical model for predicting the drying kinetic of black galingale using HA, IR and HA&IR were Weibull distribution, Two-term and Weibull distribution, respectively.

Keywords: Hot air drying, Infrared drying, Thin layer drying equation

1. บทนำ

กระชายดำ (ชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Kaempferia parviflora*) มีลักษณะเป็นเหง้ารูปทรงกลมเรียงต่อกัน เนื้อภายในสีม่วงอ่อน จนถึงสีม่วงดำ มีสรรพคุณตามตำรายาไทย คือ บำรุงกำลัง แก้อาการปวดเมื่อยและเหนื่อยล้า ขับลม แก้อุจจาระเสีย หรือใช้ลวกกับเหล้าขาวคั้นน้ำดื่ม แก้โรคมดลูกพิการ

ใช้กวาดคอเด็ก แก้วโรคตานขางในเด็ก (Pitakpawasutthi *et al.*, 2018) ในปัจจุบันตลาดสมุนไพรทั่วโลกมีมูลค่ามากกว่า 3 ล้านล้านบาท มีอัตราการขยายตัวของการบริโภคผลิตภัณฑ์สมุนไพรอยู่ที่ 3-12% โดยกลุ่มสินค้าที่มีศักยภาพมากที่สุดในตลาดสมุนไพร ได้แก่ อาหารเสริมและเวชสำอาง ข้อมูลจากศูนย์ศึกษาการค้าระหว่างประเทศมหาวิทยาลัยหอการค้าไทยระบุว่า ประเทศไทยส่งออกสมุนไพรและสารสกัดปีละประมาณ 1,000 ล้านบาท และการขยายตัวมีแนวโน้มที่ดีในเชิงเศรษฐกิจ (Vonggrachit, 2019) อย่างไรก็ตามเนื่องจากกระขายดำมีความชื้นสูงและเพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้ยาวนานจึงต้องนำไปอบแห้งเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เน่าเสีย ในปัจจุบันบทบาทที่สำคัญอีกอย่าง คือ การกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการแปรรูปต้องมีคุณภาพทางโภชนาการสูง และมีอายุการเก็บรักษายาวนาน ปลอดภัยและมีลักษณะปรากฏเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ซึ่งการอบแห้งมีด้วยกันหลายวิธี อย่างไรก็ตามแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป การตากแดดโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นการอบแห้งที่ต้นทุนต่ำ แต่ข้อด้อยคือไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิอบแห้งได้ (Aymen *et al.*, 2015; Hajar *et al.*, 2018) ทำให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การใช้เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนมีหลายรูปแบบแต่การอบแห้งบางรูปแบบใช้ระยะเวลายาวนาน สิ้นเปลืองพลังงานสูง และอาจทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางอาหารเนื่องจากการใช้ความร้อนสูง การอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ (Wang *et al.*, 2018) ซึ่งข้อดี คือ สามารถระเหยน้ำออกจากอาหารที่อุณหภูมิต่ำ อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและใช้เวลาสั้นลง ช่วยในการรักษากลิ่น รสชาติ และลักษณะทางกายภาพ แต่ข้อด้อยคือต้นทุนการสร้างเครื่องอบแห้งสูง และสำหรับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟจะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นและช่วยลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ แต่มีข้อด้อยคือปัญหาความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดรอยไหม้ในบางจุด (Nathakaranakule *et al.*, 2019) การอบแห้งด้วยระบบไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Sa-adchom *et al.*, 2011) สามารถอบแห้งได้รวดเร็วเหมาะกับอาหารประเภทเนื้อสัตว์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากใช้ความร้อนสูงในการอบแห้งจึงมีข้อจำกัดสำหรับอาหารประเภทที่ไวต่อความร้อน จากที่กล่าวมาข้างต้นการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวนั้นยังมีข้อด้อย ดังนั้นการศึกษาเทคนิคการอบแห้งแบบผสมผสานจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อเป็นการแก้ไขข้อบกพร่องของการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียว (Daniel *et al.*, 2016) การอบแห้งแบบผสมผสานเป็นการใช้เครื่องอบแห้งหลายลักษณะหรือหลายขั้นตอนในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ชนิดใดชนิดหนึ่ง เพื่อแก้ไขข้อด้อยของการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียว และจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Wang *et al.*, 2018; กิตติศักดิ์ และศรีมา, 2562; ศรีมา และคณะ, 2564) พบว่าการนำรังสีอินฟราเรดมาช่วยในการอบแห้งหรือผสมผสานจะสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งและลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ทั้งนี้เนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถทะลุผ่านวัตถุหรือผลิตภัณฑ์ ทำให้โมเลกุลของน้ำในผลิตภัณฑ์เกิดการสั่นสะเทือนมากกว่าปกติเป็นผลให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น (Riadh *et al.*,

2015; Dan *et al.*, 2021) โดยไม่ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เสียไป ซึ่งพบว่าที่ผ่านมา มีการใช้รังสีอินฟราเรดอบแห้งผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น กระเทียม (Papu *et al.*, 2014), กลั้ว (Khampakool *et al.*, 2019) และเนื้อวัว (Muga *et al.*, 2021) เป็นต้น

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งกระชายดำด้วยลมร้อน, อินฟราเรด และลมร้อน ผสมผสานอินฟราเรด

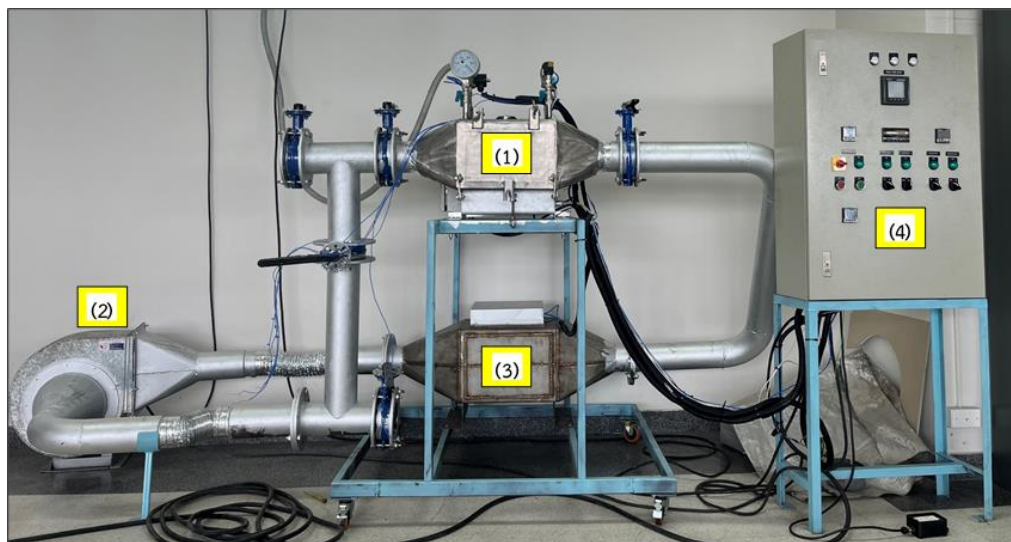
2.2 เพื่อศึกษาคุณภาพด้านสี, ปริมาณน้ำอิสระ, ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและสมการ เอมพิริคัลที่ใช้ทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งกระชายดำ

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบและเครื่องอบแห้ง

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือ กระชายดำ โดยหั่นให้มีความหนาประมาณ 3 mm ทำการอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเท่ากับ 45 °C เนื่องจากสมุนไพรเป็นผลิตภัณฑ์ไวต่อความร้อนจึงเลือกใช้อุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ และใช้ความเร็วลมเท่ากับ 2.0 m/s น้ำหนักกระชายดำที่ใช้ทดลองโดยเฉลี่ยเท่ากับ 100 g ทำการทดลอง 3 เงื่อนไขดังนี้ 1) การอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying, HA) 2) การอบแห้งด้วยอินฟราเรด (Infrared drying, IR) และ 3) การอบแห้งด้วยลมร้อน ผสมผสานอินฟราเรด (Hot air and Infrared drying, HA&IR) ซึ่งเมื่อถึงจุดกระตุ้นพลังงานระบบจะปรับเปลี่ยนเงื่อนไขด้วยการปิดระบบขดลวดให้ความร้อน (Heater) และเปิดใช้เฉพาะอินฟราเรดโดยที่ความเร็วลมเท่าเดิม ทั้งนี้แต่ละเงื่อนไขได้ดำเนินการทดลอง 3 ชั่วโมง กระชายดำจะถูกอบแห้งจากความชื้นเริ่มต้น 136.0 %d.b. จนเหลือความชื้นสุดท้าย 8.0 %d.b. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของกระชายดำแห้ง มพช. 704/2547) ในการทดลองได้บันทึกค่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ทุก 1 นาที ด้วยโพลดเซลล์ พร้อมทั้งบันทึกค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยกิโวลต์-ชั่วโมง มิเตอร์ ความละเอียด 0.01 kWh และนำผลิตภัณฑ์แห้งไปทดสอบคุณภาพด้านสีและปริมาณน้ำอิสระ

เครื่องอบแห้งแบบผสมผสานมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งมีส่วนประกอบหลักดังนี้ (1) ห้องอบแห้งซึ่งภายในติดตั้งรังสีอินฟราเรดขนาด 250 W จำนวน 4 แผง ยี่ห้อ Infrapara รุ่น EL-2-250 ด้านล่างติดตั้งชุดโพลดเซลล์ขนาด 5 kg เพื่อบันทึกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ (2) ชุดพัดลมขนาดมอเตอร์ 370 W ติดตั้งร่วมกับชุดปรับความเร็วรอบ (3) ชุดขดลวดให้ความร้อนแบบตัวยู ขนาดรวม 6 kW และ (4) ตู้ควบคุมระบบอบแห้ง สำหรับปรับระบบการทำงานแบบผสมผสาน ควบคุมอุณหภูมิการอบแห้ง ปรับความเร็วรอบพัดลม และบันทึกการใช้พลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบผสมผสาน

3.2 การหาจุดกระตุ้นพลังงานด้วยอินฟราเรด

สำหรับการทดลองโดยใช้เทคนิคผสมผสานนั้น จะเริ่มจากการอบแห้งด้วยลมร้อนและเมื่อถึงจุดที่การเปลี่ยนแปลงความชื้นผลิตภัณฑ์ค่อนข้างน้อยจะเปลี่ยนเทคนิคการอบแห้งจากการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นการอบแห้งด้วยอินฟราเรด ซึ่งการเปลี่ยนเทคนิคการอบแห้งจะพิจารณาจากความชัน (Slope) ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่เวลาใดๆ เปรียบเทียบกับผลต่างของเวลาที่เก็บข้อมูล ดังสมการที่ (1)

$$\text{Slope} = \frac{\Delta M}{\Delta t} \quad (1)$$

เมื่อ ΔM คือ ผลต่างของความชื้นในช่วงเวลาใดๆ (d.b.)

Δt คือ ผลต่างของเวลาในช่วงความชื้นใดๆ ในงานวิจัยนี้ใช้เท่ากับ 1 นาที

3.3 การหาความชื้นของผลิตภัณฑ์

การหาความชื้นเริ่มต้นของกระชายดำ เมื่อเตรียมผลิตภัณฑ์ในการอบแห้งเสร็จจะนำบางส่วนไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ตามมาตรฐานของ AOAC (2000) เพื่อใช้ในการหาน้ำหนักแห้งของกระชายดำ หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าปริมาณความชื้น (Moisture content, MC) เริ่มต้นตลอดจนความชื้นที่เวลาใดๆ ได้จากสมการที่ (2)



$$MC = \frac{w - d}{d} \quad 2)$$

เมื่อ	MC	คือ	ความชื้นมาตรฐานแห้ง (d.b.)
	w	คือ	มวลเปียกของกระชวยดำที่เวลาใดๆ (g)
	d	คือ	มวลแห้งของกระชวยดำ (g)

3.4 การหาอัตราการอบแห้ง

การหาอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ในการทดลองได้ดำเนินการบันทึกการเปลี่ยนมวลหรือปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกระชวยดำ ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการทดลองจะสามารถวิเคราะห์หาอัตราการอบแห้งได้จากสมการที่ (3) (Vijayan *et al.*, 2016; Karthikeyan & Murugavelh, 2018)

$$DR = \frac{\Delta w}{\Delta t} \quad (3)$$

เมื่อ	DR	คือ	อัตราการอบแห้ง (g/min)
	Δw	คือ	มวลน้ำที่ระเหย (g)
	Δt	คือ	เวลาที่เปลี่ยนแปลง (min)

3.5 การทดสอบคุณภาพด้านสี

กระชวยดำก่อนและหลังการอบแห้งจะทดสอบสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ KONICA MINOLTA รุ่น CM-3500d เป็นการทดสอบในระบบ CIE โดยจะนำค่าความแตกต่างของสีมาเปรียบเทียบกัน ที่เงื่อนไขใดมีค่า ΔE น้อยที่สุด ตามสมการที่ (4) จะถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสีใกล้เคียงกับกระชวยดำสดก่อนอบแห้งมากที่สุด (Caparino *et al.*, 2012; Kroehnke *et al.*, 2018) โดยใช้แสง Daylight ที่ 6,500 K ในการวัดสี

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (4)$$

เมื่อ	ΔE	คือ	ความแตกต่างของสีโดยรวม
	ΔL	คือ	ความแตกต่างของความสว่าง
	Δa	คือ	ความแตกต่างของความเข้มสีแดงถึงเขียว

Δb คือ ความแตกต่างของความเป็นสีเหลืองถึงน้ำเงิน

3.6 การทดสอบค่าปริมาณน้ำอิสระ

ปริมาณน้ำอิสระหรือแอกทิวิตีของน้ำ (Water activity, a_w) เป็นค่าที่แสดงระดับพลังงานของน้ำมีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา และความปลอดภัยของอาหาร (Pekke *et al.*, 2013) มีค่าตั้งแต่ 0-1 สำหรับกระชายดำที่ผ่านการอบแห้งจัดอยู่ในประเภทอาหารแห้งซึ่งต้องมีค่าปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.6 โดยในการทดลองทุกเงื่อนไขจะใช้เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ ยี่ห้อ Aqua lab รุ่น Series 3 TE ในการทดสอบผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

3.7 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ที่ใช้ในการอบแห้ง ต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังนี้ คือ มวลของผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการอบแห้ง รวมถึงปริมาณการใช้พลังงานตลอดกระบวนการอบแห้ง มาคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ โดยใช้สมการที่ (5) (Kaveh *et al.*, 2020)

$$SEC = \frac{3.6E_p}{w_i - w_f} \quad (5)$$

เมื่อ	SEC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/g)
	w_i	คือ	มวลเปียกของกระชายดำก่อนอบแห้ง (g)
	w_f	คือ	มวลเปียกของกระชายดำหลังอบแห้ง (g)
	E_p	คือ	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

3.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการเอมพิริคัล

การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetic) ของการอบแห้งกระชายดำ จะสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งโดยใช้สมการเอมพิริคัล เนื่องจากเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีกระบวนการวิเคราะห์ง่ายและไม่ซับซ้อน และเป็นแบบจำลองการถ่ายเทมวลที่นิยมใช้ในการศึกษาการอบแห้งอาหารหรือวัสดุทางการเกษตร โดยแบบจำลองที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้มีจำนวน 7 สมการ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

No.	Name of model	Model equation	References
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	Gokhale & Lele, (2011)
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page, (1949)
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Silva <i>et al.</i> , (2014)
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt)+c$	Darvishi <i>et al.</i> , (2013)
5	Weibull distribution	$MR = a-b \exp(-(kt)^n)$	Corzo <i>et al.</i> , (2008)
6	Two-term	$MR = a \exp(-k_0t)+b \exp(-k_1t)$	Henderson, (1974)
7	Verma <i>et al.</i>	$MR = a \exp(-kt)+(1-a)\exp(-gt)$	Verma <i>et al.</i> , (1985)

หมายเหตุ: a, b, c, g, k, k_0 , k_1 และ n คือ ค่าคงที่จากการวิเคราะห์สมการเอมพิริคัล

t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาท)

สมการเอมพิริคัลจะแสดงอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นจำเป็นต้องทราบค่าความชื้นสมดุล แต่ความชื้นสมดุลของวัสดุมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆ จึงประมาณค่าความชื้นสมดุลให้เท่ากับศูนย์ (Vijayan *et al.*, 2016; Karthikeyan & Murugavelh, 2018; Khuthadzo & Tilahun, 2021) ดังนั้นจึงสามารถเขียนความสัมพันธ์อัตราส่วนความชื้นได้ดังสมการที่ (6)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} = \frac{M_t}{M_i} \quad (6)$$

เมื่อ	MR	คือ	อัตราส่วนความชื้น (decimal)
	M_t	คือ	ความชื้นที่เวลาใดๆ (d.b.)
	M_i	คือ	ความชื้นเริ่มต้น (d.b.)
	M_{eq}	คือ	ความชื้นสมดุล (d.b.)

การหาค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลที่เหมาะสม สำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง จะใช้ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองไปวิเคราะห์สมการโดยใช้วิธีถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ในการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการในตารางที่ 1 ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของสมการเอมพิริคัล คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square

error, RMSE) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7) และ (8) โดยสมการเอมพิริคัลที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด และค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด จะเป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (Faruq *et al.*, 2019)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]} \quad (8)$$

เมื่อ	$MR_{exp,i}$	คือ	อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง (decimal)
	$\overline{MR}_{exp}$	คือ	ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง (decimal)
	$MR_{pre,i}$	คือ	อัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการเอมพิริคัล (decimal)
	N	คือ	จำนวนข้อมูลในการทดลอง

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

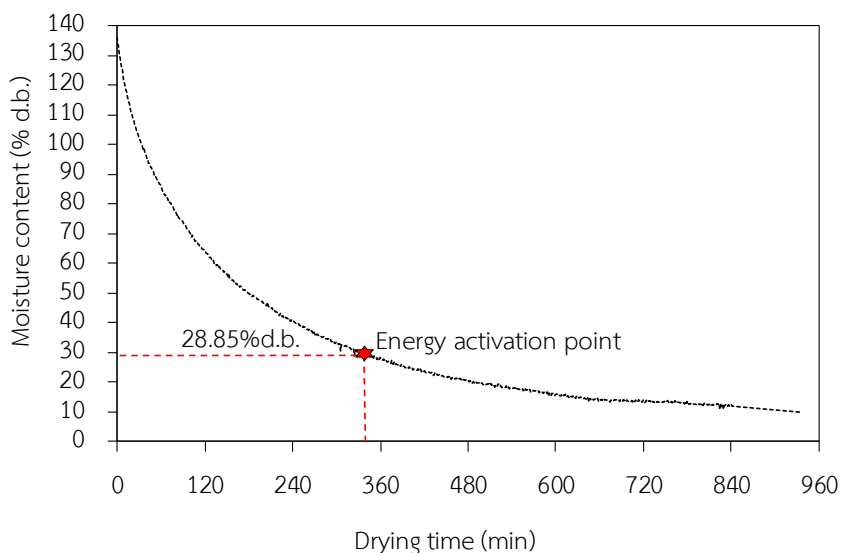
4.1 ผลการหาสภาวะที่ใช้พลังงานกระตุ้น

จากการทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว และกำหนดความชื้นของกราฟให้เท่ากับหรือน้อยกว่า 1 นั้น (ซึ่งเป็นจุดที่ความชื้นผลิตภัณฑ์เริ่มเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย) จะได้ช่วงที่ความชื้นมีค่าประมาณ 28.85 %d.b. เวลาการอบแห้งประมาณ 350 นาที ดังรายละเอียดในภาพที่ 2 จุดนี้จะเป็นจุดที่ใช้อินฟราเรดกระตุ้นหรือเรียกได้ว่าเป็นจุดที่เปลี่ยนเงื่อนไขการอบแห้งจากการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นการอบแห้งด้วยอินฟราเรด

4.2 จลนพลศาสตร์การอบแห้งกระชายดำ

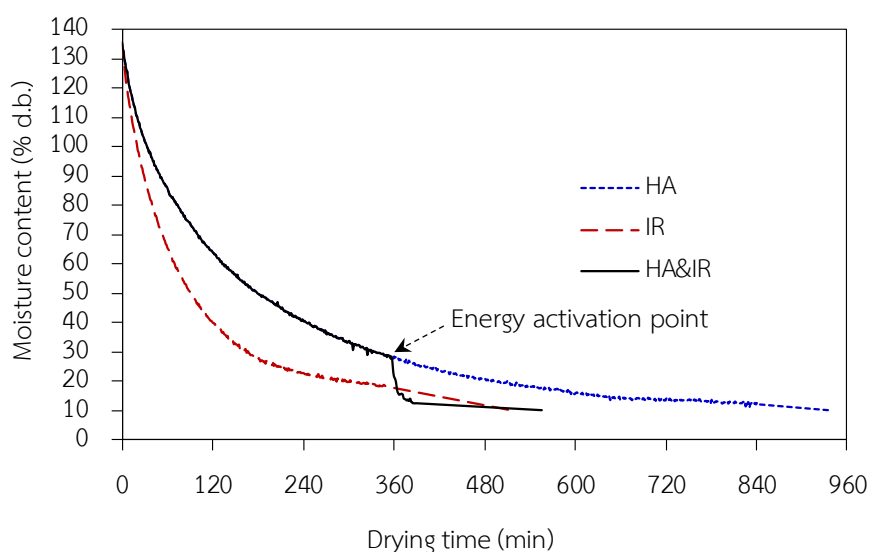
จากการทดลองพบว่า ความชื้นทุกเงื่อนไขจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้ง โดยช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง หลังจากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลง สำหรับการใช้เทคนิคผสมผสานพบว่า ความชื้นจะลดลงทันทีเมื่อใช้พลังงานอินฟราเรดกระตุ้นดังข้อมูลที่แสดงในภาพที่ 3 และ 4 การอบแห้งด้วยอินฟราเรดจะมีความชื้นของเส้นกราฟค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากอินฟราเรดสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในผลิตภัณฑ์ทำให้พลังงานส่วนหนึ่งของการแผ่รังสีถูกผลิตภัณฑ์ดูดกลืนไว้ และทำให้โมเลกุลของผลิตภัณฑ์เกิดการสั่นสะเทือนและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ดังนั้นน้ำที่อยู่ในโมเลกุล

ก็จะได้รับความร้อน และเกิดการแพร่ไปยังบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ จึงทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการใช้ลมร้อน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Onwude *et al.*, 2016; Daniel *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2020)

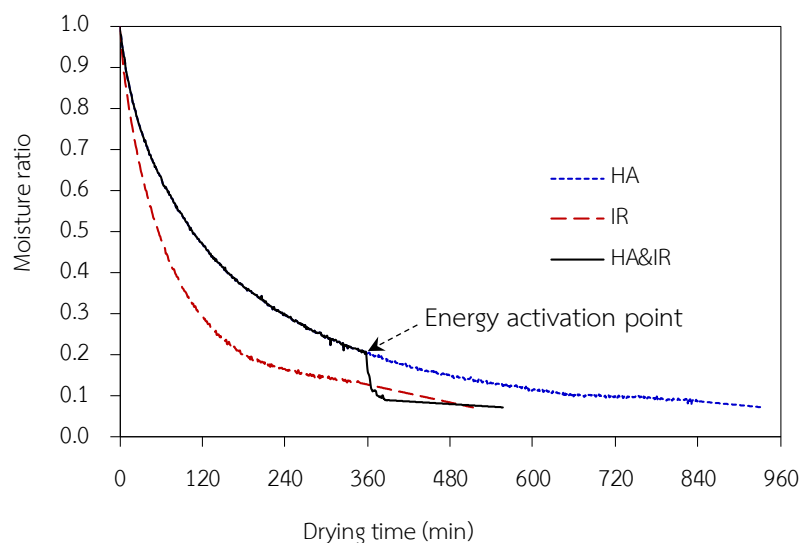


ภาพที่ 2 สภาวะที่ใช้พลังงานกระตุ้นด้วยอินฟราเรด

นอกจากนั้นจากข้อมูลการทดลองพบว่า การอบแห้งกระชายดำเพื่อให้เหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 8.0 %d.b. ด้วย HA, HA&IR และ IR ใช้เวลาเท่ากับ 935 นาที, 557 นาที และ 515 นาที ตามลำดับ โดยพบว่า HA&IR ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า HA เท่ากับ 67.8 เปอร์เซ็นต์

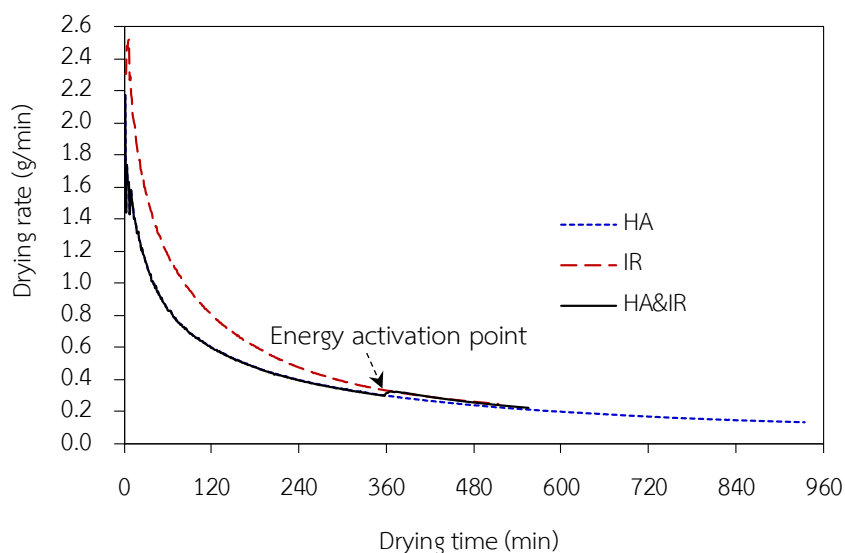


ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของกระชายดำเทียบกับเวลา



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของกระชายดำเทียบกับเวลา

ภาพที่ 5 นำเสนออัตราการอบแห้งของแต่ละเทคนิค จากข้อมูลจะพบว่า HA&IR จะมีอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเริ่มกระตุ้นด้วยอินฟราเรด ส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 5 อัตราการอบแห้งของกระชายดำเทียบกับเวลา

4.3 ผลการทดสอบคุณภาพด้านสีและปริมาณน้ำอิสระ

ตารางที่ 2 แสดงค่าความแตกต่างด้านสีและปริมาณน้ำอิสระของกระชายดำหลังการอบแห้ง จากข้อมูลในตารางจะพบว่าทุกเงื่อนไขของการอบแห้ง จะมีค่าความสว่าง (L^*) สูงขึ้นเมื่อ

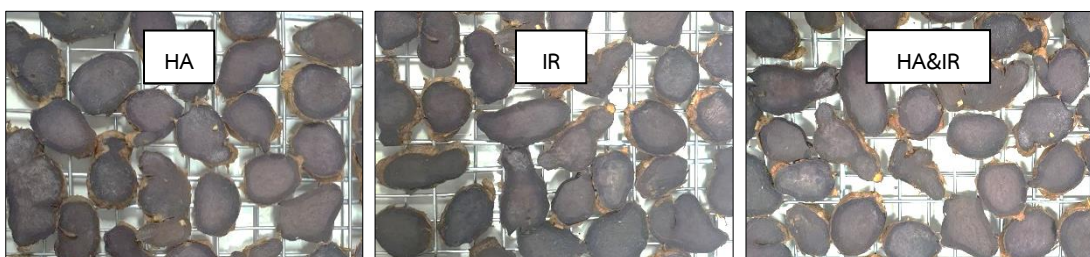
เปรียบเทียบกับกระชายดำสด และทุกเงื่อนไขการทดลองได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) มีค่าเพิ่มขึ้นทุกเงื่อนไขเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์สด โดยการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีค่าความแตกต่างของสีแดงมากที่สุด ค่าความเป็นสีน้ำเงิน (b^*) มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการอบแห้งทุกเงื่อนไขดังข้อมูลที่แสดงในภาพที่ 6

ตารางที่ 2 ความแตกต่างด้านสีและปริมาณน้ำอิสระของกระชายดำหลังการอบแห้ง

Conditions	L^*	a^*	b^*	ΔL	Δa	Δb	ΔE	a_w
Fresh	31.36 $\pm$ 0.93 ^b	1.92 $\pm$ 0.45 ^c	-3.22 $\pm$ 1.05 ^b	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
HA	55.14 $\pm$ 4.27 ^a	7.31 $\pm$ 1.45 ^a	-5.57 $\pm$ 1.29 ^a	23.78 $\pm$ 4.27 ^a	5.38 $\pm$ 1.45 ^a	-2.35 $\pm$ 1.29 ^a	24.56 $\pm$ 4.30 ^a	0.51 $\pm$ 0.01 ^a
IR	51.07 $\pm$ 2.42 ^a	6.27 $\pm$ 0.25 ^{ab}	-4.24 $\pm$ 0.52 ^{ab}	19.71 $\pm$ 2.42 ^a	4.35 $\pm$ 0.25 ^{ab}	-1.02 $\pm$ 0.52 ^b	20.22 $\pm$ 2.36 ^b	0.29 $\pm$ 0.02 ^c
HA&IR	51.59 $\pm$ 3.12 ^a	5.51 $\pm$ 0.98 ^b	-5.77 $\pm$ 1.24 ^a	20.22 $\pm$ 3.12 ^a	3.59 $\pm$ 0.98 ^b	-2.55 $\pm$ 1.24 ^a	20.76 $\pm$ 3.06 ^{ab}	0.42 $\pm$ 0.01 ^b

หมายเหตุ: a-c means in the same column with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

ในส่วนของการอบแห้งที่มีอินฟราเรดร่วมด้วยจะมีค่าสีใกล้เคียงกับกระชายดำสดมากกว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ผลต่างโดยรวมพบว่าการอบแห้งด้วยอินฟราเรดให้ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE) น้อยที่สุด โดยการอบแห้งด้วยอินฟราเรดมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานกับอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยลมร้อนเท่ากับ 2.67 และ 21.46 เพอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนอาศัยอากาศร้อนเป็นตัวกลางพา ความชื้นออกจากผิวของกระชายดำ ซึ่งแตกต่างจากการใช้อินฟราเรดที่จะทำให้โมเลกุลของวัสดุเกิดการสั่นสะเทือนและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนขึ้นในวัสดุ ดังนั้นจึงทำให้น้ำระเหยได้เร็วกว่าการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่า ส่งผลให้การอบแห้งด้วยอินฟราเรดมีค่าความแตกต่างของสีโดยรวมน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน (Wang *et al.*, 2019; Sakare *et al.*, 2020)

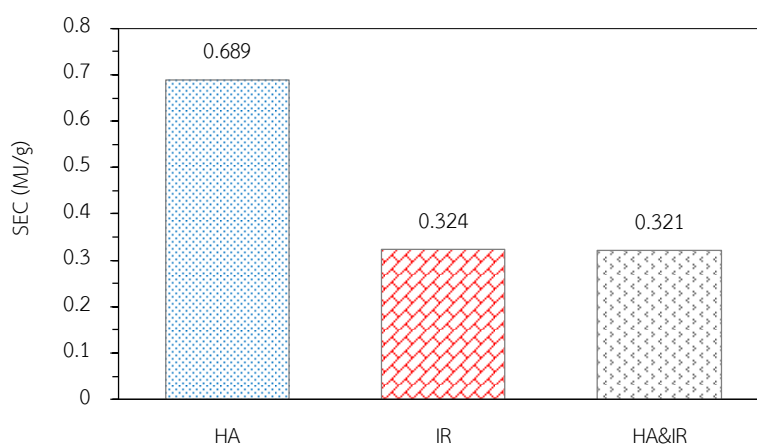


ภาพที่ 6 กระชายดำหลังการอบแห้ง

สำหรับค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงระดับพลังงานของน้ำมีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา การเสื่อมเสีย และความปลอดภัยของอาหาร มีค่าตั้งแต่ 0-1 พบว่าทุกเงื่อนไขการทดลองกระชายดำอบแห้งอยู่ในเกณฑ์ของอาหารแห้งทั้งหมด (Pekke *et al.*, 2013) โดยมีค่า a_w ไม่เกิน 0.6 ค่าที่ได้ทุกเงื่อนไขการทดลองอยู่ในช่วง 0.29-0.51

4.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

สำหรับความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ จากข้อมูลจะพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีการใช้พลังงานสูงที่สุด เนื่องจากระยะเวลาของการอบแห้งยาวนาน ส่วนการอบแห้งด้วยอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานอินฟราเรดมีการใช้พลังงานใกล้เคียงกัน และต่ำกว่าแบบลมร้อน ดังข้อมูลที่น่าเสนอในภาพที่ 7 ทั้งนี้เนื่องจากผลของอินฟราเรดที่ช่วยกระตุ้นให้น้ำในผลิตภัณฑ์ออกมาสู่ผิวส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลงและส่งผลต่อการใช้พลังงานในการระเหยน้ำ จากข้อมูลจะพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานอินฟราเรดใช้พลังงานน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวประมาณ 114.64 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 7 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งกระชายดำ

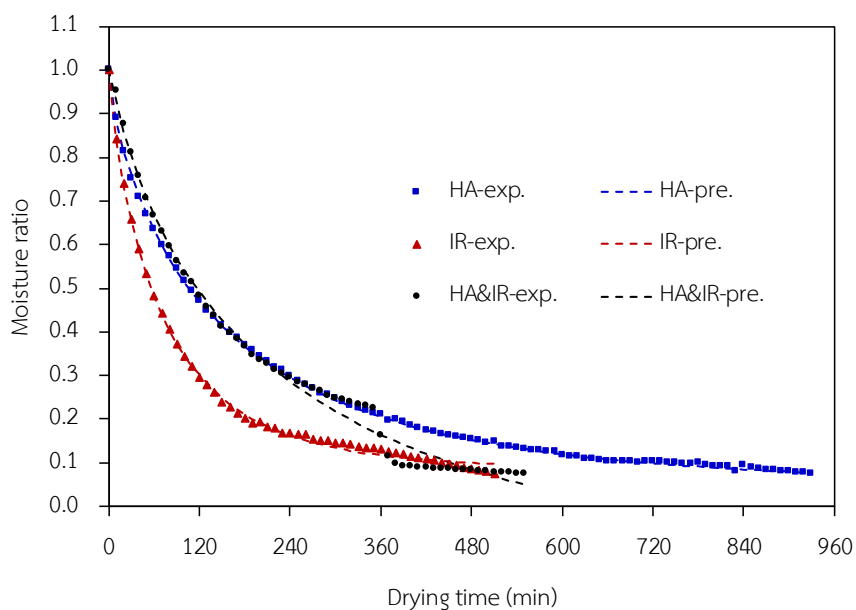
4.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลในการทำนายการอบแห้ง

สำหรับการนำผลการทดลองอบแห้งกระชายดำไปวิเคราะห์โดยวิธีถดถอยแบบไม่เชิงเส้น เพื่อหาค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลของสมการในตารางที่ 1 จำนวน 7 สมการ ทุกเงื่อนไขสมการเอมพิริคัลมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.85771 - 0.99974 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.00315 - 0.14614 ดังตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน สมการเอมพิริคัลของ Weibull distribution สามารถทำนายจนผลศาสตร์การอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด ($R^2 = 0.99974$, RMSE = 0.00315) การอบแห้งด้วยอินฟราเรด สมการเอมพิริคัลของ Two-term สามารถทำนายจนผลศาสตร์การอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด ($R^2 =$

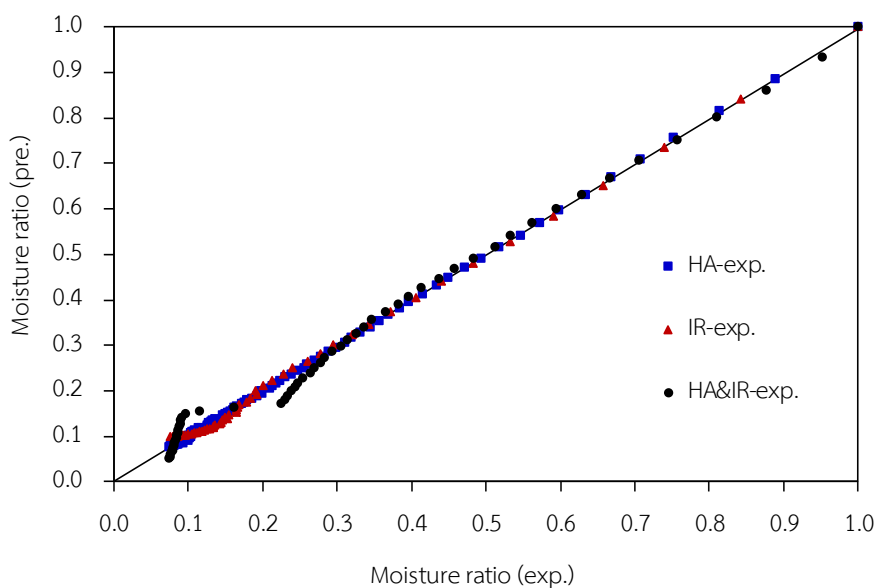
0.99902, RMSE = 0.11930) และการอบแห้งด้วยลมร้อนผสมผสานอินฟราเรด สมการเอมพิริคัลของ Weibull distribution สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด ($R^2 = 0.98995$, RMSE = 0.04322) เมื่อนำสมการที่กล่าวมาข้างต้นไปใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของแต่ละเทคนิคการอบแห้งจะได้ผลลัพธ์ดังข้อมูลที่แสดงในภาพที่ 8 และเมื่อเปรียบเทียบผลจากการคำนวณโดยใช้สมการกับผลจากการทดลอง จะพบว่าข้อมูลเกาะกลุ่มกันมีแนวโน้มที่เป็นเส้นตรง และมีความลาดชัน 45 องศา ดังภาพที่ 9 อย่างไรก็ตามสำหรับการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสานจะมีความคลาดเคลื่อนในช่วงท้ายของการอบแห้ง เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ถูกกระตุ้นด้วยคลื่นอินฟราเรดส่งผลให้เกิดการระเหยน้ำจากภายในผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว ดังนั้นความชื้นของข้อมูลจึงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วด้วยเช่นกัน ส่งผลให้การทำนายมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในช่วงนี้

ตารางที่ 3 ค่าคงที่และผลการทำนายสมการเอมพิริคัล

Model	Conditions	Constants	R^2	RMSE
Newton	HA	k= 0.00487	0.89034	0.06419
	IR	k= 0.00899	0.85771	0.14614
	HA&IR	k= 0.00543	0.97789	0.06257
Page	HA	k= 0.03392 n= 0.64795	0.99651	0.01145
	IR	k= 0.05687 n= 0.62433	0.98503	0.11808
	HA&IR	k= 0.01128 n= 0.86438	0.98785	0.04062
Henderson and Pabis	HA	a= 0.79017 k= 0.00360	0.95816	0.03965
	IR	a= 0.78239 k= 0.00659	0.92479	0.12683
	HA&IR	a= 0.93334 k= 0.00503	0.98422	0.04909
Logarithmic	HA	a= 0.79470 k= 0.00573 c = 0.09003	0.99425	0.01470
	IR	a= 0.81587 k= 0.01239 c = 0.10999	0.99325	0.12118
	HA&IR	a= 0.92231 k= 0.00550 c = 0.02714	0.98480	0.04515
Verma et al.	HA	a= 0.44875 k= 0.00214 g = 0.01338	0.99608	0.01214
	IR	a= 0.30018 k= 0.00251 g = 0.01948	0.99842	0.11941
	HA&IR	a= 0.83825 k= 0.00457 g = 0.02672	0.98916	0.03990
Two-term	HA	a= 0.35114 k_0 = 0.00176 b = 0.58126 k_1 = 0.00951	0.99808	0.00850
	IR	a= 0.69166 k_0 = 0.01777 b = 0.27698 k_1 = 0.00231	0.99902	0.11930
	HA&IR	a= 0.19335 k_0 = 0.03225 b = 0.84086 k_1 = 0.00457	0.98952	0.04032
Weibull distribution	HA	a= 0.05350 b= -0.95336 k= 0.00642 n= 0.72759	0.99974	0.00315
	IR	a= 0.08741 b= -0.93794 k= 0.01387 n= 0.77070	0.99764	0.11933
	HA&IR	a= -0.14319 b= -1.21277 k= 0.00441 n= 0.68400	0.98995	0.04322



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของกระชายดำระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณ



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณ

5. สรุปผล

ผลจากการศึกษาพบว่า ความชื้นกระชายดำลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใช้อินฟราเรดกระตุ้น โดยพบว่า IR, HA&IR และ HA ใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 515, 557 และ 935 นาที ตามลำดับ ในส่วนของคุณภาพด้านสี พบว่า IR มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยที่สุดลำดับถัดมาคือ HA&IR และ HA

ตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบว่า HA&IR มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด ถัดมาคือ IR และ HA ตามลำดับ สำหรับปริมาณน้ำอิสระพบว่า การอบแห้งทุกเทคนิคอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของอาหารแห้ง และสุดท้ายยังพบว่า แบบจำลองที่สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งกระชายดำ ด้วย HA, IR และ HA&IR ได้ดีที่สุด คือ Weibull distribution, Two-term และ Weibull distribution ตามลำดับ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และสาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- Association of Official Analytical Chemists. (2000). Official methods of analysis. (17th ed.). Maryland: Gaithersburg.
- Aymen, E., Sami, K., Ilhem, H., & Abdelhamid, F. (2015). Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape. **Renewable Energy**, 77, 1-8.
- Caparino, O.A., Tang, J., Nindo, C. I., Sablani, S. S., Powers, J. R., & Fellman, J. K. (2012). Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. **Journal of Food Engineering**, 111, 135-148.
- Corzo, O., Bracho, N., Pereira, A., & Vásquez, A. (2008). Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. **LWT- Food Science and Technology**, 41, 2023-2028.
- Dan, H., Pei, Y., Xiaohong, T., Lei, L., & Bengt, S. (2021). Application of infrared radiation in the drying of food products, **Trends in Food Science & Technology**, 110, 765-777.
- Daniel, I.O., Norhashila, H., & Guangnan, C. (2016). Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. **Trends in Food Science & Technology**, 57, 132-145.

- Daniel, I.O., Norhashila, H., Khalina, A., Rimfiel, J., & Guangnan, C. (2019). The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato. **Journal of Food Engineering**, 241, 75-87.
- Darvishi, H., Azadbakht, M., Rezaeiasl, A., & Farhang, A. (2013). Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, 12, 121-127.
- Faruq, A.A., Zhang, M., & Fan, D. (2019). Modeling the dehydration and analysis of dielectric properties of ultrasound and microwave combined vacuum frying apple slices. **Drying Technology**, 37(3), 409-423.
- Gokhale, S.V., & Lele, S.S. (2011). Dehydration of red beet root (beta vulgaris) by hot air drying: process optimization and mathematical modeling. **Food Science and Biotechnology**, 20(4), 955-964.
- Guo, Y., Wu, B., Guo, X., Ding, F., Pan, Z., & Ma, H. (2020). Effects of power ultrasound enhancement on infrared drying of carrot slices: Moisture migration and quality characterizations. **LWT- Food Science and Technology**, 126, 109312. Doi: 10.1016/j.lwt.2020.109312
- Hajar, E., Mohammed, B., Rachid, T., & Bargach, M.N. (2018). Experimental and theoretical analysis of drying grapes under an indirect solar dryer and in open sun. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 49, 58-64.
- Henderson, S. M. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. **Trans ASAE**, 17, 1167-1172.
- Khampakool, A., Soisungwan, S., & Park, S. H. (2019). Potential application of infrared assisted freeze drying (IRAFD) for banana snacks: Drying kinetics, energy consumption, and texture. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, 99, 355-363.
- Karthikeyan, A.K., & Murugavelh, S. (2018). Thin layer drying kinetics and exergy analysis of turmeric (*Curcuma longa*) in a mixed mode forced convection solar tunnel dryer. **Renewable Energy**, 128, 305-312.
- Kaveh, M., Chayjan, R.A., Taghinezhad, E., Sharabiani, V.R., & Motevali, A. (2020). Evaluation of specific energy consumption and GHG emissions for different drying

- methods (Case study: Pistacia Atlantica). **Journal of cleaner production**, 259, 120963. Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120963
- Khuthadzo, M., & Tilahun S.W. (2021). The kinetics of thin-layer drying and modelling for mango slices and the influence of differing hot-air drying methods on quality. **Heliyon**, 7, 1-15.
- Kroehnke, J., Szadzinska, J., Stasiak, M., Radziejewska-Kubzdela, E., Bieganska-Marecik, R., & Musielak, G. (2018). Ultrasound- and microwave-assisted convective drying of carrots- process kinetics and product's quality analysis. **Ultrasonics Sonochemistry**, 48, 249-258.
- Muga, F.C., Marenja, M.O., & Workneh, T.S. (2021). Modelling the thin-layer drying kinetics of marinated beef during infrared-assisted hot air processing of biltong. **International Journal of Food Science**, 8819780. Doi: 10.1155/ 2021/8819780
- Nathakaranakule, A., Paengkanya, S. & Soponronnarit, S. (2019). Durian chips drying using combined microwave techniques with step-down microwave power input. **Food and Bioproducts Processing**, 116, 105-117.
- Onwude, D.I., Hashim, N., Chen, G. (2016). Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. **Trends in Food Science & Technology**, 57, 132-145.
- Page, G. (1949). Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layer. M.S. thesis, Department of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Papu, S., Singh, A., Jaivir, S., Sweta, S., Arya, A.M. & Singh, B.R. (2014). Effect of drying characteristics of garlic-A Review. **Food Processing & Technology**, 5(4), 1-6.
- Pitakpawasutthi, Y., Palanuvej, C., & Ruangrunsi, N. (2018). Quality evaluation of Kaempferia parviflora rhizome with reference to 5, 7-dimethoxyflavone. **Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research**, 9(1), 26-31.
- Pekke, M.A., Pan, Z.L., Atungulu, G.G., Smith, G., & Thompson, J.F. (2013). Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, 6(3), 58-70.
- Riadh, M.H., Ahmad, S.A.B., Marhaban, M.H. & Soh, A.C. (2015). Infrared heating in food drying: An overview. **Drying Technology**, 33(3), 322-335.

- Sa-adchom, P., Swasdisevi, T., Nathakaranakule, A., & Soponronnarit, S. (2011). Mathematical model of pork slice drying using superheated steam. **Journal of Food Engineering**, 104, 499-507.
- Sakare, P., Prasad, N., Thombare, N., Singh, R. & Sharma, S.C. (2020). Infrared drying of food materials: Recent advances. **Food Engineering Reviews**, 12, 381-398.
- Silva, W.P., Silva, C.M.D.P.S., Gama, F.J.A., & Gomes, J.P. (2014). Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, 13, 67-74.
- Verma, L.R., Bucklin, R.A., Endan, J.B., Wratten, F.T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. **Trans ASAE**, 28, 296-301.
- Vijayan, S., Arjunan, T.V., & Kumar, A. (2016). Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter melon in sensible storage based indirect solar dryer. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 36, 59-67.
- Vonggrachit, K. (2019). The government is preparing to push 4 top economic herbs. Retrieved from <http://www.voicetv.co.th/read/Hk3DwZ0lQ>
- Wang, J., Law, C.L., Nema, P.K., Zhao, J.H., Liu, Z.L. Deng, L.Z., Gao, Z.J., & Xiao, H.W. (2018). Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices. **Journal of Food Engineering**, 224, 129-138.
- Wang, Q., Li, S., Han, X., Ni, Y., Zhao, D., & Hao, J. (2019). Quality evaluation and drying kinetics of shitake mushrooms dried by hot air, infrared and intermittent microwave assisted drying methods. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, 107, 236-242.
- กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ และศรีมา แจ้คำ. (2562).แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวด้วยสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด. **วารสารวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต**, 9(3), 29-44.
- ศรีมา แจ้คำ, กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ และเอกภูมิ บุญธรรม. (2564). การอบแห้งสมุนไพรด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดและอากาศร้อน. **วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม**, 3(1), 32-43.



การศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อน แบบไหลผ่านทางเดียว

WHITE NOODLE DRYING MACHINE PERFORMANCE STUDY WITH HOT AIR SINGLE FLOW

วินัย บุญมุณี^{1*}, อภินันต์ นามเขต¹, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา¹, เอกภูมิ บุญธรรม²,
กฤษฎา อ้นอ้าย², ประพันธ์พงษ์ สมศิลา¹

Vinai Boonmunas^{1*}, Apinunt Namkhat¹, Umphisak Teeboonma¹, Eakapoom Buntham²,
Kritsada On-ai², Praphanpong Somsila¹

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี ประเทศไทย 34190

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani, Thailand, 34190

²Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: vinai2169@gmail.com

วันที่รับระบบ 3 กันยายน 2565

วันที่แก้ไขบทความ 20 ธันวาคม 2565

วันที่ตอบรับบทความ 20 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียวที่มีการแปรผันอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมร้อนภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิการอบแห้ง 45, 50 และ 55 °C และความเร็วลมร้อน 1.0, 1.5 และ 2.0 m/s โดยใช้สัดส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ได้รับการทดสอบในการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ผลการศึกษาพบว่า กรณีอุณหภูมิอบแห้ง 55 °C และความเร็วลมร้อน 2 m/s จะให้ค่าสัดส่วนความชื้นต่ำที่สุดเท่ากับ 0.162 โดยค่าความชื้นเส้นหมี่ขาวสุดท้ายเท่ากับ 15.83 %d.b. หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 10% จะทำให้สัดส่วนความชื้นลดลง 9.83% และการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมร้อนเฉลี่ย 40% จะทำให้สัดส่วนความชื้นลดลง 6.76% อัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 0.74 kg/h และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดเท่ากับ 6.013 MJ/kg นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาจลพลศาสตร์เครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียวเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองพบว่า สมการ Two term สามารถทำนายผลการอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียวได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.999023944 ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุด และค่า RMSE เท่ากับ 0.008964633 ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุด โดยเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Two term มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

คำสำคัญ: การอบแห้ง, เครื่องอบแห้งลมร้อน, เส้นหมี่ขาว

Abstract

The objective of this research was to study the performance of white noodle dryers with single-flow hot air with variations in drying temperature and hot air speed under drying temperature conditions of 45, 50 and 55 °C and wind speeds of 1.0, 1.5 and 2.0 m/s. The moisture ratio, drying rates and specific energy consumption were tested to evaluate the performance of the dryers. The study found that in the case of a drying temperature of 55 °C and a hot air speed of 2 m/s, the lowest moisture ratio was 0.162, with the final white noodle moisture value being 15.83 %d.b. In other words, an average drying temperature increase of 10% caused a 9.83% decrease in the moisture ratio, and an increase in the average hot air speed of 40% caused a 6.76% decrease in the moisture ratio. The maximum drying rate was 0.74 kg/h and the lowest specific energy consumption was 6.013 MJ/kg. In addition, a study of the kinetics of white noodle dryers with single-flow hot air was conducted compared with the results of the experiment. The two-term equation could best predict the effect of drying noodles with hot air, with R^2 equal to 0.999023944, which was the largest value, and RMSE of 0.008964633, which was the smallest value. When the calculated value according to the format of the two-term equation was compared with the results obtained from the experiment, the results of these comparisons were found to be very consistent.

Keywords: Drying, Hot air dryer, Noodle

1. บทนำ

“เส้นหมี่ขาว” นับเป็นอาหารอีกชนิดหนึ่งที่นำมาใช้ประกอบอาหารในลักษณะแบบเดียวกันกับจำพวกก๋วยเตี๋ยวต่างๆ ที่พบได้ทั่วไปตามร้านอาหารทั่วประเทศและยังเป็นชนิดของอาหารที่ผู้บริโภคนิยมบริโภคครองลงมาจกข้าว เนื่องจากให้พลังงานที่ค่อนข้างสูงและมีราคาถูก ทั้งนี้เส้นหมี่ขาวยังสามารถนำไปปรุงเป็นอาหารอย่างอื่นได้อีกมากมาย เช่น ผัดหมี่ ผัดซีอิ๊ว หมี่กะทิ ผัดหมี่ซั่ว และก๋วยเตี๋ยว เป็นต้น โดยเส้นหมี่ขาวสดจะมีลักษณะเส้นสีขาวเนื่องจากส่วนประกอบหลักจะเป็นแป้ง

และน้ำ ทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดีส่งผลให้เส้นหมี่ขาวสดเกิดการเน่าเสียได้เร็วและเก็บได้ไม่เกิน 3 วัน จึงจำเป็นต้องลดความชื้นผลิตภัณฑ์เส้นหมี่ขาวด้วยกระบวนการอบแห้งเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และยืดเวลาในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้นานขึ้น การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งจึงถือเป็นแนวทางการแก้ปัญหาที่ดีเป็นอย่างดี สำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งมีด้วยกัน ในหลายวิธีเช่น การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า การอบแห้งด้วยสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน เป็นต้น โดยเป็นที่ทราบกัน ดีว่ากระบวนการอบแห้งมีการใช้พลังงานค่อนข้างสูง (Huelsz & Rechtman, 2013) อย่างไรก็ตามก็ได้มีนักวิจัยทำการศึกษาและทดสอบเทคนิคการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้ได้ในระดับสูง สำหรับการศึกษาวิจัยการอบแห้งลมร้อนที่สามารถจำแนกได้ด้วยกัน 2 กลุ่มการศึกษาคือ กลุ่มแรกทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องอบแห้งประกอบด้วย Jeevarathinam *et al.*, (2021) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งขมิ้นชันด้วยการใช้เทคนิคลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า ที่ความเร็วลมร้อน 2 m/s อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C ในกรณีใช้ลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดจะมีอัตราการอบแห้งสูงสุด รองลงมาคือ กรณีของการใช้อินฟราเรดอย่างเดียว และลมร้อนอย่างเดียว มีค่าอัตราการอบแห้งลดลงเท่ากับ 26.98% และ 35.21% ตามลำดับ Wang *et al.*, (2017) ทำการศึกษาระบบการอบแห้งเส้นหมี่ขาวแบบดั้งเดิมโดยใช้ลมร้อนในเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ที่มีความยาว 60 m และมีการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ใหม่ที่มีความยาวเพิ่มมากขึ้นถึง 130 m ประกอบกับการแก้ไขระบบควบคุมอัตโนมัติของอุณหภูมิและความชื้น ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า เครื่องใหม่ใช้พลังงานน้อยกว่าเครื่องเก่าและยังมีสมรรถนะการอบแห้งสูงกว่า Basman & Yalcin, (2011) ทำการศึกษการอบแห้งเส้นบะหมี่ด้วยการเลือกใช้อินฟราเรด ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า ความสามารถในการอบแห้งสามารถลดเวลาการอบแห้งเหลือเท่ากับ 3 ชั่วโมง 30 นาที และสามารถลดเวลาการปรุงอาหารได้มากถึง 50% นอกจากนั้นยังพบอีกว่า การอบแห้งด้วยอินฟราเรดสามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติความเหนียวของเส้นบะหมี่ และแป้งของเส้นบะหมี่มีความสามารถในการทนต่อเอนไซม์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย Yu *et al.*, (2018) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งบะหมี่ในประเทศจีนด้วยเทคนิคการประยุกต์ใช้ Low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การเลือกใช้เทคนิคดังกล่าวสามารถลดการหดตัว และการเกิดรอยแยกในผลิตภัณฑ์ และยังพบว่า น้ำภายในผลิตภัณฑ์จะลดลงค่อนข้างรวดเร็ว นอกจากนั้นยังพบอีกว่า สำหรับกระบวนการนำน้ำออกจากผลิตภัณฑ์จะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบแล้วจะกระจายไปยังตำแหน่งกลางภายในเวลา 90 นาที และสามารถนำน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ทั้งหมดหลังจากเวลา 240 นาที Guo *et al.*, (2020) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการเพิ่มคุณสมบัติที่ดีให้กับเส้นบะหมี่ข้าวสาลีกึ่งแห้ง โดยผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อเส้นบะหมี่ข้าวสาลีกึ่งแห้งได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยไอน้ำ

ร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 155 – 170 °C จะทำให้บะหมี่มีความเสถียรในการเก็บรักษา นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์มีจำนวนที่ลดลงช่วยลดความเป็นกรด และยับยั้งการก่อตัวของกรดไขมันอิสระ Zeng *et al.*, (2022) ทำการศึกษาการอบแห้งซึ่งด้วยเทคนิคไมโครเวฟในที่นี้เลือกใช้สัญญาณเรโซแนนซ์แม่เหล็กที่ความถี่ต่ำ (LF-NMR) เพื่อทำการอบแห้งซึ่ง ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การเลือกใช้เทคนิคไมโครเวฟจะสามารถทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่พบว่าการใช้ไมโครเวฟส่งผลต่อความเสียหายของโครงสร้างทางจุลภาคและลักษณะของสีของซีกอย่างเห็นได้ชัด Chen & Pan, (2022) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งวอลนัทด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่มีลักษณะแบบคอลัมน์ในแนวสูงที่มีวิเคราะหการถ่ายเทความร้อน สมรรถนะการอบแห้ง และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ภายใต้อุณหภูมิที่ทำการศึกษา (43, 55, 65 และ 75 °C) และความเร็วคงที่ 0.7 m/s ผลจากการศึกษาพบว่า ผลของการกระจายอุณหภูมิและความชื้น มีผลต่อความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนและการลดความชื้นในวอลนัทอย่างมาก และยังพบอีกว่าระดับความชื้นในแต่ละความสูงของคอลัมน์มีปริมาณที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบอีกว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบคอลัมน์ที่ใช้สามารถอธิบายลักษณะของการอบแห้งได้เป็นอย่างดี และสำหรับงานวิจัยกลุ่มที่สองซึ่งทำการศึกษเกี่ยวกับการเพิ่มคุณสมบัติ และคุณภาพของเส้นทั้งในส่วนของการเพิ่มสารสกัดต่างๆ ลงในเส้นบะหมี่ซึ่งประกอบด้วยสารสกัดจากชาเขียว ชาดำ และชาอู่หลง (Xu *et al.*, 2019) การเพิ่มซีฟิ่งน้ำมันถั่วเหลืองแคนเดลิลา (Oleogel) ต่อการคืนความชุ่มชื้นของบะหมี่ที่อบแห้งด้วยลมร้อน (Oh & Lee, 2020) การเพิ่มรำข้าวสาลีที่มีต่อคุณสมบัติของเส้นหมี่ขาวจีนชนิดแห้ง (Song *et al.*, 2013) การศึกษาเกี่ยวกับผลของการเติมเกลือในปริมาณที่แตกต่างกันต่อลักษณะการอบแห้งของเส้นหมี่ขาว (Chen *et al.*, 2014) การศึกษาเกี่ยวกับการเลือกใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตเส้นหมี่ขาวชาวนาชนิดเค็ม และผลของทรานสกลูตามีนสที่มีต่อเส้น (Weng *et al.*, 2020) และการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของเส้นหมี่ขาวที่ทำจากแป้งสาลีที่มีส่วนผสมของ Bambara protein ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน (Arise *et al.*, 2022) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาในลักษณะของการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของแป้งบัควีทและคุณภาพของเส้นหมี่ขาวจากบัควีท (Liu *et al.*, 2022) การศึกษาเกี่ยวกับการใช้วิธีการของแมชชีนเลิร์นนิงในการทำนายคุณสมบัติของการยืดของเส้นหมี่ขาวที่ทำจากแป้งสาลี (Kwon *et al.*, 2022) และการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของแป้งดิบที่อยู่ภายในเตาอบจนถึงได้บิสกิตที่สามารถรับประทานได้ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ (Baldino *et al.*, 2014) จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การศึกษาสมรรถนะและจลนพลศาสตร์เครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียวยังคงมีน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียวที่มีการแปรผัน

อุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมร้อน และศึกษาจลพลศาสตร์เครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาจลพลศาสตร์การอบแห้งเส้นหมี่ขาวและสมรรถนะเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว

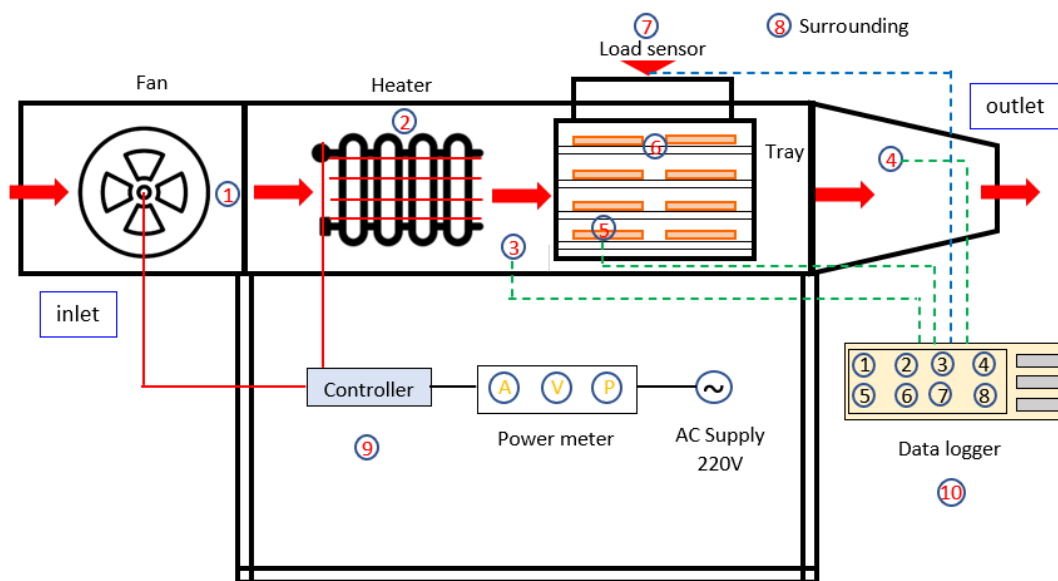
2.2 เพื่อศึกษาสมการอบแห้งชั้นบาง สำหรับการอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบไหลทางเดียว

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว

ภาพที่ 1 แสดงลักษณะเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว ประกอบด้วย ฮีตเตอร์ขนาด 4.3 kW สำหรับเป็นแหล่งพลังงานความร้อนในการอบแห้ง พัดลมขนาด 0.035 kW สำหรับสร้างการไหลของอากาศร้อนโดยวิธีการพาความร้อนและความชื้นออกจากห้องอบ ชั้นวางผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก และชุดควบคุมการทำงานประกอบด้วย เซนเซอร์ตรวจการรับรู้เพาเวอร์มิเตอร์ ชุดปรับความเร็วรอบพัดลม เบรกเกอร์ แมกเนติก และสัญญาณไฟแสดงสถานะการทำงาน

การทำงานของเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว โดยเริ่มต้นจากอากาศที่ใช้ในการอบแห้งภายนอกจะถูกดูดเข้าไปยังเครื่องอบแห้งด้วยพัดลม ผ่านมายังฮีตเตอร์สำหรับเพิ่มอุณหภูมิอากาศดังกล่าว หลังจากนั้นอากาศร้อนก็จะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งเพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์ เมื่อผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนก็จะทำให้น้ำที่อยู่ภายในเนื้อผลิตภัณฑ์เส้นหมี่ขาวระเหยออกมาที่ผิวด้านนอกและความชื้นของน้ำที่ระเหยสามารถออกจากเครื่องอบแห้งซึ่งจะไหลออกจากห้องอบแห้งด้วยพัดลม จากที่กล่าวมาในข้างต้นคือกระบวนการทำงานเครื่องอบแห้งลมร้อนจะเป็นในลักษณะเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ตามที่ต้องการ



ภาพที่ 1 ลักษณะการทำงานของเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว และระบบควบคุม

3.2 วิธีทดลอง

3.2.1 ผลลัพธ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้เส้นหมี่ขาวสำหรับทดลอง ซึ่งมีค่าความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $100 \pm 3\% \text{d.b.}$ โดยเป็นเส้นหมี่ขาวที่มีจำหน่ายในท้องตลาดที่มีการคัดเลือกยี่ห้อเพียงยี่ห้อเดียวสำหรับการทดลองในครั้งนี้ ประกอบกับการคัดเลือกวันเดือนปีที่ผลิตในช่วงเดียวกัน

3.2.2 เงื่อนไขการทดลอง

การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองเพื่อศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียวนั้น ได้มีการควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง 3 ระดับ ประกอบด้วย อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 45 , 50 และ 55°C และความเร็วลมร้อนที่ผ่านห้องอบแห้งเท่ากับ 1.0 , 1.5 และ 2.0 m/s

3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองเริ่มต้นจากการเตรียมเส้นหมี่ขาวและชุดทดลองพร้อมทั้งติดตั้งเครื่องมือวัดแต่ละประเภทดังแสดงในภาพที่ 1 ได้แก่ อุปกรณ์วัดและบันทึกอุณหภูมิ ความเร็วลมร้อน และน้ำหนักผลิตภัณฑ์ ทำการวัดและบันทึกค่าทุก 5 นาที ตลอดระยะเวลาที่เริ่มทำการทดลองจนแล้วเสร็จ และทำการวัดความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ และพัสดุของเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว สำหรับการควบคุมอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าเพื่อให้มีค่าใกล้เคียง

กันมากที่สุดคือ ดำเนินการทดลองในห้องขนาดใหญ่ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องทดลองให้เท่ากันในทุกกรณีที่ได้ทำการทดลอง

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ได้แก่ สัดส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) และสมการอบแห้งชั้นบาง ดังสมการต่อไปนี้

สัดส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ คือ ดัชนีบ่งชี้ปริมาณความชื้นที่แต่ละช่วงเวลาต่อความชื้นเริ่มต้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (1)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (1)$$

เมื่อ MR	คือ	สัดส่วนความชื้น, ไร้มิติ
M_{in}	คือ	ความชื้นเริ่มต้น, %d.b.
M_{eq}	คือ	ความชื้นสมดุล, %d.b.
M_t	คือ	ความชื้นที่แต่ละช่วงเวลา, %d.b.

สำหรับการคำนวณสัดส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ ซึ่งมีสมมติฐาน คือ ค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น ดังนั้นสมการที่ (1) สามารถเขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังสมการที่ (2)

$$MR = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (2)$$

อัตราการอบแห้ง คือ ปัจจัยสำคัญที่แสดงถึงค่าสมรรถนะการอบแห้ง หรือความสามารถในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่อช่วงเวลาอบแห้ง โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (3)

$$DR = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (3)$$

เมื่อ DR	คือ	อัตราการอบแห้ง, kg/h
Δm	คือ	มวลผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลง, kg
Δt	คือ	เวลาที่เปลี่ยนแปลง, h

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คือ ค่าที่แสดงถึงปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ที่อบแห้ง โดยมีความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์ดังสมการที่ (4)

$$SEC = \frac{3.6E}{m_w} \quad (4)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kg evap-water
E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง, kWh
 m_w คือ ปริมาณน้ำระเหย, kg

สำหรับการวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมของด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว สามารถทำได้โดยการนำอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใดๆ ที่ได้จากการทดลองในทั้ง 9 กรณีที่ได้ทำการศึกษานี้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำนาย ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการอบแห้งที่อยู่ในรูปของสมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical model) โดยรูปแบบของสมการพื้นฐานที่ใช้ในการทำนายดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการอบแห้งชั้นบางได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีที่ใช้ในการบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการอบแห้งชั้นบางประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) โดยค่า RMSE สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่

5

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N \left(MR_{prediction,i} - MR_{experiment,i} \right)^2}{N} \right]^{1/2} \quad (5)$$

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด



ตารางที่ 1 รูปแบบสมการอบแห้งชิ้นบาง

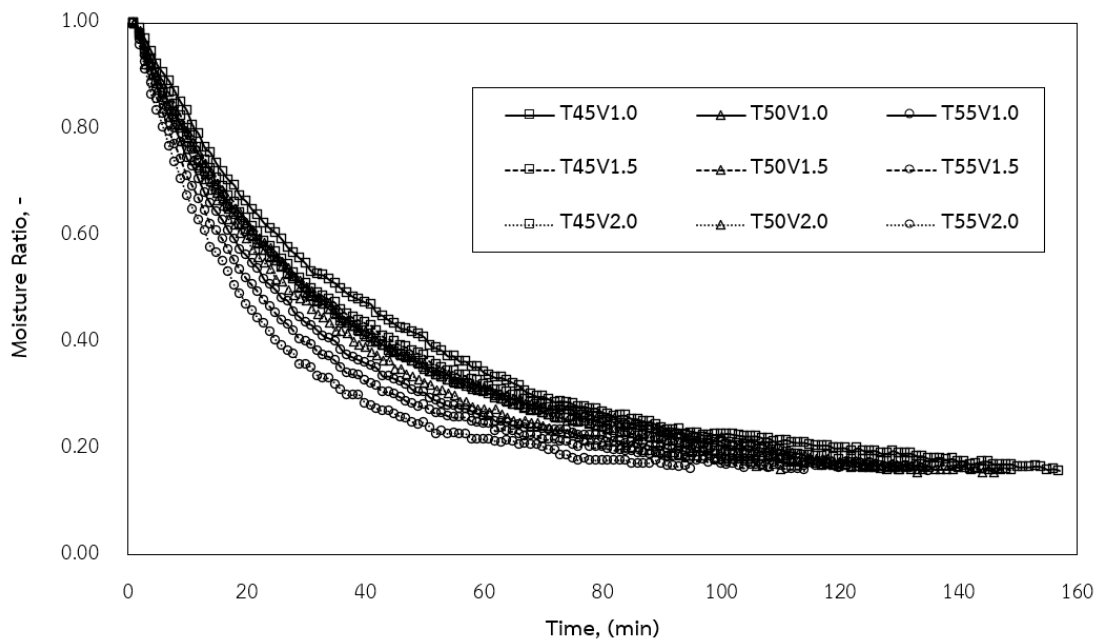
ชื่อสมการ	รูปแบบสมการ	อ้างอิง
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(Westerman <i>et al.</i> , 1973)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(Page, 1949)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(Yagcioglu <i>et al.</i> , 1999)
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	(Yaldiz & Ertekin, 2001)
Two term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	(Rahman <i>et al.</i> , 1998)
Verma <i>et al.</i>	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	(Verma <i>et al.</i> , 2008)
Midilli <i>et al.</i>	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(Midilli <i>et al.</i> , 2002)

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

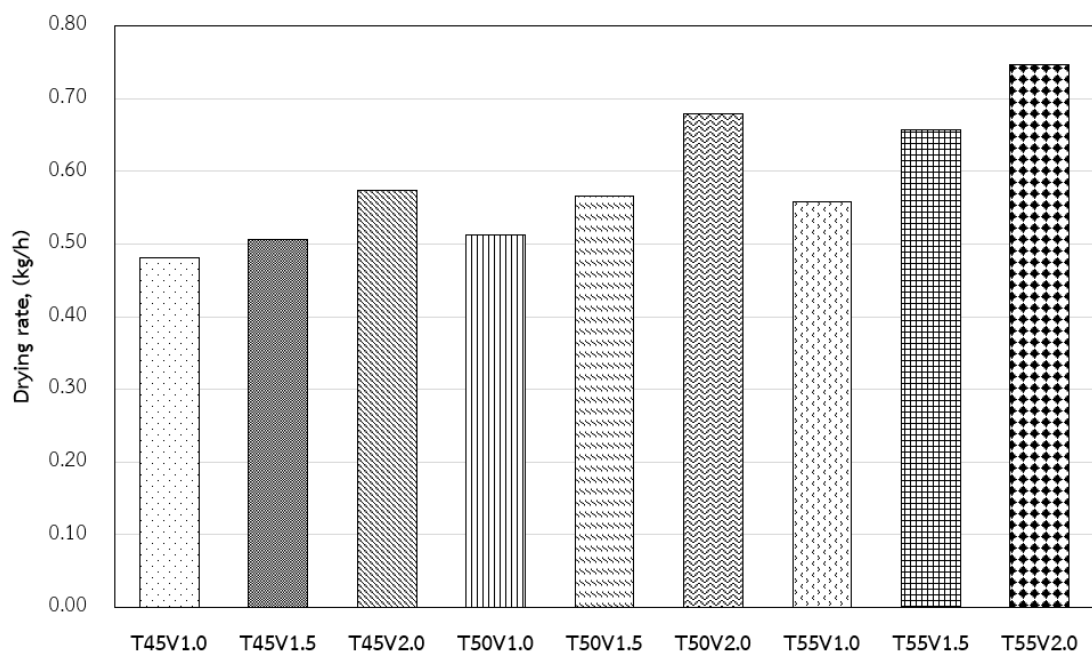
การทดลองอบแห้งเส้นหมี่ขาวโดยใช้เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว ซึ่งทดสอบภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง 45, 50 และ 55 °C และความเร็วลมเท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 m/s ตามลำดับ มีผลการศึกษาดังนี้

4.1 ผลของการทดลองการอบแห้งของผลิตภัณฑ์เส้นหมี่ขาว

ภาพที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นตามเวลาอบแห้งที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากการศึกษาคพบว่า สัดส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงตามเวลา และเมื่อสิ้นสุดการทดลองจะพบว่า กรณีอุณหภูมิอบแห้ง 55 °C และความเร็วลมร้อน 2.0 m/s จะให้ค่าสัดส่วนความชื้นต่ำที่สุดเท่ากับ 0.162 โดยค่าความชื้นเส้นหมี่ขาวสุดท้ายเท่ากับ 15.83 %d.b. จากข้อมูลในกรณีอุณหภูมิอบแห้ง 55 °C และความเร็วลมร้อน 2.0 m/s มีความชื้นสุดท้ายต่ำสุดหรือกล่าวในอีกความหมายคือ กรณีดังกล่าวนี้มีความสามารถในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์มากที่สุดภายในเงื่อนไขเวลาการอบแห้งเท่ากัน นอกจากนั้นยังพบอีกว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 10% จะทำให้สัดส่วนความชื้นลดลง 9.83% และการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมร้อนเฉลี่ย 40% จะทำให้สัดส่วนความชื้นลดลง 6.76% แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อการลดลงของสัดส่วนความชื้นมากกว่าความเร็วลมร้อน เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนของกระบวนการอบแห้งเป็นแบบพาความร้อน กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มมากขึ้นจะเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอบแห้งและอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น เมื่อผลิตภัณฑ์รับความร้อนเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลต่อการระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์เพิ่มมากยิ่งขึ้นจึงส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ส่วนความเร็วลมร้อนจะมีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของลมร้อนไปยังผลิตภัณฑ์ในลักษณะของการพาความร้อนที่ทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอบแห้งจะมีค่าน้อยกว่า



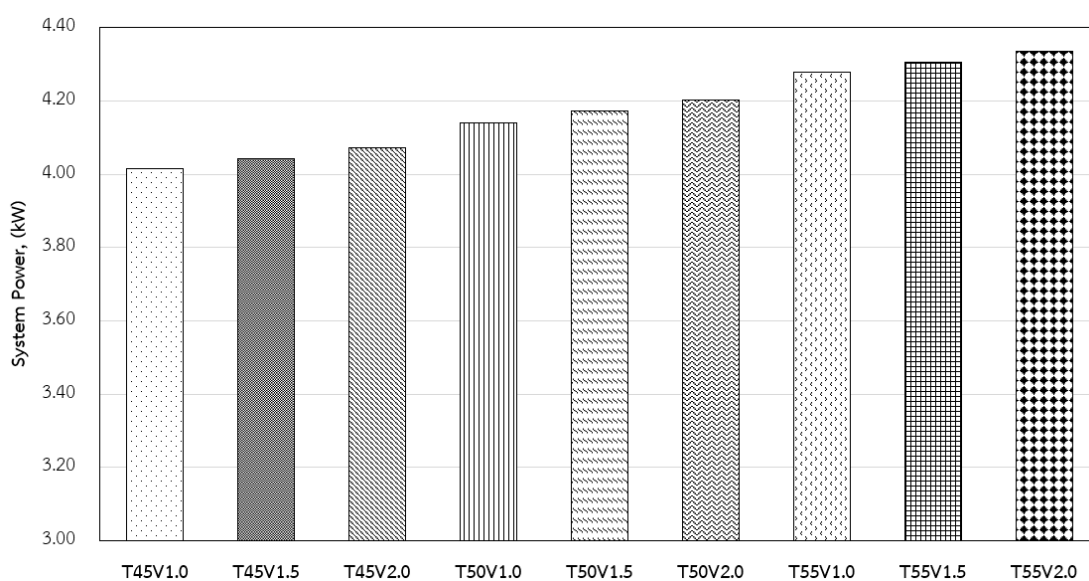
ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นตามเวลาอบแห้งที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง



ภาพที่ 3 อัตราการอบแห้งที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง

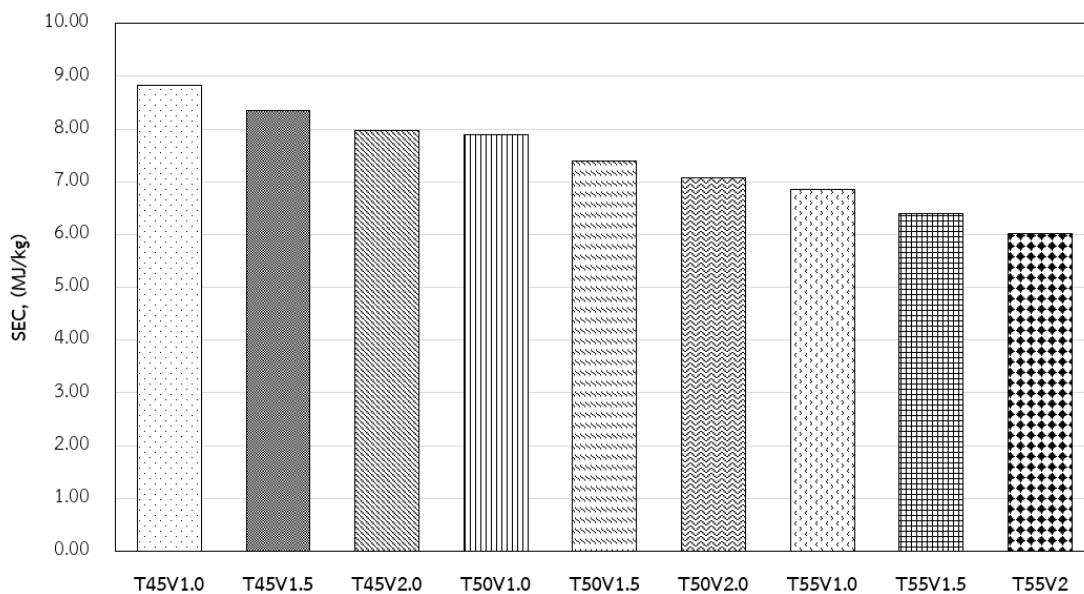
ภาพที่ 3 แสดงอัตราการอบแห้งที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลพบว่า อัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 0.74 kg/h เกิดขึ้นในกรณีของอุณหภูมิอบแห้ง 55 °C และความเร็วลมร้อน 2.0 m/s และอัตราการอบแห้งต่ำที่สุดเท่ากับ 0.48 kg/h ซึ่งพบในกรณีของอุณหภูมิอบแห้ง 45 °C และ

ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s นอกจากนั้นยังพบว่าหากพิจารณาภายใต้เงื่อนไขความเร็วลมร้อนคงที่จะพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้ง 10% จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น 37.98% และในทำนองเดียวกันหากพิจารณาภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งคงที่จะพบว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมร้อน 40% จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น 37.85% จากข้อมูลดังกล่าวสามารถแสดงได้ว่าอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้งผลิตภัณฑ์มากกว่าความเร็วลมร้อน



ภาพที่ 4 กำลังไฟฟ้าเครื่องอบแห้งลมร้อนที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ภาพที่ 4 แสดงกำลังไฟฟ้าเครื่องอบแห้งลมร้อนที่แต่ละเงื่อนไขการทดลองจากข้อมูลดังกล่าวพบว่า กำลังไฟฟ้าเครื่องอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมร้อน โดยพิจารณาในแต่ละปัจจัยประกอบด้วยปัจจัยที่ 1 คือการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งเพิ่มมากขึ้น และปัจจัยที่ 2 คือการเพิ่มความเร็วลมร้อนจะส่งผลทำให้เพิ่มภาระทางความร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้องอบแห้งเช่นเดียวกับการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง เป็นผลทำให้ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน จากข้อมูลข้างต้นจะพบว่า กรณีอุณหภูมิอบแห้ง 55 °C และความเร็วลมร้อน 2.0 m/s จะมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 4.335 kW



ภาพที่ 5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ภาพที่ 5 แสดงความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ผลจากการศึกษาพบว่า กรณีอุณหภูมิอบแห้ง 55°C และความเร็วลมร้อน 2.0 m/s จะมีปริมาณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดเท่ากับ 6.013 MJ/kg และกรณีอุณหภูมิอบแห้ง 45°C และความเร็วลมร้อน 1.0 m/s จะมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 8.833 MJ/kg ซึ่งข้อมูลดังกล่าวตรงกันข้ามกับข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้างแสดงในภาพที่ 4 เนื่องด้วยจากสมการความสัมพันธ์ของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะคืออัตราส่วนของปริมาณพลังงานที่ใช้สำหรับการระเหยน้ำต่อมวลของน้ำที่มีการระเหย ซึ่งหากพิจารณาปริมาณการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทั้งสองส่วนตามสมการจะพบว่า งานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าขึ้นสุดท้ายเท่ากัน ดังนั้นน้ำที่ระเหยออกในทุกกรณีจะเท่ากันสิ่งที่แตกต่างกันคือ พลังงานที่ใช้ไม่เท่ากันเนื่องจากการใช้เวลาที่ต่างกัน นั่นคือหากอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมร้อนสูง จะส่งผลทำให้ปริมาณมวลน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์มาก จากความสัมพันธ์ดังกล่าวกรณีอุณหภูมิอบแห้ง 55°C และความเร็วลมร้อน 2.0 m/s จะส่งผลทำให้ปริมาณมวลน้ำระเหยออกจากผลิตภัณฑ์มากที่สุด จะเป็นผลทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด

4.2 ผลการวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบาง

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับการทำนาย จลนพลศาสตร์การอบแห้งเส้นหมี่ขาว โดยการนำค่าสัดส่วนความชื้นที่ได้ทำการทดลองทั้ง 9 กรณีที่ ศึกษาเปรียบเทียบกับผลการทำนาย ในการนี้เลือกใช้สมการอบแห้งชั้นบางพื้นฐาน เพื่อหา ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการอบแห้งชั้นบางดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการ พิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง และความเร็วของลมร้อน จึงได้กำหนดค่าคงที่ a, b, c, g, k, k_0, k_1 และ n ในสมการพื้นฐานเดิมให้เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอบแห้ง และความเร็วของลมร้อน โดย สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 6

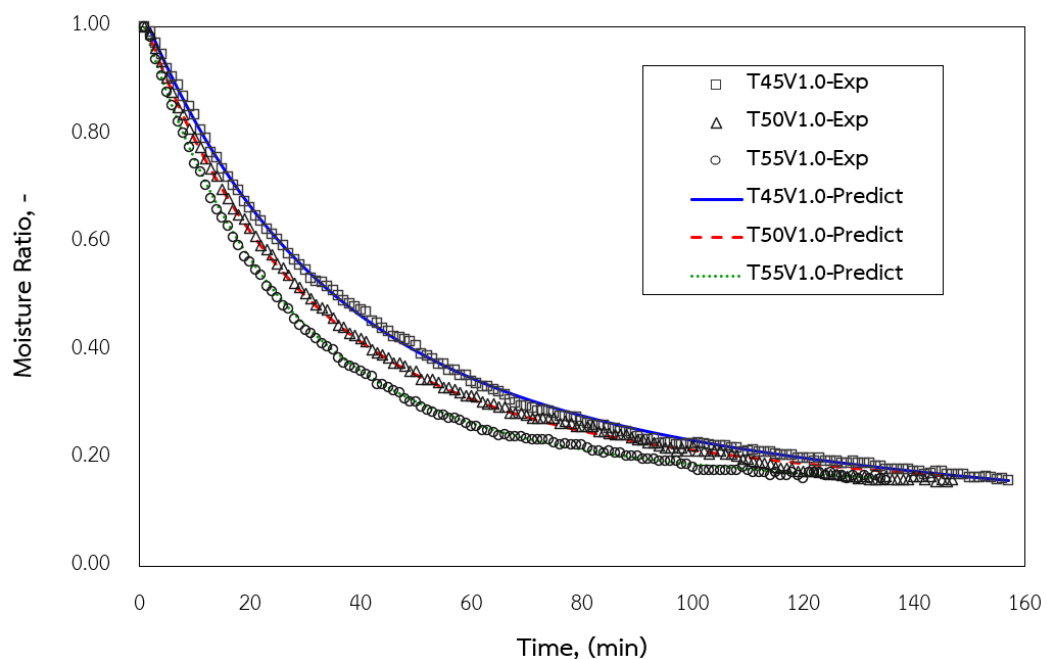
$$K = x_0 + x_1T + x_2V + x_3TV \quad (6)$$

เมื่อ K	คือ	a, b, c, g, k, k_0, k_1 และ n
T	คือ	อุณหภูมิอบแห้ง, °C
V	คือ	ความเร็วลมร้อน, m/s
x_i	คือ	ค่าคงที่ของสมการที่ (6)

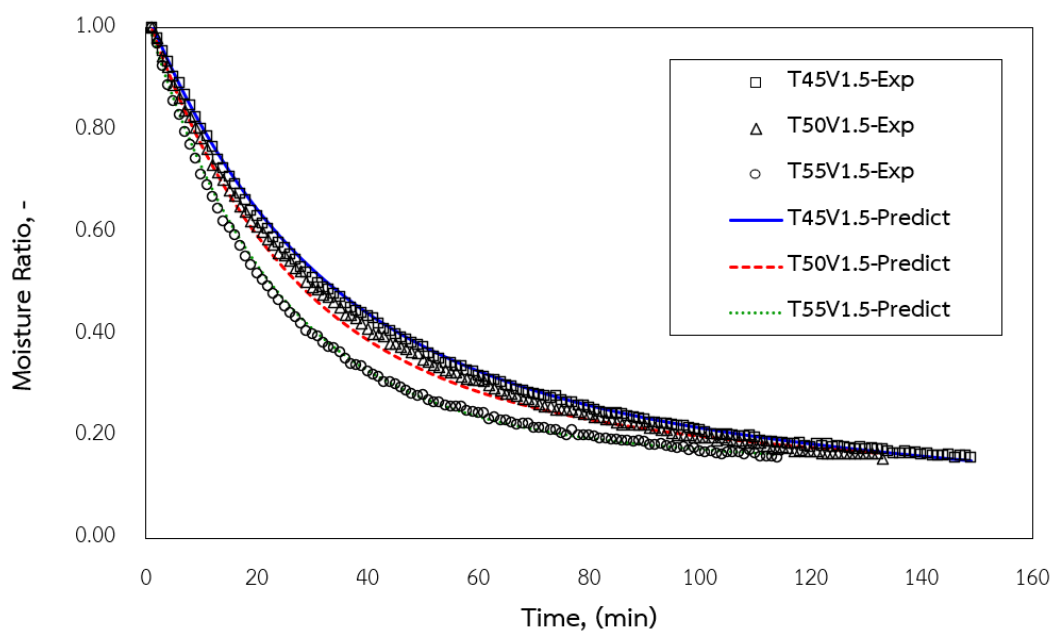
ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบาง ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่า รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ของการวิเคราะห์สมการทั้ง 7 สมการ ผล การศึกษาพบว่า สมการ Two term สามารถทำนายผลการอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.999023944 ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุด และค่า RMSE เท่ากับ 0.008964633 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุด และเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Two term มา เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวมีความสอดคล้องกันเป็น อย่างดี ดังข้อมูลนำเสนอในภาพที่ 6 – 8

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบาง

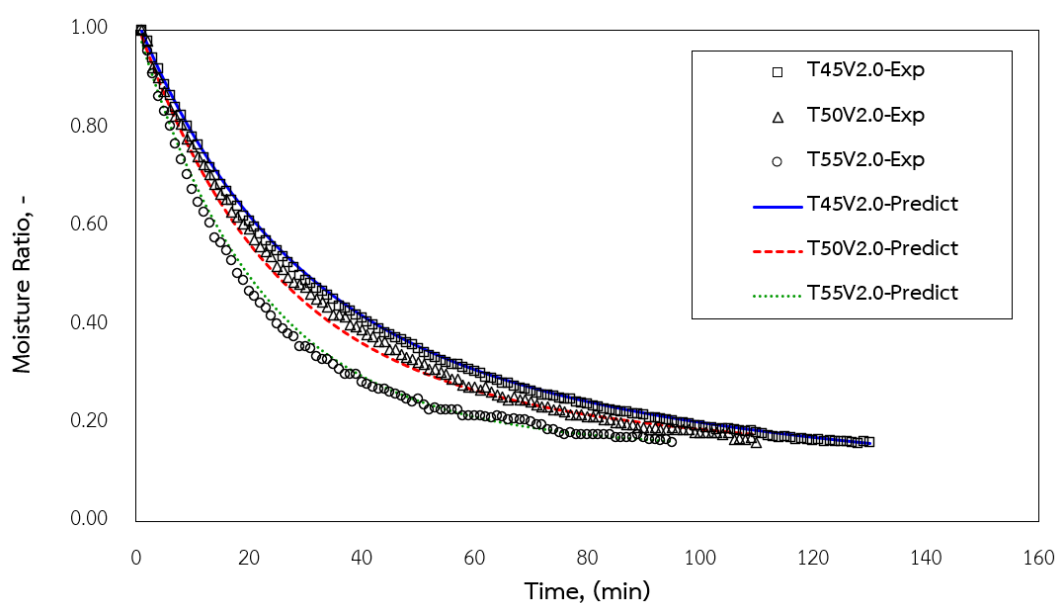
ชื่อสมการ	พารามิเตอร์	X_0	X_1	X_2	X_3	R^2	RMSE
Newton	k	0.004568	0.000194	-0.007297	0.000211	0.934698600	0.072136327
Page	k	-0.055435	0.002092	-0.021247	0.000774	0.985491829	0.035391663
	n	1.050091	-0.006790	-0.045278	0.000348		
Henderson and Pabis	a	1.161851	-0.005547	0.121449	-0.003153	0.958811799	0.057645962
	k	0.006177	0.000130	0.001067	0.000010		
Logarithmic	a	0.946590	-0.001734	0.013439	-0.000363	0.997772756	0.013537642
	k	-0.001678	0.000539	-0.013315	0.000352		
	c	0.162310	0.000136	-0.016586	0.000043		
Two term	a	0.480917	0.004968	-0.275554	0.005713	0.999023944	0.008964633
	k_0	0.003815	0.000573	-0.002088	0.000146		
	b	0.646604	-0.006486	0.249395	-0.005503		
	k_1	0.004925	-0.000018	0.011130	-0.000221		
Verma et al.	a	11.64609	-0.195462	-29.9632	0.543826	0.935547381	0.071681702
	k	0.007343	0.000143	-0.011913	0.000305		
	g	0.012091	0.000037	-0.012498	0.000319		
Midilli et al.	a	1.174544	-0.000933	0.073703	-0.001724	0.998283689	0.012059546
	k	-0.007699	0.001269	0.016340	-0.000116		
	n	0.798370	-0.000911	-0.122449	0.002281		
	b	-0.000262	0.000017	-0.000428	0.000008		



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของสัดส่วนความชื้นกับเวลาระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความเร็วลมร้อน 1.0 m/s



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของสัดส่วนความชื้นกับเวลาระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความเร็วลมร้อน 1.5 m/s



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของสัดส่วนความชื้นกับเวลาระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความเร็วลมร้อน 2.0 m/s

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งเส้นหมี่ขาวและสมรรถนะเครื่องอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนแบบไหลผ่านทางเดียว และศึกษาสมการอบแห้งชั้นบาง สำหรับการอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบไหลทางเดียว ซึ่งในการศึกษานี้ได้เลือกใช้เส้นหมี่ขาวเป็นตัวอย่างในการทดลอง ผลจากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมจะมีผลทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงและอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งมีค่าลดลง นอกจากนั้นยังพบว่า สมการ Two term สามารถทำนายผลการอบแห้งเส้นหมี่ขาวด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.999023944 ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุด และค่า RMSE เท่ากับ 0.008964633 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุด โดยเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Two term มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Arise, A.K., Oriade, K.F., Asogwa, T.N., & Nwachukwu, I. (2022). Amino acid profile, physicochemical and sensory properties of noodles produced from wheat-Bambara protein isolate. **Measurement: Food**, 5, 100020. <https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2021.100020>
- Baldino, N., Gabriele, D., Lupi, F.R., Cindio, B.D., & Cicerelli, L. (2014). Modeling of baking behavior of semi-sweet short dough biscuits. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 25, 40–52.
- Basman, A., & Yalcin, S. (2011). Quick boiling noodle production by using infrared drying. **Journal of Food Engineering**, 106, 245–252.
- Chen, C., & Pan, Z. (2021). Heat and moisture transfer studies on walnuts during hot air drying in a fixed-bed column dryer. **Applied Thermal Engineering**, 199, 117554. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117554>

- Chen, J.Y., Zhang, H., & Miao, Y. (2014). The Effect of Quantity of Salt on the Drying Characteristics of Fresh Noodles. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, 2, 207–211.
- Guo, X.N., Wu, S.H., & Zhu, K.X. (2020). Effect of superheated steam treatment on quality characteristics of whole wheat flour and storage stability of semi-dried whole wheat noodle. **Food Chemistry**, 322, 126738. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126738>
- Huelsz, G., & Rechtman, R. (2013). Heat transfer due to natural convection in an inclined square cavity using the lattice Boltzmann equation method. **International Journal of Thermal Sciences**, 65, 111-119.
- Jeevarathinam, G., Pandiselvam, R., Pandiarajan, T., Preetha, P., Balakrishnan, M., Thirupathi, V., & Kothakota, A. (2021). Infrared assisted hot air dryer for turmeric slices: Effect on drying rate and quality parameters. **LWT - Food Science and Technology**, 144, 111258. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111258>
- Kwon, H., Yang, G., Jeong, S., Roh, J., & Lee, S. (2022). Establishment of machine learning hyperparameters for predicting the extensional properties of noodles from the thermo-mechanical properties of wheat flour. **Journal of Food Engineering**, 321, 110940. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.110940>
- Liu, D., Song, S., Tao, L., Yu, L., & Wang, J. (2022). Effects of common buckwheat bran on wheat dough properties and noodle quality compared with common buckwheat hull. **LWT - Food Science and Technology**, 155, 112971. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112971>
- Oh, I., & Lee, S. (2020). Rheological, microstructural, and tomographical studies on the rehydration improvement of hot air-dried noodles with oleogel. **Journal of Food Engineering**, 268, 109750. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109750>
- Song, X., Zhu, W., Pei, Y., Ai, Z., & Chen, J. (2013). Effects of wheat bran with different colors on the qualities of dry noodles. **Journal of Cereal Science**, 58, 400-407.
- Wang, Z., Zhang, Y., Zhang, B., Yang, F., Yu, X., Zhao, B., & Wei, Y. (2017). Analysis on energy consumption of drying process for dried Chinese noodles. **Applied Thermal Engineering**, 110, 941–948.

- Weng, Z. J., Wang, B. J., & Weng, Y. M. (2022). Preparation of white salted noodles using rice flour as the principal ingredient and the effects of transglutaminase on noodle qualities. **Food Bioscience**, 33, 100501. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2019.100501>
- Xu, M., Wud, Y., Hou, G. G., & Du, X. (2019). Evaluation of different tea extracts on dough, textural, and functional properties of dry Chinese white salted noodle. **LWT - Food Science and Technology**, 101, 456–462.
- Yu, X., Wang, Z., Zhang, Y., Wadood, S. A., & Wei, Y. (2018) Study on the water state and distribution of Chinese dried noodles during the drying process. **Journal of Food Engineering**, 233, 81-87.
- Zeng, S., Wang, B., Lv, W., Wang, L., & Liao, X. (2022). Dynamic analysis of moisture, dielectric property and microstructure of ginger slices during microwave hot-air flow rolling drying. **Food Control**, 134, 108717. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108717>

THERMAL PERFORMANCE MODELING OF A SOLAR WATER HEATING SYSTEM INTEGRATED WITH PHASE CHANGE MATERIAL IN A FISH POND

Somchai Jiajitsawat

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

Corresponding author e-mail: somchai.jia@gmail.com

Submitted: 4 October 2022

Revision received: 26 December 2022

Accepted: 26 December 2022

Abstract

In this research work, a transient model of solar water heating system integrated with a phase change material (SWHS-PCM) is proposed to study the effect of solar collector area, the mixed capacities of water and PCM and heat exchanger effectiveness of the SWHS-PCM for heating the fish pond during winter. The simulated results showed that the fishpond with SWHS integrated PCM-Type1 can maintain the water temperature between 28 and 30 °C. The optimum parameters to provide the fish pond temperature between 28 and 30 °C are 1.77 m² of the solar collector area, water and 0.4 and 0.007 m³ of water and PCM-Type1 capacities and 0.5 of the heat exchanger effectiveness. Moreover, it was found that PCM-Type1 heated the fish pond in form of sensible heat. However, with PCM-Type2, the studies revealed that 1.77 m² of the solar collector area with water and PCM-Type2 capacities of 0.4 and 0.2 m³ and the heat exchanger effectiveness of 0.8 gave the maximum temperature of the pond. It was observed that PCM-Type2 heated the pond in form of latent heat.

Keywords: Solar hot water system, Fish farming, Phase change material

1. Introduction

Currently, aquaculture of plants and animals is becoming popular, especially, freshwater fish farming (Gabriel *et al.*, 2013). Thailand is one of freshwater fish producing countries where the fishes are nurtured in warm water. In northern part of Thailand or highland, the weather is generally cold during winter or rainy season. The coldness causes the discontinuous growth or death of the fish due to its less eating.

The water temperature of fish pond between 28 and 30 °C is an important factor to assist its growth (Korawat, 2010).

In Thailand, there are various potential renewable energy sources in usage such as biomass energy, wind energy as well as solar energy. Particularly, solar energy is one of renewable energy sources having high potentiality, large amount, and no environmental pollution. A yearly average value of total solar radiation for Thailand is approximately 18 MJ/m²-day, which can be used to produce electricity and heat (Department of alternative energy development and efficiency, 1999). There have been some studies on employing solar radiation for heating fish pond. Dilip (2007) proposed a greenhouse for heating a fish pond during extreme winter. A mathematical model was used for system analysis. The results from simulation showed that the fish pond with greenhouse system could provide the favorable water temperature from 16 to 35 °C against 5 to 15 °C temperature of ambient air from prawn fish farm during winter season. Tribeni *et al.* (2006) developed a mathematical model to predict fish pond temperature during India winter. In this research, greenhouse integrated with solar water heating to warm fish pond. The results showed that when the greenhouse and the greenhouse integrated with solar water heating could warm up the fish pond, with increasing of fish pond temperature between 3.12 and 5.64 °C and between 4.13 and 6.92 °C, respectively. Korawat (2010) experimentally studied a solar hot water system with assisted heat pump to warm a fish pond. It was found that the system could maintain the temperature of 30 °C in cold weather. Gabriel *et al.* (2013) proposed 3 different system designs of heating fish pond by using phase change materials (PCM). The first design is a system using PCM to store heat from solar collector through external heat exchanger. The second one is the PCM mounted at the bottom of a fish pond to store heat from the sun. The final is a PCM tank storing the heat from sea and transferring to a fish pond. In this research work, a mathematical model was developed for each design in order to predict their thermal performance. The results from simulation were found that using PCM with solar collector for heating the fish pond provided a positive impact. Somchai *et al.* (2021) developed and experimentally tested a solar water heating system (SWHS) integrated with PCM for heating the fish

pond. The system could heat up and control pond water temperature between 28-30 °C.

2. Research Objectives

In this work, the objectives are to propose mathematical model of the developed system by Somchai *et al.* (2021) and then analyze the effect of SWHS with PCM on heating the fish pond based on collector area, water and PCM capacities in a solar hot water tank, and heat exchanger effectiveness.

3. Research Methodology

3.1 System Description

Solar water heating system (SWHS) with natural circulation or thermosiphon system is proposed to heat a fishpond (Somchai *et al.*, 2021). A commercial SHWS (Figure 1) used in this research work consists of flat plate collector with a transparent glazing cover, an absorber-exchanger painted in black color and insulated cylindrical water tank called “Solar Hot Water Tank-(SHWT)”. The SHWT was modified by installing PCM cylindrical container, copper tube heat exchanger, and electrical heater with embedded thermostat inside of the SHWT as shown in Figure 2. The PCM in this study was chosen according to the water temperature stored in a domestic hot-water SWHS around 60 °C and its availability in market. The characteristics of the studied system are presented in Table 1.

For system operation, during daytime, the water inside of the collector is heated by solar radiation. Its density is lighter than the water inside of the SHWT. Thus, it flows up from the collector to the SHWT. The accumulated heat in the tank is transferred to fishpond through heat exchanger by a pump. During the nighttime, the heat in the tank is transferred to the fishpond through the heat exchanger.

3.2 MATHEMATICAL MODELING OF THE SYSTEM

In this modeling, temperatures of water in both fish pond (T_p) and SHWT (T_{st}) integrated with phase change material (PCM), respectively, are assumed to be homogenous, so that their temperature gradient is neglected.

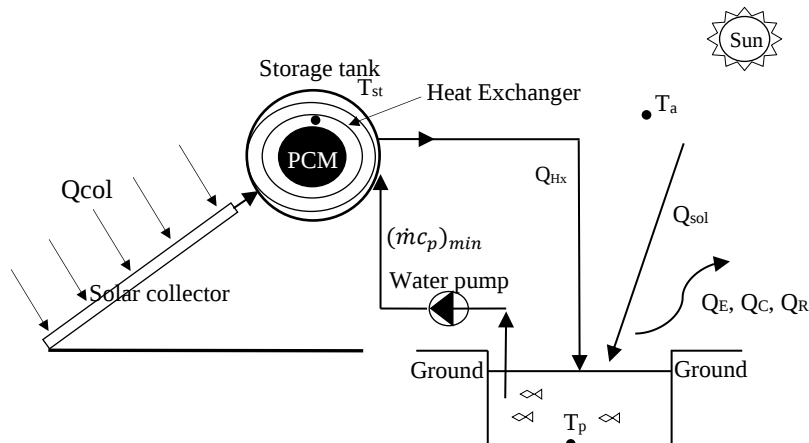


Figure 1 Flat plate SWHS with natural circulation for heating a fish pond

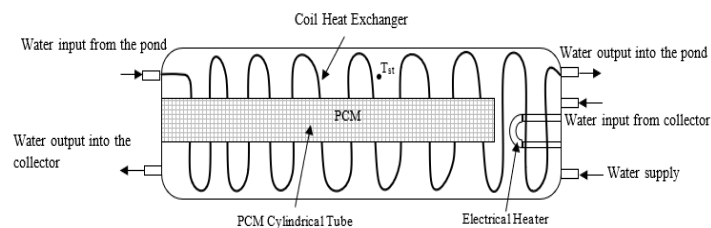


Figure 2 Heat exchanger in solar hot water tank (SHWT)

3.2.1 Fish Pond

From energy balance of the studied system as shown in Figure 1, the water temperature in a fish pond can be calculated as the following equation:

$$V_p(\rho c)_w \frac{dT_p}{dt} = Q_{sol} + Q_{Hx} - Q_E - Q_C - Q_R \quad (1)$$

where $V_p(\rho c)_w$ is the product of volume, density, and specific heat of water in the pond, respectively. Q_{sol} , Q_{Hx} are the heat gain into the pond by mean of solar radiation and heat exchanged between SHWT and the pond, respectively. Q_E, Q_C, Q_R are the heat losses from the pond by means of evaporative, convective, radiation heat losses, respectively.

Table 1. Parameters for simulation

Parameters	Values
Solar hot water system (SHWS)	
Collector area (A_C , m ²)	1.77 (Somchai <i>et al.</i> , 2021), 4, 6, 8
Water capacity in tank (V_w , m ³)	0.2 (Somchai <i>et al.</i> , 2021), 0.4, 0.6, 0.8, 1
Collector heat loss coefficient, ($F_R U_L$, W/m ² K)	8.4 (Somchai <i>et al.</i> , 2021)
Collector transmission and absorption coefficient ($F_R(\tau\alpha)$)	0.66 (Somchai <i>et al.</i> , 2021)
Overall heat transfer coefficient of tank (UA, W/K)	4.25 (Somchai <i>et al.</i> , 2021)
Heat exchanger	
Effectiveness of Heat Exchanger (ϵ_{Hx})	0.9 (Somchai <i>et al.</i> , 2021)
Mass flow rate ($\dot{m}$, kg/s)	0.02 (Somchai <i>et al.</i> , 2021)
Specific heat capacity of water, (c_p , J/kg K)	4,180
Density of water, (ρ , kg/m ³)	1,000
Phase change material storage (PCM)	
Specific heat capacity in solid phase ($c(s)_{p_pcm}$, J/kg K)	Type1:2900 (Murat & Khamid, 2007), Type2:3000 (Al-Hamadani & Shukla, 2011)
Specific heat capacity in liquid phase ($c(l)_{p_pcm}$, J/kg K)	Type1 and 2: 2100 (Murat & Khamid, 2007; Al-Hamadani & Shukla, 2011)
Density in solid phase ($\rho(s)$, kg/m ³)	Type1:830 (Murat & Khamid, 2007), Type2:1007 (Al-Hamadani & Shukla, 2011)
Density in liquid phase ($\rho(l)$, kg/m ³)	Type1:770 (Murat & Khamid, 2007), Type2:862 (Al-Hamadani & Shukla, 2011)
Latent heat of fusion (L_f , kJ/kg)	Type1:266 (Murat & Khamid, 2007), Type2:180 (Al-Hamadani & Shukla, 2011)
PCM capacity in storage (V_{pcm} , m ³)	0.0007 (Somchai <i>et al.</i> , 2021), 0.1, 0.2, 0.3
Melting temperature (T_m , C ^o)	Type1:52-54 (Murat & Khamid, 2007), Type2:40-43 (Al-Hamadani & Shukla, 2011)
Fish pond	
Diameter (m)	1.6 (Somchai <i>et al.</i> , 2021)
Water depth (m)	0.36 (Somchai <i>et al.</i> , 2021)
Volume of fish pond (m ³)	0.724 (Somchai <i>et al.</i> , 2021)
Wind velocity (m/s)	0.5



A heat grain by direct and diffuse solar radiation incident to the water in the pond can be calculated as

$$Q_{sol} = \alpha I A_p \quad (2)$$

where α is the effective absorptance of solar radiation, I is the total solar irradiance, and A_p is the water surface area of the pond.

Another heat grain into the pond by heat exchange between SHWT and the pond can be calculated by means of

$$Q_{Hx} = \varepsilon_{Hx} (\dot{m} c_p)_{min} (T_{st} - T_p) \quad (3)$$

where ε_{Hx} is effectiveness of heat exchanger between SHWT and the pond, $(\dot{m} c_p)_{min}$ is heat capacity of cold water.

Heat losses from evaporation, convection, and radiation of water surface of the pond are shown as the following equations (7), respectively.

$$Q_E = 16.273 \times 10^{-3} h_c \times A_p [P(T_p) - \gamma_a P(T_a)] / (T_p - T_a) \quad (4)$$

$$Q_C = h_c \times A_p (T_p - T_a) \quad (5)$$

$$Q_R = \sigma \varepsilon A_p [(T_p + 273)^2 + (T_a + 273)^2] (T_p - T_a + 546) \quad (6)$$

Where $h_c = 2.8 \times 3.0v$, is convective heat transfer coefficient (W/m^2K), $P = \exp[25.317 - 5144/(T + 273.15)]$, is partial pressure (N/m^2), γ_a is relative humidity (%), T_a is the ambient temperature ($^{\circ}C$), σ is Stefan-Boltzmann constant ($W/m^2 K^4$), ε is the emissivity of water in fish pond.

3.2.2 Integrated PCM-Solar hot water tank (PCM-SHWT)

In this tank, the water and PCM are mixed as one equivalent lump. The water temperature in PCM-SHWT can be derived from energy balance as:



$$((\rho V)_{eq} c_{p-w}) \frac{dT_{st}}{dt} = Q_{Col} - Q_{Hx} - Q_{loss} \quad (7)$$

Where Q_{Col} is the heat gain into the SHWS by mean of heat absorbed by solar collector, Q_{loss} is the heat losses from the tank to the ambient air. $(\rho V)_{eq}$ and c_{p-w} are the product of density and volume of the mixed and the specific heat capacity of water, respectively. They were expressed in (Abdulhaiy, 2004).

$$(\rho V)_{eq} = [(\rho V)_w c_{p-w} + (\rho(s)V)_{pcm} c(s)_{p-pcm}] / c_{p-w} \quad \text{For } T_{st} < T_m \quad (8)$$

$$(\rho V)_{eq} = [(\rho V)_w c_{p-w} + ((\rho(l) + \rho(s)/2)V)_{pcm} L_f] / c_{p-w} \quad \text{For } T_{st} = T_m + \delta \quad (9)$$

$$(\rho V)_{eq} = [(\rho V)_w c_{p-w} + (\rho(l)V)_{pcm} c(l)_{p-pcm}] / c_{p-w} \quad \text{For } T_{st} > T_m \quad (10)$$

Where L_f is latent heat of fusion, c_{p-w} , $c(s)_{p-pcm}$, $c(l)_{p-pcm}$ are specific heat capacity of water, phase changer material in solid and liquid states, respectively. The heat received by collector is estimated by the following equation:

$$Q_{Col} = A_c [F_R (\tau \alpha) I_T - F_R U_L (T_{st} - T_a)] \quad (11)$$

Where A_c is area of the collectors connected in parallel, F_R is the collector heat-removal factor, τ , α are the transmission coefficient of glazing and absorption coefficient of plate, respectively. I_T is the solar radiation on tilted surface, U_L is the collector overall heat loss coefficient.

The heat loss of solar water storage is estimated as:

$$Q_{loss} = UA(T_{st} - T_a) \quad (12)$$

where UA is the overall heat loss coefficient of SHWT.

3.2.4. SYSTEM SIMULATION

SHWS integrated with PCMs to heat the water in a fish pond was mathematically modeled. The weather data as solar radiation, ambient temperature,

and relative humidity, recorded during winter season on cloudy day (Somchai *et al.*, 2021), was used in this simulation as shown in Figure 3 and 4.

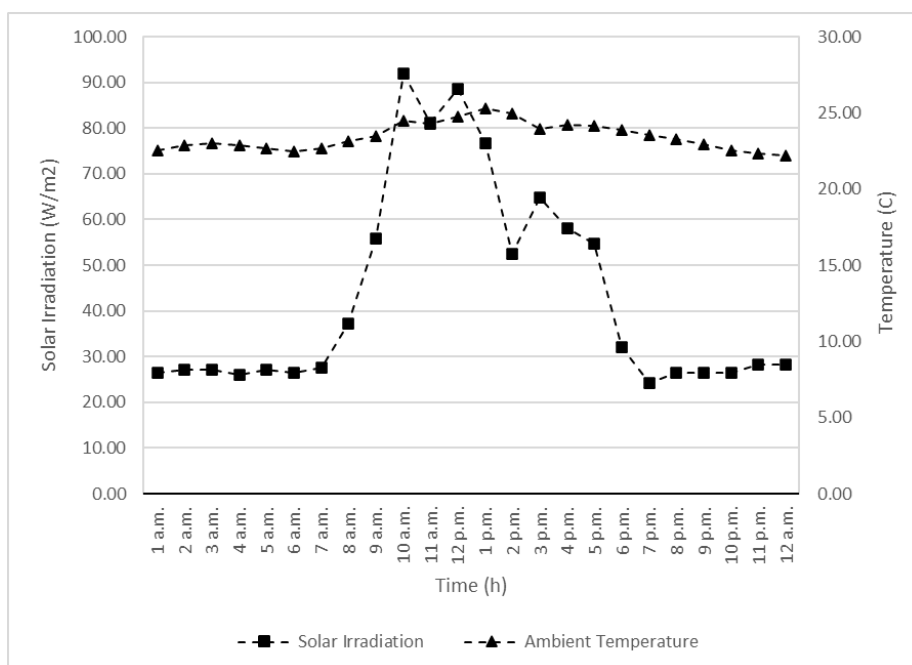


Figure 3 Solar radiation and ambient temperature on a cloudy day in winter season (Somchai *et al.*, 2021)

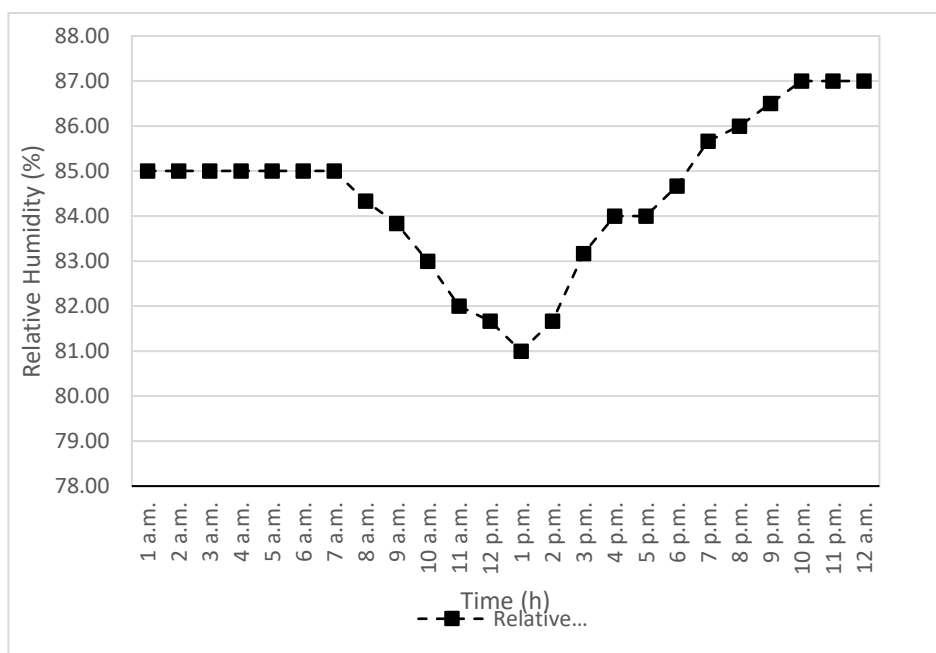


Figure 4 Relative humidity on a cloudy day in winter season (Somchai *et al.*, 2021)

Several computer simulations were conducted to study the various parameters of solar water heating integrated with PCMs that effect on the water temperature in fish pond. The parameters to be optimized are provided in Table 2. For optimizing the parameters, a single parameter was changed, while other parameters were kept constant. They also were optimized in view of water mixed with PCM temperature in the SHWT and water temperature in fish pond

Table 2. Parameters under study

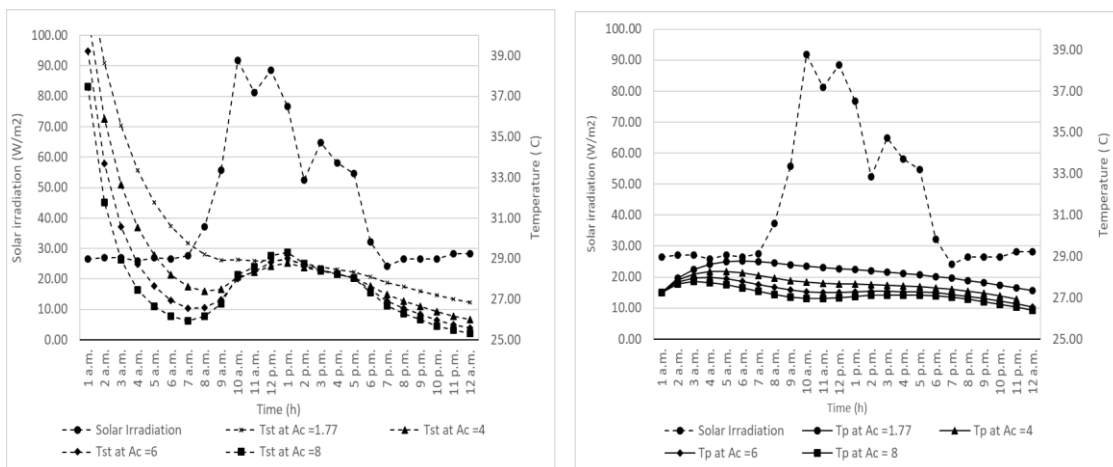
Optimized parameters	Parameter range			
	Collector area (m ²)	Water tank capacity (m ³)	PCM storage capacity (m ³)	Effective of heat exchanger
Collector area (m ²)	1.77, 4, 6, 8	0.2	0.0007	0.5
Water tank capacity (m ³)	1.77	0.2, 0.4, 0.6, 0.8	0.0007	0.5
PCM storage capacity (m ³)	1.77	0.4	0.0007, 0.1, 0.2, 0.3	0.5
Effective of heat exchanger	1.77	0.4	0.007 (Sensible heat effect) 0.2 (Latent heat effect)	0.5, 0.6, 0.7, 0.8

4. Results

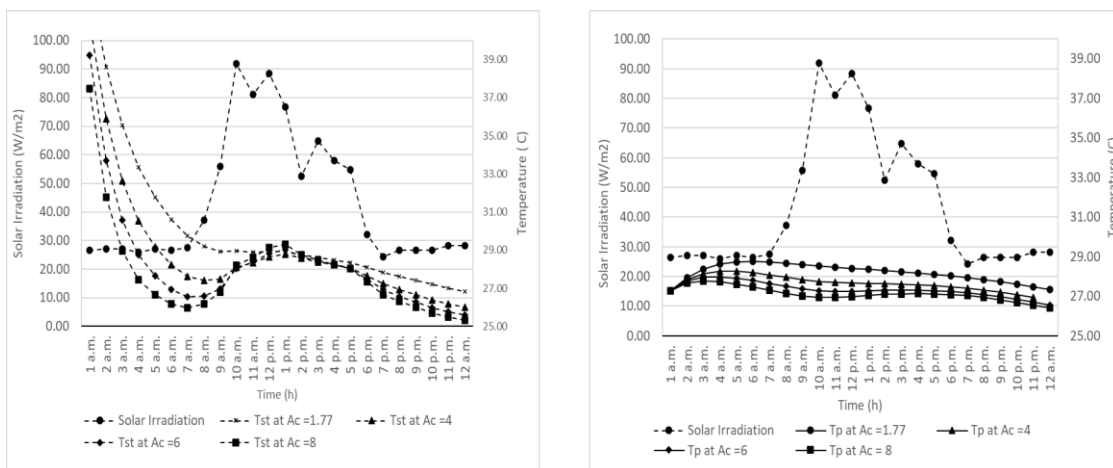
4.1 Effect of collector area on water temperature in fish pond and SHWT

In this simulation, the collector area was varied between 1.77 and 8 m², while the other parameters were kept constant. The effect of collector area on water temperature in a fish pond and SHWT integrated with two different melting point PCMs is shown in Figure 5. Increase of collector area not only causes the water temperature in the SHWT decreased during night time due to more collector heat loss but also increased during day time due to more heat gain from solar radiation. However, while increasing the collector area, the water temperature in fish pond slightly decreases. 1.77 m² of collector area should be an optimum area to provide the water temperature in the fish pond between 28 – 30 °C required (Somchai *et al.*, 2021). There is no

temperature difference in the SHWT and fish pond between two types of PCM shown in Figure 5a and 5b.



a) PCM-Type1



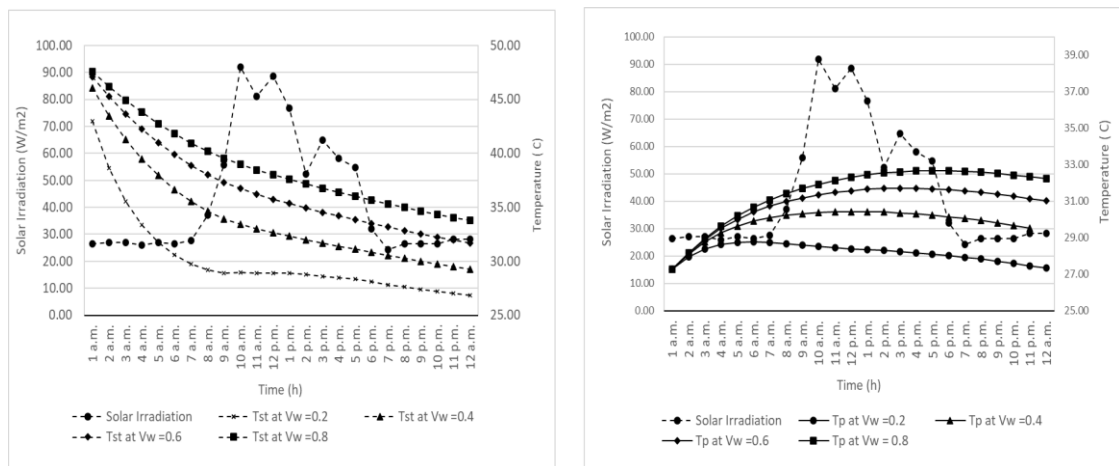
b) PCM-Type2

Figure 5 Effect of collector area on water temperature in fish pond (Tp) and SHWT (Tst): a) with PCM-Type1 and b) with PCM-Type2

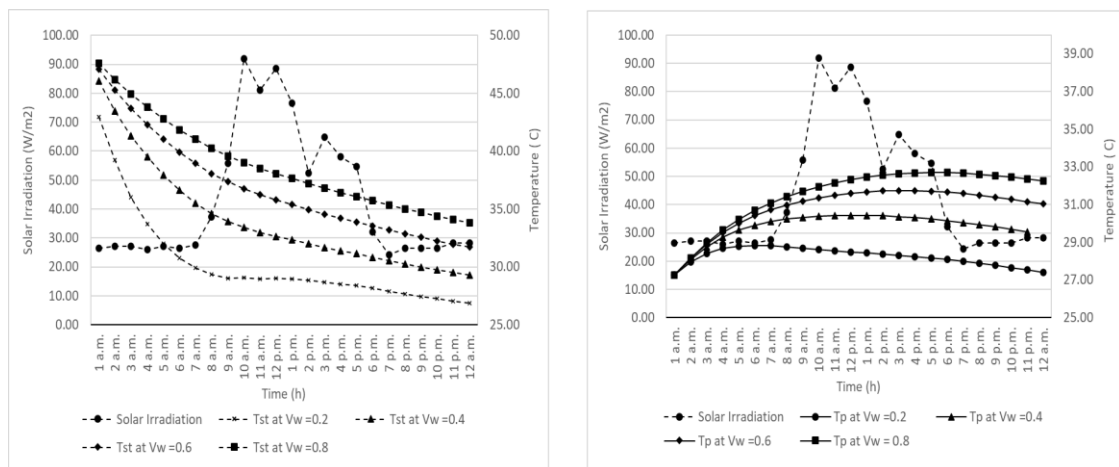
4.2 Effect of water capacity of SHWT on water temperature in fish pond and SHWT

To study the effect of water capacity of SHWT on water temperature in the pond and the SHWT, the water capacity was varied between 0.2 and 0.8 m³ at 0.2 m³ increment and results are shown in Figure 6. With increasing of the water capacity, the water temperature in both the SHWT and the fish pond increases due to initially

accumulated thermal energy. The water capacity of 0.4 m^3 is an optimum parameter to provide the water temperature in the pond between $28 - 30^\circ\text{C}$. There is no temperature difference between two types of PCM as shown in Figure 6a and 6b.



a) PCM-Type1



b) PCM-Type2

Figure 6 Effect of water capacity in the SHWT on the water temperature in fish pond (Tp) and SHWT (Tst): a) with PCM-Type1 and b) with PCM-Type2

4.3 Effect of PCM capacity on water temperature in the fish pond and the SHWT

In this section, the objective is to study the effect of 2 type-PCM capacity on the water temperature in the pond and the SHWT. Each type of PCM has different

melting points of 52-54 °C and 40 – 43 °C, respectively. Their capacity was varied between 0.0007 and 0.3 m³. The simulated results were shown in Figure 7. In Figure 7a, it was found that increase of type-1 PCM slightly rises the water temperature in both of the fish pond and the SHWT due to initially sensible heat accumulated. In addition to that, 0.007 m³ of the PCM is optimum to provide the water temperature in the pond within 28 -30 °C. Whereas, with type-2 PCM, the water temperature in the SHWT is not only maintained between 40 – 43 °C due to latent heat of fusion (Constant temperature) but also provided the maximum water temperature in the fish pond as shown in Figure 7b. In this case, 0.2 m³ of the PCM was chosen as an optimum parameter to present the latent heat effect on the SHWT temperature.

4.4 Effect of effective heat exchanger on water temperature in fish pond and SHWT

In this simulation, the effectiveness of heat exchanger was varied between 0.5 and 0.8. The results were shown in Figure 8. In Figure 8a, it was observed that the water temperature in the SHWT integrated with PCM-Type1 decreases with increase of heat exchanger effectiveness, which results in more heat transferred from SHWT to the fish pond. 0.5 of the effectiveness provided the optimum temperature of the fish pond. The same results are applicable with PCM-Type2 except for the heat exchanger effectiveness of 0.5 and 0.8 maintaining the SHWT temperature constant as shown in Figure 8b. However, 0.8 of the heat exchanger effectiveness provides the maximum temperature in the pond.

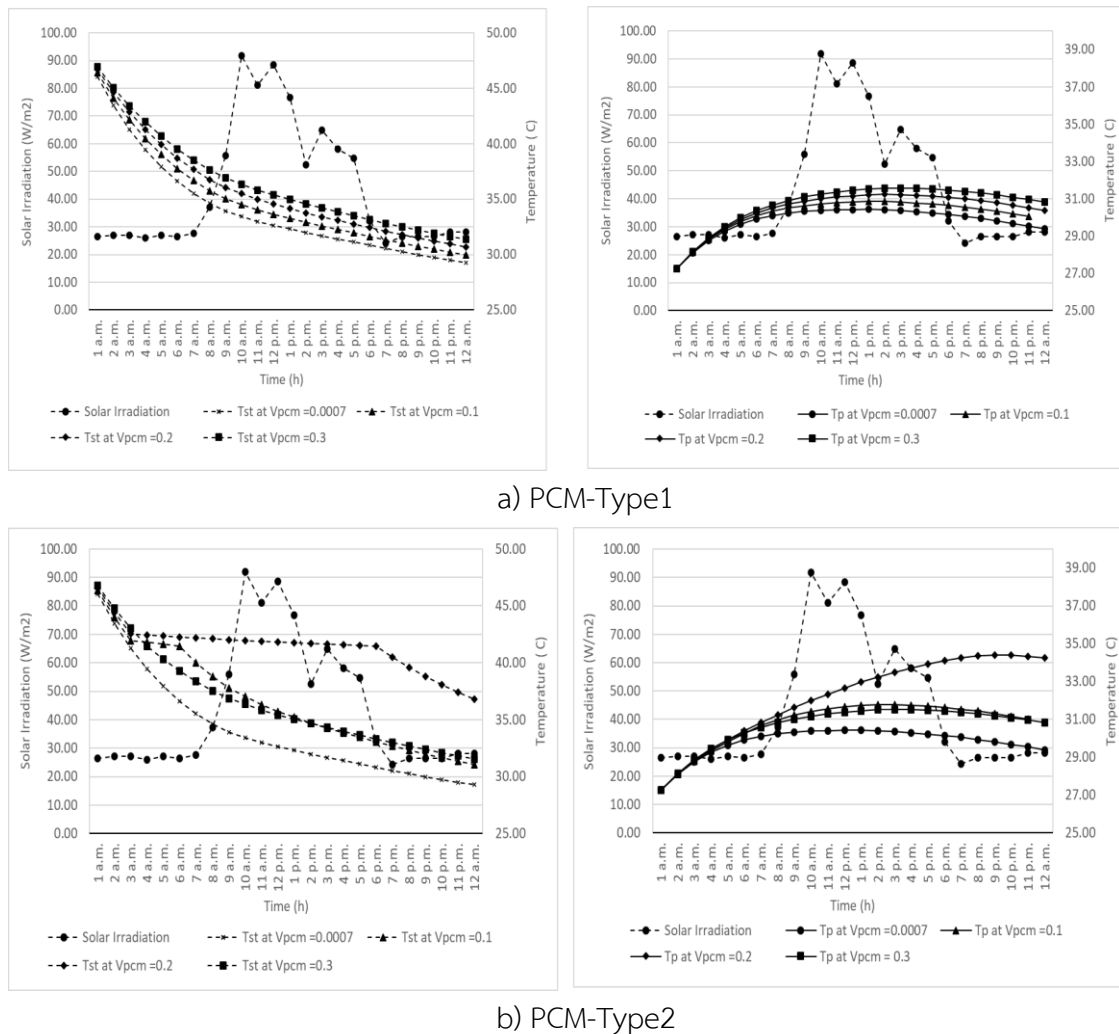
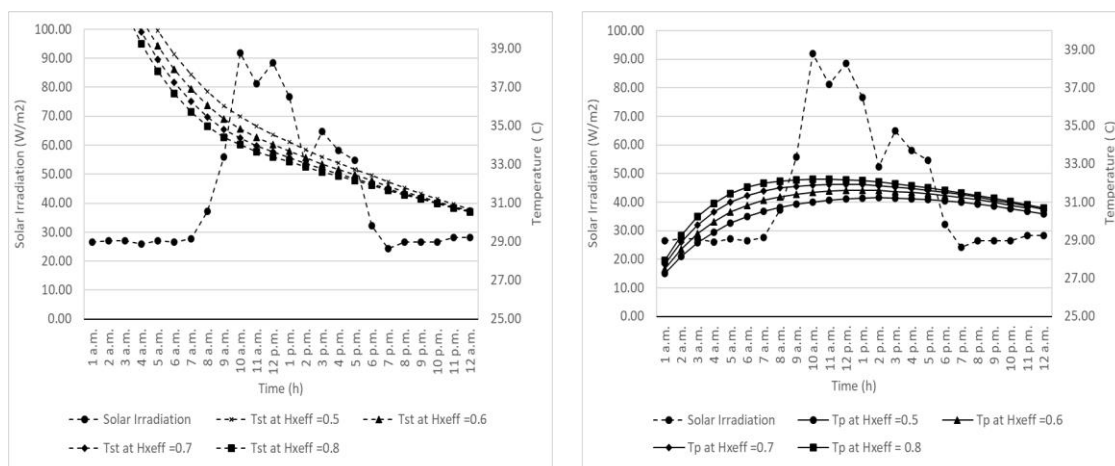
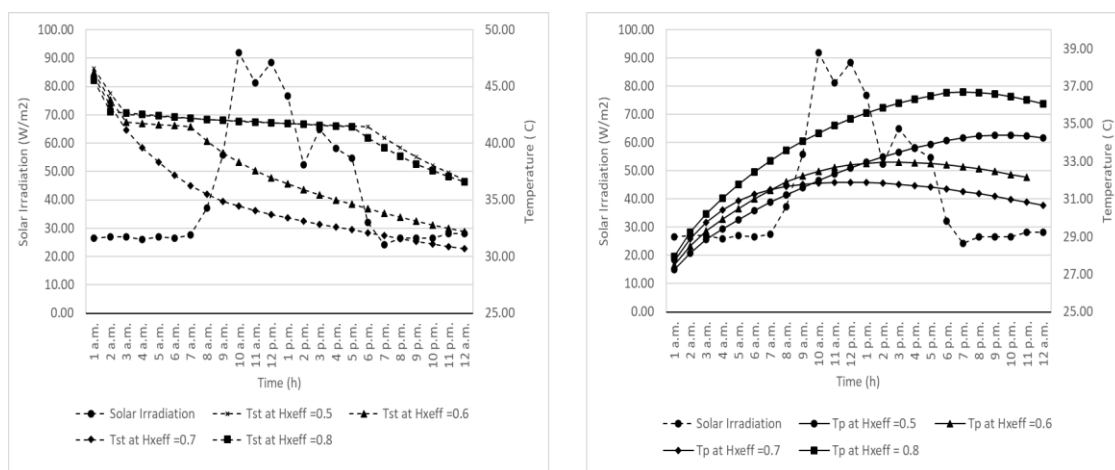


Figure 7 Effect of PCM storage capacity in the tank on water temperature in fish pond (Tp) and SHWT (Tst): a) with PCM-Type1 and b) with PCM-Type2



a) PCM-Type 1

(Murat & Khamid, 2007)



b) PCM-Type 2

(Al-Hamadani & Shukla, 2011)

Figure 8 Effect of effective heat exchanger in the tank on water temperature in fish pond (Tp) and storage tank (Tst): a) with PCM (Murat & Khamid, 2007) and b) with PCM (Al-Hamadani & Shukla, 2011)

5. Conclusion and Discussion

In this work, the objectives are to propose mathematical model of the developed system by Somchai *et al.* (2021) and then analyze the effect of SWHS with PCM on heating the fish pond based on collector area, water and PCM capacities in a SHWT, and heat exchanger effectiveness. The results showed that the fishpond with SWHS integrated PCM-Type1 can maintain the water temperature between 28 and 30

°C during winter season. The parametric studies showed that 1.77 m² of the solar collector area with water and PCM-Type1 capacities of 0.4 and 0.007 m³ and the heat exchanger effectiveness of 0.5 can provide the optimum water temperature for the fish pond. Moreover, it was found that PCM-Type1 heated the fish pond in form of sensible heat. This is because the solar radiation is not enough to heat the Type1 into its melting point. However, with PCM-Type2, the studies revealed that 1.77 m² of the solar collector area with water and PCM-Type2 capacities of 0.4 and 0.2 m³ and the heat exchanger effectiveness of 0.8 gave the maximum temperature of the pond. It was observed that PCM-Type2 heated the pond in form of latent heat.

6. Acknowledgement

The author would like to thank Naresuan University for facilities in this study. The 2017 research grant support from National Research Council of Thailand are highly appreciated.

7. References

- Abdulhaiy, M.R. (2004). Transient performance of a stepped solar still with built-in latent heat thermal energy storage. **Journal of Desalination**, 171, 61-76.
- Al-Hamadani, A.A.F. & Shukla, S.K. (2011). Water distillation using solar energy system with lauric acid as storage medium. **International Journal of Energy Engineering**, 1(1), 1-8.
- Department of alternative energy development and efficiency. (1999). **Solar energy potential map of Thailand. Ministry of energy.**
- Dilip, J. (2007). Modeling the thermal performance of an aquaculture pond heating with green house. **Building and Environment**, 42, 557-565
- Gabriel, Z., Cristian, S., Albert, C., Gabriel, P., & Luisa, F.C. (2013). The use of phase change materials in fish farms: A general analysis. **Applied Energy**, 109, 488-496.
- Korawat, W. (2010). Solar collector sizing of water heating system with assisted heat pump for controlling fish pond temperature. (Master dissertation). Chiang Mai university, Chaing Mai.



- Murat, K. & Khamid, M. (2007). Solar energy storage using phase change materials. **Journal of renewable and sustainable energy reviews**, 11, 1913-1965.
- Somchai, J., Eakpoom, B., Sorawit, S., & Phassorn, K. (2021). **Operational study of a solar water heating system integrated with phase change material for temperature control of fish pond**. In Proceedings of the 17th Naresuan Research & Innovation, Phitsanulok.
- Tribeni, D., Tiwari, G.N., & Bikash, S. (2006). Thermal performance of a greenhouse fish pond integrated with flat plate collector. **International Journal of Agricultural Research**, 1(5), 406-419.



การเลือกทำเลที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
เพื่อเชื่อมโยงรถไฟลาว-จีน (บ่อเต็น – เวียงจันทน์):

กรณีศึกษาบริษัทขนส่ง XYZ

THE LOCATION SELECTION OF DISTRIBUTION CENTER USING
MATHEMATICAL MODEL FOR CONNECTING LAOS-CHINA
RAILWAY (BOTEN-VIENTIANE): A CASE STUDY
OF XYZ LOGISTICS COMPANY

ภัทรวดี ประสมทรัพย์¹, ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ^{1*}

Pattarawadee Prasomsab¹, Sirikarn Chansombat^{1*}

¹คณะโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

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

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

วันที่เข้าระบบ 3 ตุลาคม 2565

วันที่แก้ไขบทความ 27 ธันวาคม 2565

วันที่ตอบรับบทความ 27 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ

รถไฟลาว-จีน ได้ถูกสร้างขึ้นเป็นส่วนหนึ่งของเส้นทางสายไหมแห่งศตวรรษที่ 21 และได้เปิดใช้งานอย่างเป็นทางการเมื่อวันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2564 การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งนี้ได้ก่อให้เกิดผลกระทบด้านเศรษฐกิจและการขนส่งของประเทศต่าง ๆ ในภูมิภาคอาเซียน โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทย บริษัทโลจิสติกส์ XYZ ได้ให้บริการขนส่งพัสดุทั้งภายในและต่างประเทศ สำหรับการขนส่งพัสดุไปยังต่างประเทศได้ดำเนินการขนส่งผ่านทางอากาศโดยบริษัทขนส่งที่มีความร่วมมือระหว่างกัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์เพื่อสนับสนุนการเลือกตำแหน่งทำเลที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้า โดยมีบริษัทโลจิสติกส์ XYZ เป็นกรณีศึกษา รูปแบบการดำเนินการเป็นการขนส่งจากต้นทางภายในประเทศไปยังสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว (สปป.ลาว) ด้วยการใช้รถไฟลาว-จีน แบบจำลองจำนวนเต็มแบบผสมได้ถูกนำเสนอขึ้นเพื่อหาต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนการขนส่ง ค่าธรรมเนียมการขนส่งสินค้าข้ามแดน และต้นทุนการดำเนินงาน โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลโซลเวอร์ถูกประยุกต์ใช้เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ผลลัพธ์แสดงว่า จังหวัดอุดรธานีเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการจัดตั้งเป็นศูนย์กระจายสินค้า ที่สามารถช่วยลดต้นทุนการขนส่งทางอากาศและตอบสนองต่อความต้องการในการกระจายสินค้าได้ อีกทั้งมีการวิเคราะห์ความไวเพื่อทำให้ทราบถึงผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรทราบค่าต่าง ๆ ที่มีต่อผลลัพธ์ด้วย

คำสำคัญ: ศูนย์กระจายสินค้า, การเลือกทำเลที่ตั้ง, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, รถไฟลาว-จีน

Abstract

The Laos-China railway was constructed as a part of the Belt and Road Initiative (BRI) strategy and officially opened on December 3rd, 2021. The development of transportation infrastructure under BRI strategy has had an effect on economy and transportation aspect of ASEAN countries, especially Thailand. The XYZ is a logistics company, which is used as a case study, provides domestic and international postal services. For international postal service, the XYZ provided services by air freight in collaboration with logistics partners. This study aimed to propose a mathematical model to support selecting distribution center location based on the XYZ case study. The model of the operation was the transportation from domestic originating cities to Laos by using the Laos-China railway. The proposed model was a mixed-integer linear programming model by minimizing the total cost, which contained transportation cost, fees and operational cost. Microsoft Excel solver was adopted for optimization purpose. The results showed that Udonthani province can be the most appropriate location for the distribution center. The new distribution center can be built to alleviate air transportation cost and meet the demand of postal distribution. A sensitive analysis was also provided to investigate the impact of various parameters coefficients on the results.

Keywords: Distribution center, Location selection, Mathematical model, Laos-China railway

1. บทนำ

โครงการรถไฟลาว-จีน เป็นส่วนหนึ่งของเส้นทางสายไหมแห่งศตวรรษที่ 21 (Belt and road initiative: BRI) ซึ่งเป็นแผนยุทธศาสตร์หลักของจีน โดยเส้นทางรถไฟลาว-จีน ช่วงบ่อเต็น-เวียงจันทน์ ได้ถูกสร้างขึ้นและได้เปิดใช้งานอย่างเป็นทางการเมื่อวันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2564 มีระยะทางยาวทั้งสิ้น 427 กิโลเมตร โดยมีจุดต้นทาง คือ บ่อเต็น แขวงหลวงน้ำทา ณ ชายแดนระหว่างสปป.ลาวและสาธารณรัฐประชาชนจีน และจุดปลายทาง คือ นครหลวงเวียงจันทน์ (Wichitphongsa & Ponanan, 2022) ถึงแม้ว่าเส้นทางรถไฟลาว-จีน ช่วงบ่อเต็น-เวียงจันทน์ จะไม่ได้พาดผ่านประเทศไทย แต่การ

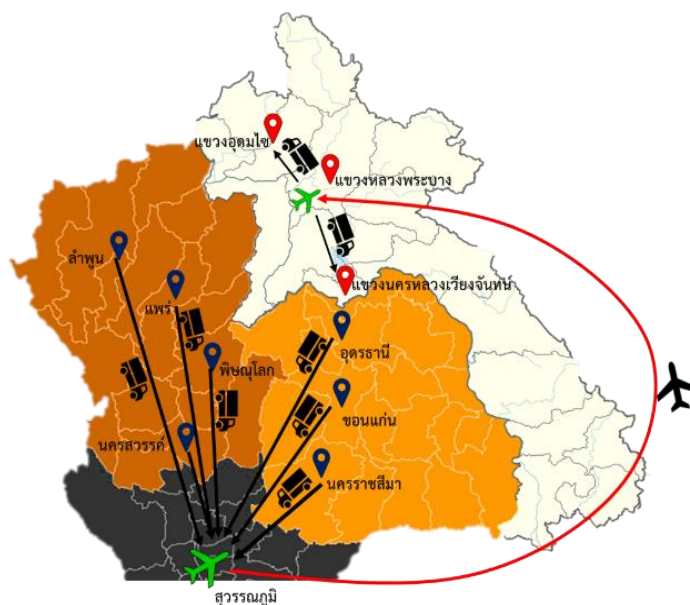
พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งนี้เข้ามาซึ่งผลกระทบด้านเศรษฐกิจ ด้านระบบขนส่งและโลจิสติกส์เป็นอย่างมาก

ปัญหาการเลือกทำเลที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าเป็นหนึ่งในปัญหาการเลือกทำเลที่ตั้งของสิ่งอำนวยความสะดวก (Facility location problem: FLP) (Shilong *et al.*, 2018) เป็นการเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปลูกสร้าง อาคาร โรงงาน คลังสินค้า หรือศูนย์กระจายสินค้าว่าควรตั้งอยู่ที่ใด ซึ่งถือได้ว่าเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วไปอย่างมาก เพราะการเลือกทำเลที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความสำเร็จของธุรกิจเป็นอย่างมาก โดยการแก้ปัญหา FLP นี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (ปรุพห์, 2014)

สำหรับบริษัทโลจิสติกส์ XYZ เป็นบริษัทให้บริการขนส่งพัสดุทั้งภายในและต่างประเทศ โดยมีศูนย์กระจายสินค้าตั้งอยู่ตามภูมิภาคต่าง ๆ ทั่วประเทศไทยทั้งหมด 17 จังหวัด ประกอบด้วย กรุงเทพมหานคร จังหวัดสมุทรปราการ จังหวัดชลบุรี จังหวัดตราดบุรี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จังหวัดปทุมธานี จังหวัดแพร่ จังหวัดลำพูน จังหวัดพิษณุโลก จังหวัดนครสวรรค์ จังหวัดอุดรธานี จังหวัดขอนแก่น จังหวัดนครราชสีมา จังหวัดอุบลราชธานี จังหวัดสงขลา จังหวัดนครศรีธรรมราช และจังหวัดชุมพร ซึ่งรูปแบบการขนส่งพัสดุที่มีปลายทางต่างประเทศ จะทำการรวบรวมพัสดุทั้งหมดมาไว้ยังศูนย์กระจายสินค้าจังหวัดสมุทรปราการ เพื่อดำเนินการขนส่งผ่านทางอากาศยานนั้น โดยอาศัยบริษัทขนส่งที่มีความร่วมมือระหว่างกัน การรวบรวมและการกระจายพัสดุของศูนย์กระจายสินค้าทั้งภายในและต่างประเทศ แสดงในภาพที่ 1 ถึงแม้ว่าพัสดุจะมีจุดหมายปลายทางอยู่ประเทศเพื่อนบ้าน อย่างเช่น สปป.ลาว บริษัทโลจิสติกส์ XYZ ยังคงขนส่งพัสดุผ่านทางอากาศยานเพียงรูปแบบเดียวเท่านั้น ซึ่งการขนส่งพัสดุด้วยรูปแบบทางอากาศยานทำให้เกิดต้นทุนในการขนส่งพัสดุมิค่อนข้างสูง จึงส่งผลให้อัตราค่าบริการในการส่งพัสดุสำหรับลูกค้าสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้กลายเป็นข้อเสียเปรียบทางการแข่งขัน เนื่องด้วยปัจจุบันนี้มีบริษัทที่ให้บริการด้านการขนส่งพัสดุทั้งภายในและต่างประเทศอยู่เป็นจำนวนมาก

สำหรับประเทศไทยและประเทศเพื่อนบ้านอย่าง สปป.ลาว มีแนวชายแดนติดต่อกันเป็นแนวยาว ทำให้มีประตูการค้าทางบกระหว่างกันเป็นจำนวนมาก สามารถเดินทางหรือขนส่งพัสดุด้วยรูปแบบทางถนนได้อย่างสะดวก การเดินทางระหว่างนครหลวงเวียงจันทน์ สปป.ลาว มายังจังหวัดอุดรธานี ประเทศไทย สามารถเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคล รถไฟ และรถโดยสารระหว่างประเทศลาว-ไทยได้อย่างสะดวก (Sounthavong & Satiennam, 2021) อีกทั้งปัจจุบันนี้ยังมีเส้นทางรถไฟลาว-จีน ช่วงบ่อเต็น-เวียงจันทน์ ที่ดำเนินการเสร็จสิ้นและเปิดให้ใช้งานอย่างเป็นทางการแล้วนั้น ถือได้ว่าเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพด้านระบบขนส่งและโลจิสติกส์ ช่วยพัฒนาเครือข่ายด้านโลจิสติกส์เพื่อเชื่อมโยงไปยังต่างประเทศให้มีหลายรูปแบบมากขึ้น ดังนั้นการที่บริษัทโลจิสติกส์ XYZ ยังคงใช้

รูปแบบการขนส่งทางอากาศเพื่อจัดส่งพัสดุไปยังต่างประเทศเพียงรูปแบบเดียวนั้นทำให้มีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง จึงควรมีการปรับเปลี่ยนหรือผสมผสานการขนส่งแบบต่อเนื่องหลายรูปแบบ (Multimodal transport) เพื่อช่วยทำให้ต้นทุนที่เกิดขึ้นลดต่ำลง



ภาพที่ 1 การรวบรวมและกระจายพัสดุของศูนย์กระจายสินค้า
ในภูมิภาคต่าง ๆ ทั่วประเทศ

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงเห็นถึงความสำคัญในการพัฒนาศูนย์กระจายสินค้าที่มีอยู่ของบริษัท โลจิสติกส์ XYZ ที่มีอยู่ทั้ง 17 แห่ง ซึ่งจัดตั้งอยู่ครอบคลุมในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย เพื่อพัฒนาให้เป็นศูนย์รวบรวมและกระจายสินค้าเพื่อจัดส่งพัสดุที่มีจุดหมายปลายทางไปยังต่างประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศเพื่อนบ้าน อย่างเช่น สปป.ลาว เพื่อเป็นการสร้างความได้เปรียบในการแข่งขันให้กับบริษัท อีกทั้งเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการขนส่งแบบต่อเนื่องหลายรูปแบบสำหรับการขนส่งทั้งภายในและภายนอกประเทศในอนาคตอีกด้วย

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

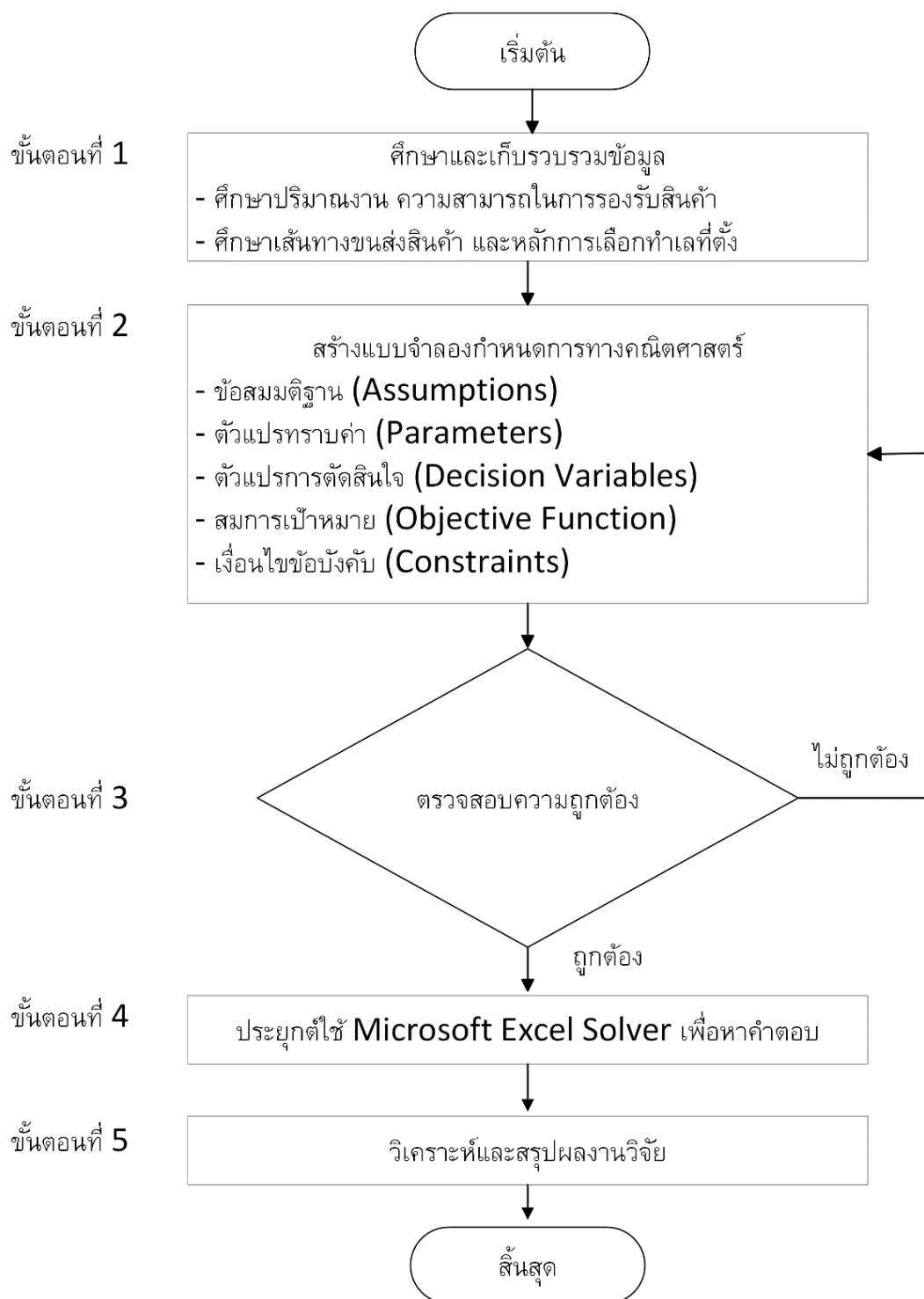
เพื่อพัฒนาแบบจำลองกำหนดการจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed integer linear programming: MILP) เพื่อสนับสนุนการเลือกตำแหน่งทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าของบริษัท โลจิสติกส์ XYZ เพื่อเชื่อมโยงกับโครงการรถไฟลาว-จีน ช่วงบ่อเต็น-เวียงจันทน์

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

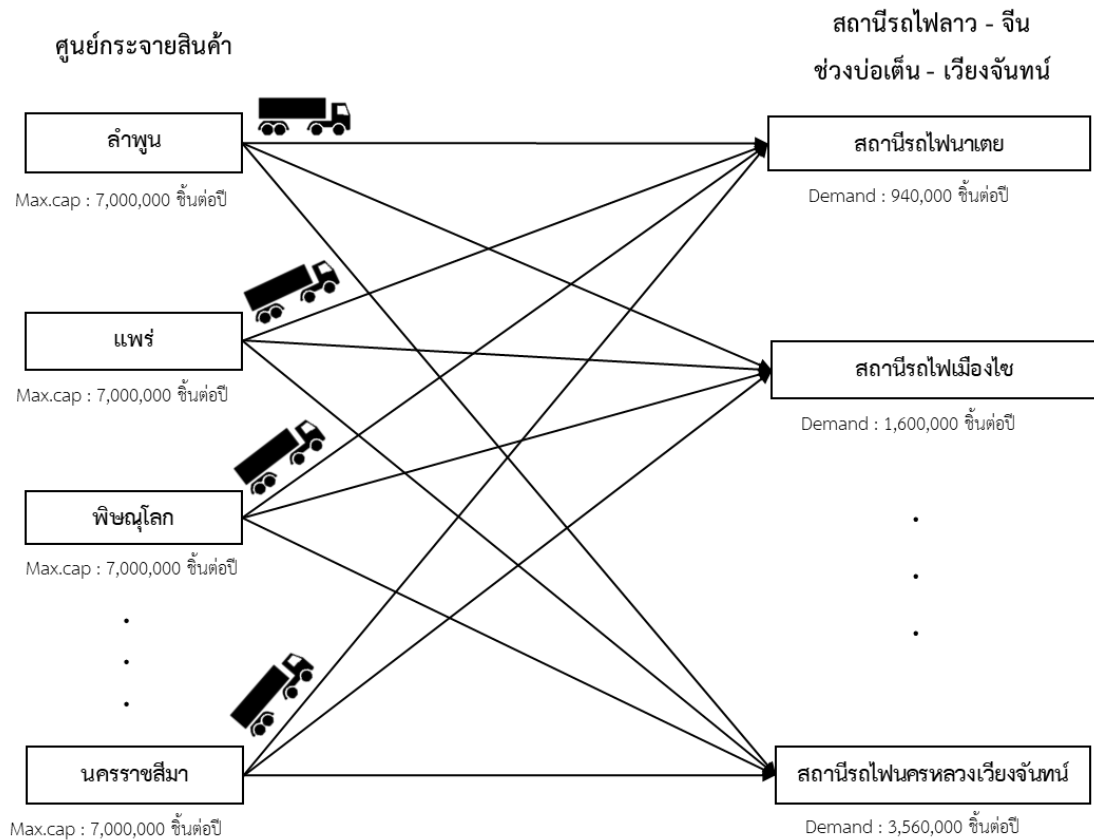
สำหรับวิธีดำเนินงานวิจัย สามารถสรุปได้เป็น 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) ขั้นตอนการศึกษาและรวบรวมข้อมูล 2) ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์ 3) ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง 4) ขั้นตอนการหาคำตอบด้วยการประยุกต์ใช้ Microsoft excel solver และ 5) วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย แสดงในภาพที่ 2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทบทวนวรรณกรรมและเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเลือกตำแหน่งทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าของบริษัทโลจิสติกส์ XYZ เพื่อพัฒนาให้เป็นศูนย์รวบรวมและกระจายพัสดุไปยัง สปป.ลาว ผ่านการขนส่งรูปแบบทางถนนเพื่อเชื่อมต่อไปยังรถไฟลาว-จีน ช่วงบ่อเต็น-เวียงจันทน์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พิจารณาศูนย์กระจายสินค้าที่มีความเป็นไปได้ในการเชื่อมต่อไปยังรถไฟลาว-จีน ช่วงบ่อเต็น-เวียงจันทน์ ซึ่งเป็นศูนย์กระจายสินค้าที่ตั้งอยู่ในเขตภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยทั้งสิ้น 7 ศูนย์ ได้แก่ ศูนย์กระจายสินค้าจังหวัดลำพูน แพร่ พิชณุโลก นครสวรรค์ นครราชสีมา อุตรธานี และขอนแก่น และสำหรับสถานีของรถไฟลาว-จีน ช่วงบ่อเต็น-เวียงจันทน์ ที่มีความเป็นไปได้ในการเชื่อมต่อกับศูนย์กระจายสินค้าของบริษัทโลจิสติกส์ XYZ มีทั้งสิ้น 5 สถานี ได้แก่ สถานีรถไฟนาเดย สถานีรถไฟเมืองไซ สถานีรถไฟหลวงพระบาง สถานีรถไฟวังเวียง และสถานีรถไฟนครหลวงเวียงจันทน์ โครงการการขนส่งพัสดุจากศูนย์กระจายสินค้าของบริษัทโลจิสติกส์ XYZ ไปยังสถานีรถไฟของรถไฟลาว-จีน แสดงในภาพที่ 3

สำหรับข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเลือกทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าของบริษัทโลจิสติกส์ XYZ เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบแบบจำลอง มีดังต่อไปนี้ ข้อมูลด้านโครงสร้างต้นทุนการขนส่งพัสดุประเภทรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 10 ล้อ เป็นข้อมูลที่ได้รับมาจากกรมการขนส่งทางบก (2559) ดังแสดงในตารางที่ 1 ข้อมูลด้านค่าธรรมเนียมการขนส่งพัสดุข้ามแดนไทย-ลาว ดังแสดงในตารางที่ 2 ข้อมูลด้านระยะทางการขนส่งจากแต่ละศูนย์กระจายสินค้าไปยังแต่ละสถานีรถไฟ ดังแสดงในตารางที่ 3 ข้อมูลด้านต้นทุนการขนส่งพัสดุจากแต่ละศูนย์กระจายสินค้าไปยังแต่ละสถานีรถไฟ ดังแสดงในตารางที่ 4 และสำหรับต้นทุนคงที่ในการพัฒนาศูนย์กระจายสินค้าที่มีอยู่เดิมให้เป็นศูนย์รวบรวมและกระจายสินค้าไปยังต่างประเทศ คือ 2,500,000 บาทและปริมาณความจุสูงสุดของแต่ละศูนย์กระจายสินค้าที่สามารถรองรับพัสดุได้ คือ 7,000,000 ชิ้น



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 3 โครงข่ายการขนส่งพัสดุของบริษัทโลจิสติกส์ XYZ ที่เป็นไปได้

ตารางที่ 1 โครงสร้างต้นทุนการขนส่งพัสดุด้วยรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 10 ล้อ (TC)
(กรมการขนส่งทางบก, 2559)

รายการ	ต้นทุนการขนส่ง (บาทต่อกิโลเมตร)
ค่ารถและเครื่องมือ	4.21
ค่าทะเบียน	0.05
ค่าตรวจสอบสภาพรถ	0.02
ค่าประกันภัย	0.75
ค่าพนักงานขับรถและผู้ช่วย	4.2
ค่าเชื้อเพลิง	6.12
ค่ายาง	0.29
ค่าน้ำมันหล่อลื่น	0.3
ค่าซ่อมรถและบำรุงรักษา	0.95
ค่าใช้จ่ายไม่มีใบเสร็จ	0.1
ค่าใช้จ่ายสำนักงาน	0.51
รวม	17.50

ตารางที่ 2 ค่าธรรมเนียมการขนส่งพัสดุข้ามแดนไทย-ลาว (b) (ศูนย์ข้อมูลเพื่อธุรกิจไทยในจีน, 2556)

รายการ	จุดผ่านแดนฝั่งไทย (บาท)	จุดผ่านแดนฝั่ง สปป.ลาว
รถบรรทุก 10 ขึ้นไป	350	94,000 กีบ หรือ 282 บาท
ค่าผ่านแดนรายบุคคล	10	50 บาท

*หมายเหตุ : ค่าเงินกีบเท่ากับ 0.0030 บาท (ข้อมูล ณ วันที่ 25 ธันวาคม 2564)

ตารางที่ 3 ระยะทางการขนส่งพัสดุ (S_{ij})

ศูนย์กระจายสินค้า	ระยะทาง (กิโลเมตร)			
	สถานีนาเตย	สถานีเมืองไซ	...	สถานีนครหลวงเวียงจันทน์
ลำพูน	506	546	...	638
แพร่	507	463	...	475
พิษณุโลก	678	613	...	405
นครสวรรค์	820	755	...	562
ขอนแก่น	772	692	...	189
อุดรธานี	666	592	...	89
นครราชสีมา	1,042	877	...	374

ตารางที่ 4 ต้นทุนการขนส่งพัสดุ (c_{ij})

ศูนย์กระจายสินค้า	ต้นทุนการขนส่ง (บาท)			
	สถานีนาเตย	สถานีเมืองไซ	...	สถานีนครหลวงเวียงจันทน์
ลำพูน	8,855	9,555	...	11,165
แพร่	8,873	8,103	...	8,313
พิษณุโลก	11,865	10,728	...	7,088
นครสวรรค์	14,350	13,213	...	9,835
ขอนแก่น	13,510	12,110	...	3,308
อุดรธานี	11,655	10,360	...	1,558
นครราชสีมา	18,235	15,348	...	6,545

ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองกำหนดการจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed integer linear programming: MILP) เพื่อสนับสนุนการเลือกตำแหน่งทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าของบริษัท โลจิสติกส์ XYZ เพื่อเชื่อมโยงกับโครงการรถไฟลาว-จีน ช่วงบ่อเต็น-เวียงจันทน์ โดยมีรายละเอียดดังนี้



ข้อสมมติฐาน (Assumptions)

- 1) การขนส่งพัสดุของบริษัทโลจิสติกส์ XYZ ดำเนินการขนส่งด้วยรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 10 ล้อ เท่านั้น
- 2) รถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซล 10 ล้อ สามารถบรรจุพัสดุของบริษัทโลจิสติกส์ XYZ ได้เต็มตามความจุของรถบรรทุกจำนวน 20,000 ชิ้นต่อรอบการขนส่ง
- 3) สามารถรู้ปริมาณการขนส่งได้ล่วงหน้าและมีปริมาณความต้องการการขนส่งพัสดุที่แน่นอน

ดัชนี (Indices)

i คือ หมายเลขของศูนย์กระจายสินค้า โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$; 1=ศูนย์ลำพูน, 2=ศูนย์แพร่, 3=ศูนย์พิษณุโลก, 4=ศูนย์นครสวรรค์, 5=ศูนย์ขอนแก่น, 6=ศูนย์อุดรธานี, 7=ศูนย์นครราชสีมา

j คือ หมายเลขของสถานีรถไฟ โดยที่ $j = 1, 2, \dots, m$; 1=สถานีรถไฟนาเดย, 2=สถานีรถไฟเมืองไซ, 3=สถานีรถไฟหลวงพระบาง, 4=สถานีรถไฟวังเวียง, 5=สถานีรถไฟนครหลวงเวียงจันทน์

ตัวแปรค่า (Parameters)

n คือ จำนวนศูนย์กระจายสินค้า

m คือ จำนวนสถานีรถไฟ

f_i คือ ต้นทุนคงที่ในการพัฒนาศูนย์กระจายสินค้าให้เป็นศูนย์รวบรวมและกระจายสินค้าไปยังต่างประเทศของศูนย์กระจายสินค้าที่ i (หน่วย : บาท)

c_{ij} คือ ต้นทุนการขนส่งจากศูนย์กระจายสินค้าที่ i ไปยังสถานีรถไฟที่ j (หน่วย : บาทต่อรอบการขนส่ง)

d_j คือ ปริมาณความต้องการพัสดุเพื่อจัดส่งไปยังสถานีรถไฟที่ j (หน่วย : ชิ้นต่อปี)

S_{ij} คือ ระยะทางจากศูนย์กระจายสินค้าที่ i ไปยังสถานีรถไฟที่ j (หน่วย : กิโลเมตร)

TC คือ ต้นทุนการขนส่งพัสดุโดยรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 10 ล้อ (หน่วย : บาทต่อกิโลเมตร)

Q คือ ปริมาณความจุสูงสุดของรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 10 ล้อ ที่สามารถรองรับได้ (หน่วย : ชิ้นต่อรอบการขนส่ง)

MC_i คือ ปริมาณความจุสูงสุดของศูนย์กระจายสินค้าที่ i ที่สามารถรองรับได้ (หน่วย : ชิ้นต่อปี)

b_{ij} คือ ค่าธรรมเนียมการขนส่งพัสดุข้ามแดนไทย-ลาว จากศูนย์กระจายสินค้าที่ i ไปยังสถานีรถไฟที่ j (หน่วย : บาท)

ตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variables)

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อถูกเลือกให้ตั้งเป็นศูนย์กระจายสินค้าเพื่อรองรับและขนส่งพัสดุไปยัง} \\ & \text{รถไฟลาว-จีน ช่วงบ่อเต็น-เวียงจันทน์} \\ 0 & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$$

x_{ij} คือ ปริมาณพัสดุที่ถูกขนส่งจากศูนย์กระจายสินค้าที่ i ไปยังสถานีรถไฟที่ j

กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

ในบทความนี้ได้พัฒนาแบบจำลองกำหนดการจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed integer linear programming: MILP) เพื่อใช้ในการหาตำแหน่งทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าของบริษัทโลจิสติกส์ XYZ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้ต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นต่ำที่สุด ประกอบด้วย ต้นทุนการขนส่ง ค่าธรรมเนียมการขนส่งสินค้าข้ามแดน และต้นทุนการดำเนินงาน โดยมีรูปแบบของแบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์ ดังต่อไปนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ (1) แสดงถึง ต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นต่ำที่สุด ประกอบด้วย ต้นทุนการขนส่ง ค่าธรรมเนียมการขนส่งสินค้าข้ามแดน และต้นทุนการดำเนินงาน

$$\text{Minimise} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^m b_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^n f_i y_i \quad (1)$$

เงื่อนไขข้อบังคับ (Subject to)

สมการที่ (2) แสดงถึง ปริมาณพัสดุที่ขนส่งจากศูนย์กระจายสินค้า i ไปยังสถานีรถไฟที่ j เพื่อให้เป็นไปตามรอบของการขนส่งพัสดุ

$$x_{ij} = d_j / Q \quad ; \forall_j \quad (2)$$

สมการที่ (3) แสดงถึง ปริมาณพัสดุที่ขนส่งจากศูนย์กระจายสินค้า i ไปยังสถานีรถไฟที่ j ต้องไม่เกินความสามารถของศูนย์กระจายสินค้าที่รองรับได้

$$x_{ij} \leq \sum_{i=1}^n (MC_i / Q) y_i \quad ; \forall_{i,j} \quad (3)$$

สมการที่ (4) แสดงถึง ต้นทุนการขนส่งพัสดุด้วยรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 10 ล้อ จาก ศูนย์กระจายสินค้า i ไปยังสถานีรถไฟที่ j

$$c_{ij} = TC \times S_{ij} \quad ; \forall_{i,j} \quad (4)$$

ข้อจำกัดที่ (5) การกำหนดตัวแปรต้องมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ และเป็นจำนวนเต็ม

$$x_{ij} \geq 0 \text{ and integer} \quad ; \forall_{i,j} \quad (5)$$

ข้อจำกัดที่ (6) การกำหนดคุณสมบัติของตัวแปรการตัดสินใจ

$$y_i \in \{0,1\} \quad ; \forall_{i,j} \quad (6)$$

เมื่อพัฒนาแบบจำลองแล้ว ได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อตรวจสอบว่า สามารถให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องตรงตามวัตถุประสงค์ ภายใต้ข้อบังคับต่างๆ หรือไม่ ด้วยการประยุกต์ใช้ โปรแกรม Microsoft excel solver ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นว่ามีความถูกต้องตาม วัตถุประสงค์และเงื่อนไขข้อบังคับที่กำหนด

4. ผลการวิจัย

ในส่วนนี้เป็นการแสดงผลการวิจัยที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม Microsoft excel solver ที่รันบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) แบบ AMD Ryzen(R) 5 – 3500 ด้วยความถี่ 2.10 GHz และมีหน่วยความจำ (RAM) 8 GB บนระบบปฏิบัติการ Windows 10 ผลลัพธ์ที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 6

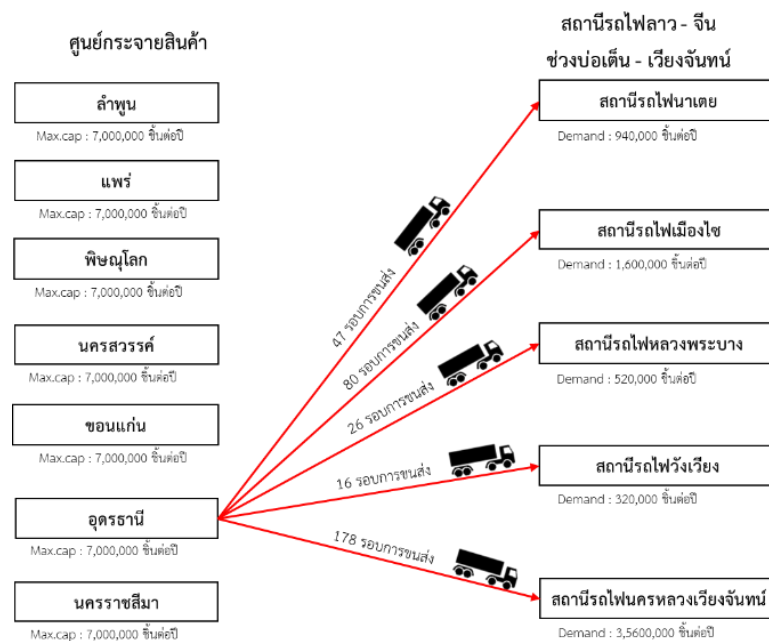
จากตารางที่ 6 แสดงถึง ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลแบบจำลองกำหนดการจำนวนเต็ม แบบผสม ด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรม Microsoft excel solve เพื่อทำให้ทราบถึงต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นต่ำที่สุด ประกอบด้วย ต้นทุนการขนส่ง ค่าธรรมเนียมการขนส่งสินค้าข้ามแดน และต้นทุนการดำเนินงาน จากผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นว่า ศูนย์กระจายสินค้าจังหวัดอุดรธานี ได้ถูกเลือกให้เป็น ศูนย์กระจายสินค้าที่ควรได้รับการพัฒนาให้เป็นศูนย์รวบรวมและกระจายสินค้าไปยังประเทศเพื่อน

บ้าน คือ สปป.ลาว เพื่อเชื่อมต่อไปยังรถไฟลาว-จีน ช่วงบ่อเต็น—เวียงจันทน์ ที่ทำให้เกิดต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นต่ำที่สุด แสดงในภาพที่ 4

ตารางที่ 6 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม Microsoft excel solve

ศูนย์กระจายสินค้า	การพัฒนาให้เป็นศูนย์รวบรวมและกระจายสินค้าไปยังต่างประเทศ	จำนวนรอบของการขนส่งพัสดุแต่ละสถานี				
		นาเตย	เมืองไซ	หลวงพระบาง	วังเวียง	นครหลวงเวียงจันทน์
ลำพูน	0	-	-	-	-	-
แพร่	0	-	-	-	-	-
พิษณุโลก	0	-	-	-	-	-
นครสวรรค์	0	-	-	-	-	-
ขอนแก่น	0	-	-	-	-	-
อุดรธานี	1	47	80	26	16	178
นครราชสีมา	0	-	-	-	-	-
ต้นทุนรวมทั้งหมด (บาท)		4,640,169				

*หมายเหตุ : กำหนดให้ 1 รอบการขนส่งสามารถจุสินค้าได้ 20,000 ชิ้น



ภาพที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลแบบจำลองกำหนดการจำนวนเต็มแบบผสม

เมื่อทราบถึงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองแล้ว การวิเคราะห์ความไว (Sensitive analysis) เป็นส่วนที่สำคัญมากในการศึกษาถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรทราบค่าหรือพารามิเตอร์ของแบบจำลอง เนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ได้รับจากแบบจำลองนั้น เป็นคำตอบที่เกิดจากการประมาณค่าพารามิเตอร์บางตัว ซึ่งในชีวิตจริง ค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นอาจเปลี่ยนแปลงได้ เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรทราบค่า ด้วยการใช้ Data table ของ Microsoft excel โดยการใช้การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทราบค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ความไว โดยการใช้การเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการขนส่งสินค้า (c_{ij})

การวิเคราะห์ความไว โดยการเพิ่มหรือลดระยะทางในการขนส่ง						
$c_{ij} = TC \times S_{ij}$ ลดระยะทางลง 40 กิโลเมตร จากระยะทางที่เกิดขึ้นตามจริง (หน่วย : บาท)						
	นาเตย (j=1)	เมืองไช (j=2)	หลวงพระบาง (j=3)	วังเวียง (j=4)	นครหลวงเวียงจันทน์ (j=5)	Min total cost
ลำพูน (i=1)	8,155	8,855	11,655	10,343	10,465	4,397,269
แพร่ (i=2)	8,173	7,403	8,803	7,473	7,613	
พิษณุโลก (i=3)	11,165	10,028	9,153	8,645	6,388	
นครสวรรค์ (i=4)	13,650	12,513	11,655	11,410	9,135	
ขอนแก่น (i=5)	12,810	11,410	8,173	4,865	2,608	
อุดรธานี (i=6)	10,955	9,660	6,423	3,115	858	
นครราชสีมา (i=7)	17,535	14,648	11,410	8,103	5,845	
$c_{ij} = TC \times S_{ij}$ ลดระยะทางลง 20 กิโลเมตร จากระยะทางที่เกิดขึ้นตามจริง (หน่วย : บาท)						
	นาเตย (j=1)	เมืองไช (j=2)	หลวงพระบาง (j=3)	วังเวียง (j=4)	นครหลวงเวียงจันทน์ (j=5)	Min total cost
ลำพูน (i=1)	8,505	9,205	12,005	10,693	10,815	4,518,719
แพร่ (i=2)	8,523	7,753	9,153	7,823	7,963	
พิษณุโลก (i=3)	11,515	10,378	9,503	8,995	6,738	
นครสวรรค์ (i=4)	14,000	12,863	12,005	11,760	9,485	
ขอนแก่น (i=5)	13,160	11,760	8,523	5,215	2,958	
อุดรธานี (i=6)	11,305	10,010	6,773	3,465	1,208	
นครราชสีมา (i=7)	17,885	14,998	11,760	8,453	6,195	
$c_{ij} = TC \times S_{ij}$ ระยะทางที่เกิดขึ้นตามจริง (หน่วย : บาท)						
	นาเตย (j=1)	เมืองไช (j=2)	หลวงพระบาง (j=3)	วังเวียง (j=4)	นครหลวงเวียงจันทน์ (j=5)	Min total cost
ลำพูน (i=1)	8,855	9,555	12,355	11,043	11,165	4,640,169



แพร่ (i=2)	8,873	8,103	9,503	8,173	8,313
พิษณุโลก (i=3)	11,865	10,728	9,853	9,345	7,088
นครสวรรค์ (i=4)	14,350	13,213	12,355	12,110	9,835
ขอนแก่น (i=5)	13,510	12,110	8,873	5,565	3,308
อุดรธานี (i=6)	11,655	10,360	7,123	3,815	1,558
นครราชสีมา (i=7)	18,235	15,348	12,110	8,803	6,545

$c_{ij} = TC \times S_{ij}$ เพิ่มระยะทาง 20 กิโลเมตร จากระยะทางที่เกิดขึ้นตามจริง (หน่วย : บาท)

	นาเตย (j=1)	เมืองไซ (j=2)	หลวงพระบาง (j=3)	วังเวียง (j=4)	นครหลวงเวียงจันทน์ (j=5)	Min total cost
ลำพูน (i=1)	9,205	9,905	12,705	11,393	11,515	
แพร่ (i=2)	9,223	8,453	9,853	8,523	8,663	
พิษณุโลก (i=3)	12,215	11,078	10,203	9,695	7,438	
นครสวรรค์ (i=4)	14,700	13,563	12,705	12,460	10,185	4,761,619
ขอนแก่น (i=5)	13,860	12,460	9,223	5,915	3,658	
อุดรธานี (i=6)	12,005	10,710	7,473	4,165	1,908	
นครราชสีมา (i=7)	18,585	15,698	12,460	9,153	6,895	

$c_{ij} = TC \times S_{ij}$ เพิ่มระยะทาง 40 กิโลเมตร จากระยะทางที่เกิดขึ้นตามจริง (หน่วย : บาท)

	นาเตย (j=1)	เมืองไซ (j=2)	หลวงพระบาง (j=3)	วังเวียง (j=4)	นครหลวงเวียงจันทน์ (j=5)	Min total cost
ลำพูน (i=1)	9,555	10,255	13,055	11,743	11,865	
แพร่ (i=2)	9,573	8,803	10,203	8,873	9,013	
พิษณุโลก (i=3)	12,565	11,428	10,553	10,045	7,788	
นครสวรรค์ (i=4)	15,050	13,913	13,055	12,810	10,535	4,883,069
ขอนแก่น (i=5)	14,210	12,810	9,573	6,265	4,008	
อุดรธานี (i=6)	12,355	11,060	7,823	4,515	2,258	
นครราชสีมา (i=7)	18,935	16,048	12,810	9,503	7,245	

$c_{ij} = TC \times S_{ij}$ ลดต้นทุนการขนส่ง 2 บาท/กิโลเมตร จากต้นทุนการขนส่งที่เกิดขึ้นตามจริง (หน่วย : บาท)

	นาเตย (j=1)	เมืองไซ (j=2)	หลวงพระบาง (j=3)	วังเวียง (j=4)	นครหลวงเวียงจันทน์ (j=5)	Min total cost
ลำพูน (i=1)	7,843	8,463	10,943	9,781	9,889	
แพร่ (i=2)	7,859	7,177	8,417	7,239	7,363	
พิษณุโลก (i=3)	10,509	9,502	8,727	8,277	6,278	4,423,021
นครสวรรค์ (i=4)	12,710	11,703	10,943	10,726	8,711	



ขอนแก่น (i=5)	11,966	10,726	7,859	4,929	2,930
อุดรธานี (i=6)	10,323	9,176	6,309	3,379	1,380
นครราชสีมา (i=7)	16,151	13,594	10,726	7,797	5,797

$C_{ij} = TC \times S_{ij}$ ลดต้นทุนการขนส่ง 1 บาท/กิโลเมตร จากต้นทุนการขนส่งที่เกิดขึ้นตามจริง

(หน่วย : บาท)

	นาเตย (j=1)	เมืองไซ (j=2)	หลวงพระบาง (j=3)	วังเวียง (j=4)	นครหลวงเวียงจันทน์ (j=5)	Min total cost
ลำพูน (i=1)	8,349	9,009	11,649	10,412	10,527	
แพร่ (i=2)	8,366	7,640	8,960	7,706	7,838	
พิษณุโลก (i=3)	11,187	10,115	9,290	8,811	6,683	
นครสวรรค์ (i=4)	13,530	12,458	11,649	11,418	9,273	4,531,595
ขอนแก่น (i=5)	12,738	11,418	8,366	5,247	3,119	
อุดรธานี (i=6)	10,989	9,768	6,716	3,597	1,469	
นครราชสีมา (i=7)	17,193	14,471	11,418	8,300	6,171	

$C_{ij} = TC \times S_{ij}$ ต้นทุนการขนส่งที่เกิดขึ้นตามจริง (หน่วย : บาท)

	นาเตย (j=1)	เมืองไซ (j=2)	หลวงพระบาง (j=3)	วังเวียง (j=4)	นครหลวงเวียงจันทน์ (j=5)	Min total cost
ลำพูน (i=1)	8,855	9,555	12,355	11,043	11,165	
แพร่ (i=2)	8,873	8,103	9,503	8,173	8,313	
พิษณุโลก (i=3)	11,865	10,728	9,853	9,345	7,088	
นครสวรรค์ (i=4)	14,350	13,213	12,355	12,110	9,835	4,640,169
ขอนแก่น (i=5)	13,510	12,110	8,873	5,565	3,308	
อุดรธานี (i=6)	11,655	10,360	7,123	3,815	1,558	
นครราชสีมา (i=7)	18,235	15,348	12,110	8,803	6,545	

$C_{ij} = TC \times S_{ij}$ เพิ่มต้นทุนการขนส่ง 1 บาท/กิโลเมตร จากต้นทุนการขนส่งที่เกิดขึ้นตามจริง

(หน่วย : บาท)

	นาเตย (j=1)	เมืองไซ (j=2)	หลวงพระบาง (j=3)	วังเวียง (j=4)	นครหลวงเวียงจันทน์ (j=5)	Min total cost
ลำพูน (i=1)	9,361	10,101	13,061	11,674	11,803	
แพร่ (i=2)	9,380	8,566	10,046	8,640	8,788	
พิษณุโลก (i=3)	12,543	11,341	10,416	9,879	7,493	
นครสวรรค์ (i=4)	15,170	13,968	13,061	12,802	10,397	4,748,743
ขอนแก่น (i=5)	14,282	12,802	9,380	5,883	3,497	
อุดรธานี (i=6)	12,321	10,952	7,530	4,033	1,647	



นครราชสีมา (i=7)	19,277	16,225	12,802	9,306	6,919	
$c_{ij} = TC \times S_{ij}$ เพิ่มต้นทุนการขนส่ง 2 บาท/กิโลเมตร จากต้นทุนการขนส่งที่เกิดขึ้นตามจริง						
(หน่วย : บาท)						Min total cost
	นาเตย (j=1)	เมืองไช (j=2)	หลวงพระบาง (j=3)	วังเวียง (j=4)	นครหลวงเวียงจันทน์ (j=5)	
ลำพูน (i=1)	9,867	10,647	13,767	12,305	12,441	
แพร่ (i=2)	9,887	9,029	10,589	9,107	9,263	
พิษณุโลก (i=3)	13,221	11,954	10,979	10,413	7,898	
นครสวรรค์ (i=4)	15,990	14,723	13,767	13,494	10,959	4,857,317
ขอนแก่น (i=5)	15,054	13,494	9,887	6,201	3,686	
อุดรธานี (i=6)	12,987	11,544	7,937	4,251	1,736	
นครราชสีมา (i=7)	20,319	17,102	13,494	9,809	7,293	

จากตารางที่ 7 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงตัวแปรทราบค่าหรือพารามิเตอร์ของต้นทุนการขนส่งพัสดุที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง เมื่อต้นทุนการขนส่งพัสดุลดลง ส่งผลทำให้ต้นทุนรวมทั้งหมดยกเว้นค่าลดลงด้วย และเมื่อต้นทุนการขนส่งพัสดุเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ต้นทุนรวมทั้งหมดยกเว้นค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองกำหนดการจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed integer linear programming: MILP) เพื่อสนับสนุนการเลือกตำแหน่งทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าของบริษัท โลจิสติกส์ XYZ เพื่อเชื่อมโยงกับโครงการรถไฟลาว-จีน ช่วงบ่อเต็น-เวียงจันทน์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นต่ำที่สุด ประกอบด้วย ต้นทุนการขนส่ง ค่าธรรมเนียมการขนส่งสินค้าข้ามแดน และต้นทุนการดำเนินงาน จากการประยุกต์ใช้โปรแกรม Microsoft excel solver เพื่อหาผลลัพธ์ของแบบจำลอง พบว่า ศูนย์กระจายสินค้าจังหวัดอุดรธานี เป็นตำแหน่งทำเลที่เหมาะสมที่สุด ในการพัฒนาให้เป็นศูนย์รวบรวมและกระจายสินค้าไปยัง สปป.ลาว ผ่านการขนส่งด้วยรถไฟลาว-จีน ช่วงบ่อเต็น-เวียงจันทน์ โดยมีต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด คือ 4,640,169 บาท รายละเอียดของต้นทุน ประกอบด้วย ต้นทุนการขนส่ง คือ 1,900,045 บาท ค่าธรรมเนียมการขนส่งสินค้าข้ามแดน คือ 240,124 บาท และต้นทุนการดำเนินงาน คือ 2,500,000 บาท โดยมีการขนส่งพัสดุไปยังสถานีรถไฟนาเตยจำนวน 47 รอบต่อปี หรือคิดเป็น 940,000 ชิ้นต่อปี สถานีรถไฟเมืองไชจำนวน 80 รอบต่อปี หรือคิดเป็น 1,600,000 ชิ้นต่อปี สถานีรถไฟหลวงพระบางจำนวน 26 รอบต่อปี หรือคิดเป็น 520,000 ชิ้นต่อปี สถานีรถไฟวังเวียง 16 รอบต่อปี หรือคิดเป็น 320,000 ชิ้นต่อปี และสถานีนครหลวง

เวียงจันทน์จำนวน 178 รอบต่อปี หรือคิดเป็น 3,560,000 ขึ้นต่อปี โดยศูนย์กระจายสินค้าจังหวัดอุดรธานีจะทำการจัดส่งพัสดุไปยัง สปป.ลาว ผ่านการเชื่อมต่อกับรถไฟลาว-จีน ช่วงบ่อเต็น-เวียงจันทน์ ทั้งหมด 6,940,000 ขึ้นต่อปี หรือจำนวน 347 รอบต่อปี

สำหรับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น เป็นข้อมูลที่ได้รับจากบริษัทโลจิสติกส์ XYZ ซึ่งบางข้อมูลเป็นข้อมูลที่ได้รับจากการประมาณการณ์ของบุคคลากรในบริษัท และมีบางข้อมูลที่ได้รับจากการทบทวนวรรณกรรม ซึ่งในการปฏิบัติงานจริง อาจมีเงื่อนไขข้อจำกัดส่วนอื่น รวมถึงระเบียบข้อตกลงทางด้านกฎหมายที่ไม่ได้มีการพิจารณาในการพัฒนาแบบจำลองนี้ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นแนวทางเพื่อสนับสนุนการเลือกตำแหน่งทำเลที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าที่มีอยู่เดิม เพื่อพัฒนาให้เป็นศูนย์รวบรวมและกระจายสินค้าไปยังสปป.ลาว ในอีกรูปแบบหนึ่ง ที่จะสามารถช่วยลดต้นทุนการขนส่งทางอากาศและตอบสนองต่อความต้องการในการกระจายสินค้าได้ เพื่อเสนอเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อประกอบการพิจารณาในการวางแผนทางธุรกิจในอนาคตต่อไป สำหรับการศึกษาเพิ่มเติม หากมีการเพิ่มขนาดของปัญหา เพิ่มจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ เติมนโยบายข้อบังคับมากขึ้น อาจจะนำวิธีการฮิวริสติกส์ (Heuristics) หรือเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristics) มาใช้ในการแก้ปัญหาที่ร่วมกับแบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้สามารถค้นหาคำตอบได้ภายในระยะเวลาที่จำกัดเมื่อขนาดของปัญหาที่มีความซับซ้อนและมีขนาดใหญ่มากขึ้น เพื่อให้แบบจำลองที่พัฒนานั้นมีความสมจริงและครอบคลุมกับเงื่อนไขข้อจำกัดต่าง ๆ ของการขนส่งสินค้าข้ามแดนมากยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก คณะโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยนเรศวร

7. เอกสารอ้างอิง

- กรมการขนส่งทางบก. (2559). **โครงการศึกษาต้นทุนการขนส่งและกระจายสินค้าเพื่อรองรับการพัฒนาสถานีขนส่งสินค้าทั่วประเทศ**. ค้นจาก <http://www.thaitruckcenter.com>
- ปรุพท์ มะยะเฉียว. (2014). การแก้ปัญหาการเลือกสถานที่ตั้ง. **Princess of Naradhiwas University Journal**, 6(1), 132-145.
- ศูนย์ข้อมูลเพื่อธุรกิจไทยในจีน. (2556). **สะพานข้ามโขงแห่งใหม่: ความหวังที่จะเป็นประตูเชื่อมการค้าอาเซียน-จีนตอนใต้**. ค้นจาก <https://thaibizchina.com/สะพานข้ามโขงแห่งใหม่-คว/>



- Shilong, L., Zhenlin, W., & Ailing, H. (2018). Location Selection of Urban Distribution Center with a Mathematical Modeling Approach based on the Total Cost. **IEEE Access**, 6(1), 61833-61842.
- Sounthavong, V., & Satiennam, W. (2021). A Mode Choice Model for Cross-Border Transportation: A Case Study Between Vientiane Capital and Udonthani Province. **KKU Research Journal**, 21(2), 104-116.
- Wichitphongsa, W., & Ponanan, K. (2022). A Development of Mode Choice Models for Modal Shift Potential Towards Intermodal Transportation: A Case Study of Vientiane - Boten Railway. **ABAC Journal**, 42(1), 222-236.



การวิเคราะห์ปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาทักษะของพนักงานขับรถบรรทุก
ในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก

A FACTOR ANALYSIS FOR INFLUENCING THE DEVELOPMENT
OF TRUCK DRIVER SKILLS IN THE EASTERN SPECIAL
DEVELOPMENT ZONE

อภิชาติ บัวกล้า¹, ชัยวัฒน์ แสงศรีจันทร์¹, นันทพล มหาวาน¹,

ชูพงศ์ อุन्नันท¹, เจษฎา โพธิ์จันทร์^{2*}

Apichat Buakla¹, Chaiwat Sangsrichan¹, Nantaphon Mahawan²,

Chupong Unnan², Jessada Pochan^{3*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา อ.เมือง จ.พะเยา ประเทศไทย 56000

²คณะโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹School of Engineering, University of Phayao, Muang, Phayao, Thailand, 56000

²Faculty of Logistics and Digital Supply Chain, Naresuan University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

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

วันที่เข้ารับ 27 กันยายน 2565

วันที่แก้ไขบทความ 27 ธันวาคม 2565

วันที่ตอบรับบทความ 27 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยและค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาทักษะของพนักงานขับรถบรรทุกในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก ด้วยกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับขั้นที่ทำการประเมินโดยหน่วยงานราชการ ผู้เชี่ยวชาญ และผู้ประกอบการขนส่งที่เกี่ยวข้อง จำนวน 10 แห่งในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก โดยกระบวนการดำเนินงานประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 2) การคัดเลือกปัจจัยจากทักษะที่ได้ 3) การเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัย 4) การวิเคราะห์โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์ตามลำดับขั้น 5) การจัดลำดับความสำคัญของปัจจัย และ 6) การสรุปผลและเสนอแนะ โดยผลการศึกษา พบว่า ปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาทักษะของพนักงานขับรถบรรทุกในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก ประกอบด้วย 15 ปัจจัยย่อย ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มปัจจัยหลัก (กลุ่มละ 5 ปัจจัยย่อย) ได้แก่ 1) ทักษะพื้นฐาน 2) ทักษะหลัก และ 3) ทักษะเสริม โดยมีค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย เท่ากับ 45.6% 33.2% และ 21.2% ตามลำดับ ดังนั้น หน่วยงานภาครัฐและเอกชนสามารถนำปัจจัยที่ได้ไปใช้ในการวางแผนหลักสูตรการฝึกอบรมเพื่อพัฒนาทักษะของพนักงานขับรถบรรทุกให้สามารถรองรับระบบโลจิสติกส์ในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ปัจจัยของพนักงานขับรถบรรทุก, ทักษะของพนักงานขับรถบรรทุก, กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับขั้น, เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก

Abstract

This article aimed to analyze the factors and the importance weight of the factors for truck drivers' skills development in the Eastern Special Development Zone (ESDZ) by using Analytical Hierarchy Process (AHP) evaluated by government agencies, experts, and transport operators involved in 10 locations in the ESDZ. The implementation process consisted of six main steps: 1) literature review and related theories, 2) selection of factors based on skills, 3) comparison of factor importance, 4) analytical hierarchy process, 5) prioritization of factors, and 6) conclusions and suggestions. The results showed that the factors used to develop the truck driver skills in the ESDZ consisted of 15 sub-factors. They could be divided into 3 main groups (5 sub-factors in each group): 1) basic skills, 2) core skills, and 3) auxiliary skills, with the importance weight of factors of 45.6%, 33.2% and 21.2%, respectively. Therefore, government agencies and private sectors can use the factors obtained in planning training courses to develop the skills of truck drivers to be able to support the logistics system in ESDZ effectively.

Keywords: Truck driver factors, Truck driver skills, Analytical Hierarchy Process, Eastern special development zone

1. บทนำ

ปัจจุบัน ในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (Eastern special development zone: ESDZ) หรือชื่อเดิมว่า ระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก (Eastern economic corridor: EEC) ได้มีแผนการพัฒนาพื้นที่และถูกบรรจุในยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี รวมทั้งนโยบายในการพัฒนาเชิงพื้นที่ โดยมีโครงการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญ ๆ 5 โครงการ ประกอบด้วย 1) โครงการรถไฟความเร็วสูงเชื่อม 3 ท่าอากาศยาน (ดอนเมือง-สุวรรณภูมิ-อู่ตะเภา) 2) โครงการพัฒนาท่าอากาศยานนานาชาติอู่ตะเภา 3) โครงการพัฒนาท่าเรือแหลมฉบัง (ระยะที่ 3) 4) โครงการพัฒนาท่าเรืออุตสาหกรรมมาบตาพุด ระยะที่ 3 และ 5) โครงการทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 (ช่วงพญา-มาบตาพุด) นอกจากนี้ยังมีโครงการอื่น ๆ รวมเป็นจำนวน 168 โครงการ มูลค่าการลงทุนกว่า 988,948.10 ล้านบาท (สกพอ., 2561) และความต้องการในอุตสาหกรรมโครงสร้างพื้นฐาน (สกพอ., 2564) ระบุว่า อุตสาหกรรมโลจิสติกส์ต้องการกำลังคนรวมทั้งสิ้น 109,910 ตำแหน่ง แต่เมื่อพิจารณาในรายละเอียดแล้ว พบว่า จำนวนดังกล่าวเป็นวิชาชีพที่ปฏิบัติงานเฉพาะในส่วนของการคลังสินค้าหรือจัดการโลจิสติกส์

ภายในองค์กรเท่านั้น โดยไม่รวมถึงจำนวนพนักงานขับรถบรรทุก ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการเชื่อมโยงระบบโลจิสติกส์ของพื้นที่ ESDZ ให้เป็นโครงข่ายที่สมบูรณ์

ดังนั้นการพัฒนาพื้นที่ ESDZ จึงจำเป็นต้องพิจารณากำลังคนในวิชาชีพพนักงานขับรถบรรทุกที่มีทักษะและความรู้ที่เกี่ยวข้องที่ต้องใช้ในการปฏิบัติงาน เพื่อการพัฒนาและเตรียมความพร้อมที่จะก้าวเข้าสู่การรองรับพื้นที่ ESDZ ซึ่งมีความต้องการกำลังคนอย่างมากในภาคอุตสาหกรรม การขนส่ง งานวิจัยนี้จึงได้วิเคราะห์ถึงปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาทักษะของพนักงานขับรถบรรทุกในพื้นที่ ESDZ อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการพัฒนากำลังคนให้มีทักษะ ความรู้ ความสามารถ เพื่อสนับสนุนความต้องการกำลังคนด้านคนขับรถบรรทุกและรองรับระบบโลจิสติกส์ภายในพื้นที่ ESDZ ที่กำลังจะเกิดขึ้นในอนาคต

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

2.1 เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาทักษะของพนักงานขับรถบรรทุกในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก

2.2 เพื่อวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาทักษะของพนักงานขับรถบรรทุกในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาทักษะของพนักงานขับรถบรรทุกในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก ประกอบด้วย 1) การทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 2) การคัดเลือกปัจจัยจากทักษะที่ได้ 3) การเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัย 4) การวิเคราะห์โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) 5) การจัดลำดับความสำคัญของปัจจัย และ 6) การสรุปผลและเสนอแนะ ดังแสดงในภาพที่ 1 ดังนี้

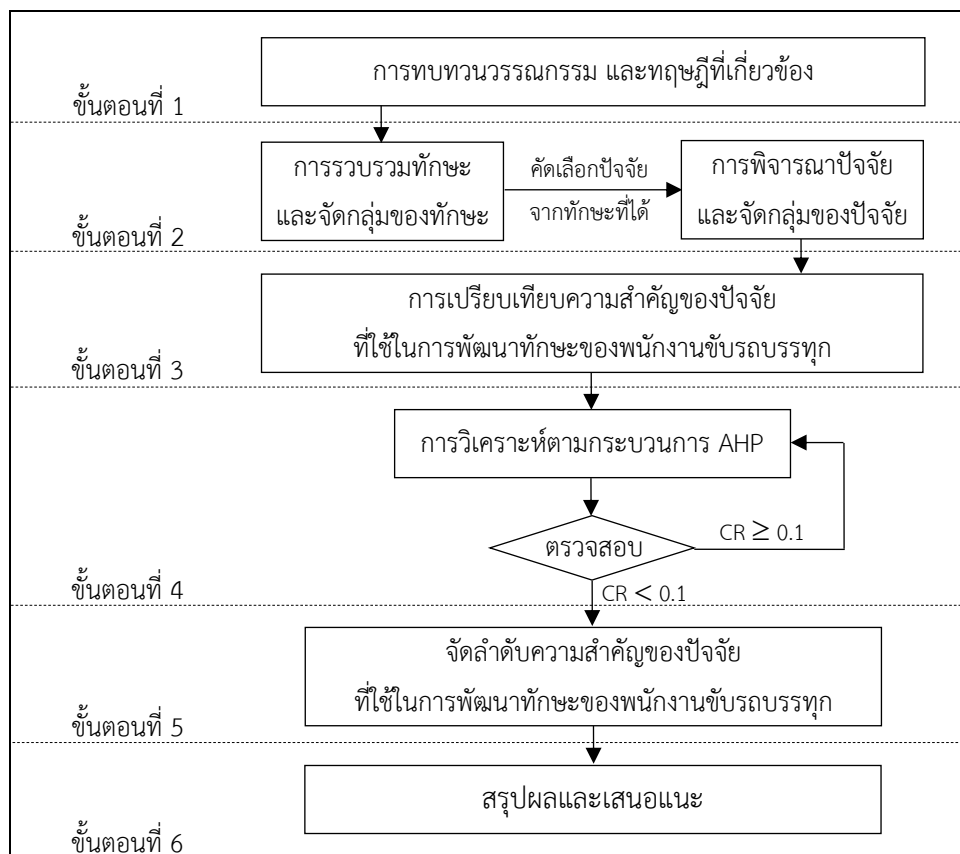
3.1 ขั้นตอนที่ 1: การทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เป็นการทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทักษะต่าง ๆ ของพนักงานขับรถบรรทุก ทฤษฎีของกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytical hierarchy process: AHP) แสดงได้ดังนี้

3.1.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ราชบัณฑิตยสถาน (2542) ได้ให้ความหมายของ ทักษะ หมายถึง ความชำนาญ ซึ่งมาจากคำภาษาอังกฤษว่า Skill นอกจากนี้ คณะกรรมการจัดทำพจนานุกรมศัพท์ศึกษาศาสตร์ร่วมสมัย ยังได้ขยายความของคำว่า ทักษะ (Skill) มากขึ้นว่าหมายถึง ความชำนาญหรือความสามารถในการ

กระทำหรือการปฏิบัติอย่างใดอย่างหนึ่งซึ่งอาจเป็นทักษะด้านร่างกาย สติปัญญา หรือสังคม ที่เกิดขึ้นจากการฝึกฝนหรือการกระทำบ่อย ๆ (สำนักงานราชบัณฑิตยสภา, 2558)



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ณัฐ (2561) ได้อธิบายแนวทางการพัฒนาทักษะของพนักงานขับรถขนส่งและได้แบ่งทักษะออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 คือ ทักษะในการปฏิบัติงานโดยตรง (Hard skill) ประกอบด้วยความสามารถในการขับรถ การใช้และบำรุงรักษารถและอุปกรณ์ส่วนควบต่าง ๆ ของรถ การใช้อุปกรณ์ความปลอดภัยที่จำเป็น การสื่อสารตั้งแต่การพูด การอ่านและการเขียน รวมถึงความรู้ที่เกี่ยวข้องและต้องใช้ในการปฏิบัติงาน และกลุ่มที่ 2 คือ ทักษะเพื่อสนับสนุนให้การปฏิบัติงานดีขึ้น (Soft skill) ประกอบด้วย การคิดอย่างมีเหตุผล มีมนุษยสัมพันธ์และการทำงานร่วมกับผู้อื่นได้ดี การแก้ปัญหาและตัดสินใจ การควบคุมอารมณ์ รวมถึงมีวินัยและความรับผิดชอบ

วิชญะ (2564) ได้ศึกษาพบว่า ทักษะจำเป็นของการทำงานในศตวรรษที่ 21 ประกอบด้วย ทักษะการเรียนรู้ (Learning skills) ทักษะการอ่านออกเขียนได้ (Literacy skills) และทักษะชีวิต (Life skills) เพื่อเตรียมพร้อมรองรับการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว นอกจากจะใช้ในการเพิ่ม

ประสิทธิภาพในการทำงานแล้ว ทักษะต่าง ๆ ยังเป็นพื้นฐานในการดำรงชีวิตเพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดผลกระทบกับตัวเราหรือเกิดผลกระทบน้อยที่สุด

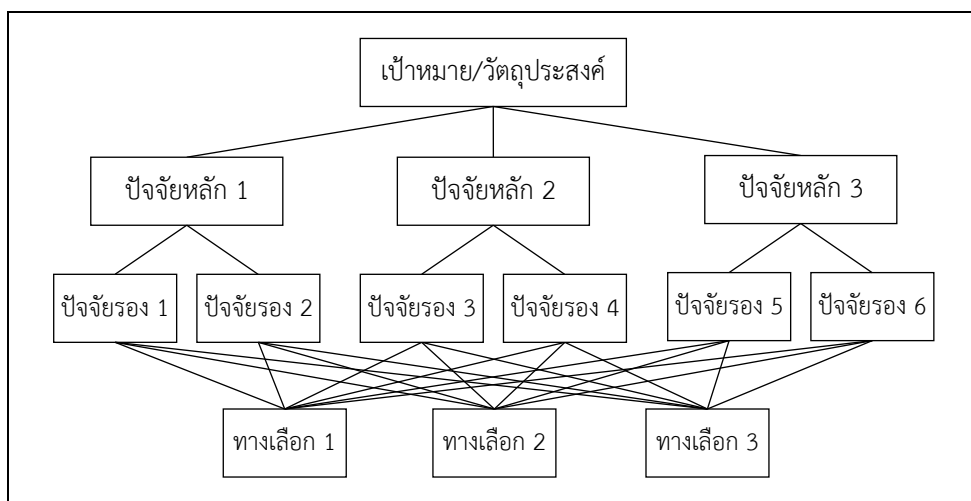
3.1.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การกำหนดและจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ ส่วนใหญ่ก็จะใช้กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) โดยกระบวนการนี้มีจุดเด่นคือ เป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงคู่และมีโครงสร้างที่เป็นแผนภูมิแบบลำดับชั้นที่ง่ายต่อการใช้งานและการทำความเข้าใจ และยังสามารถแสดงผลลัพธ์ออกมาเป็นตัวเลข เพื่อให้ง่ายต่อการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ โดยกระบวนการวิเคราะห์ลำดับชั้นประกอบด้วย 3 ส่วน (Basaran & Keven, 2015), (Kivett, 2016) มีรายละเอียดดังนี้

1) การจำแนกองค์ประกอบของการตัดสินใจออกเป็นส่วนย่อย ๆ (Decomposition): โดยผู้ตัดสินใจมีการจำแนกปัจจัยการตัดสินใจออกเป็นส่วน ๆ เพื่อจัดรูปแบบโครงสร้างการตัดสินใจ (Hierarchy structure) โดยมีโครงสร้างลำดับชั้นในระดับบนจนถึงระดับล่าง ระดับชั้นบนสุด คือ เป้าหมาย หรือปัญหาที่ต้องการตัดสินใจ (Goal) ระดับชั้นที่ 2 คือ เกณฑ์ (Criteria) ระดับชั้นที่ 3 คือ เกณฑ์ย่อย (Sub-criteria) และ ระดับชั้นสุดท้าย คือ ทางเลือก (Alternative) ดังแสดงในภาพที่ 2

2) การจัดลำดับความสำคัญ (Prioritization): หลังจากการสร้างโครงสร้างลำดับชั้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นกระบวนการพิจารณาคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญในแต่ละลำดับชั้นของโครงสร้าง ๆ ในแต่ละระดับชั้นให้พิจารณาเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์ต่าง ๆ ในระดับชั้นเดียวกัน โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบเกณฑ์ หรือทางเลือกทีละคู่ (Pairwise comparison) ดังแสดงในตารางที่ 1

3) การสังเคราะห์ (Synthesis): เมื่อได้ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยทั้งหมดแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสังเคราะห์ โดยทั่วไป AHP จะใช้วิธี “Principle of hierarchy composition” และการตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency) จากนั้นจะเป็นการสังเคราะห์หาค่าน้ำหนักความสำคัญเป็นน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์รวม (Global relative importance) สำหรับการพิจารณาหาทางเลือกที่ดีที่สุดต่อไป



ภาพที่ 2 การจัดลำดับชั้นในการวิเคราะห์

ตารางที่ 1 ระดับความสำคัญ หรือความชอบ (Saaty, 2008)

ระดับความสำคัญ หรือความชอบ (Preference level)	ค่าแสดงเป็นตัวเลข (Numerical value)
เท่ากัน (Equally preferred)	1
เท่ากันถึงปานกลาง (Equally to moderately preferred)	2
ปานกลาง (Moderately preferred)	3
ปานกลางถึงค่อนข้างมาก (Moderately to strongly preferred)	4
ค่อนข้างมาก (Strongly preferred)	5
ค่อนข้างมากถึงมากกว่า (Strongly to very strongly preferred)	6
มากกว่า (Very strongly preferred)	7
มากกว่าถึงมากที่สุด (Very strongly to extremely preferred)	8
มากที่สุด (Extremely preferred)	9

โดยความสอดคล้องของข้อมูลจะต้องตรวจสอบจากค่าสัดส่วนความสอดคล้อง (Consistency ratio: CR) ว่ายอมรับได้หรือไม่ (Saaty, 1980) แสดงได้ดังต่อไปนี้

3.1) สัดส่วนความสอดคล้อง (Consistency ratio: CR) ดังสมการที่ (1)

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

เมื่อ CR คือ ค่าสัดส่วนความสอดคล้อง (Consistency ratio)
 CI คือ ดัชนีความสอดคล้อง (Consistency index)

RI คือ ดัชนีจากการสุ่มตัวอย่าง (Random index)

3.2) ดัชนีความสอดคล้อง (Consistency index: CI) ดังสมการที่ (2) (3) (4)

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n k_i / r_i}{n - 1} \quad (3)$$

$$\begin{vmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & & a_{1n} \\ & a_{21} & \\ & & a_{nn} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_n \end{vmatrix} \quad (4)$$

เมื่อ n คือ ขนาดของสแควร์เมตริกซ์ หรือจำนวนเกณฑ์

3.3) ดัชนีจากการสุ่มตัวอย่าง (Random index: RI)

RI เป็นค่าที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง สามารถหาดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ดัชนีจากการสุ่มตัวอย่าง (Random index: RI) (Saaty, 1980)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

3.2 ขั้นตอนที่ 2: การคัดเลือกปัจจัยจากทักษะที่ได้

เป็นการรวบรวมทักษะต่าง ๆ ที่ได้ นำไปสอบถามหน่วยงานและผู้ประกอบการขนส่งที่เกี่ยวข้อง จำนวน 10 แห่ง โดยใช้วิธีการสัมภาษณ์แบบเชิงลึก (In-depth interview) ใช้แบบสัมภาษณ์ แบบกึ่งมีโครงสร้าง (Semi-structured interview) ในพื้นที่ ESDZ เพื่อเลือกทักษะที่ได้มาทำการพิจารณาหาปัจจัยและจัดกลุ่มของปัจจัยอย่างเหมาะสม แสดงได้ดังนี้

3.2.1 การรวบรวมทักษะและจัดกลุ่มของทักษะ

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่า ทักษะ หมายถึง ความชำนาญ หรือ ความสามารถของบุคคล ซึ่งอาจเป็นทักษะทางด้านร่างกาย สติปัญญา หรือสังคมที่เกิดขึ้นได้จากการเรียนรู้ การฝึกฝน และการทำงานร่วมกับผู้อื่น ดังนั้น การอธิบายและกำหนดทักษะของพนักงานขับรถบรรทุก จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้ 1. ทักษะพื้นฐาน (Basic skill) 2. ทักษะหลัก (Hard skill) และ 3. ทักษะเสริม (Soft skill) โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3



ตารางที่ 3 การรวบรวมและแบ่งกลุ่มทักษะของพนักงานขับรถบรรทุก (กรมการขนส่งทางบก, 2560; 2552; ณัฐ, 2561; ปกรณ์ และคณะ, 2557; ภูมิพิทักษ์ และคณะ, 2559; มารดาร์ตัน, 2554; LeMay & Keller, 2019; Delhomme & Alexandra, 2021; Smidt *et al.*, 2021)

กลุ่มทักษะ	ทักษะ
ทักษะพื้นฐาน (Basic skill)	1. มีทัศนคติและจิตสำนึกในการขับรถอย่างปลอดภัย เช่น มีแนวคิดและทัศนคติในการขับรถปลอดภัย, และมีมารยาทและมนุษยสัมพันธ์ในการขับรถ 2. สามารถเตรียมความพร้อมของสภาพร่างกายและจิตใจของพนักงานขับรถ เช่น สมาธิและความพร้อมก่อนการขับรถ 3. มีอายุ และความชำนาญเพื่อสอบให้ผ่านเกณฑ์การสอบใบขับขี่ 4. มีอายุ ประสบการณ์ และความชำนาญที่ผ่านเกณฑ์การขับรถ 5. มีขีดความสามารถเพียงพอในการปฏิบัติหน้าที่การขับรถ 6. มีประสิทธิภาพในการขับขี่ที่ปลอดภัยและเป็นมิตร 7. มีความเชี่ยวชาญเส้นทาง 8. ผ่านเกณฑ์คุณสมบัติทั่วไปของพนักงานขับรถ 9. ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในการคัดเลือก และการทดสอบ เช่น การทดสอบความรู้ทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ และการสัมภาษณ์ 10. รู้กฎหมายจราจร กฎหมายขนส่งทางบก 11. รู้กฎหมายแพ่ง กฎหมายอาญา กรณีที่เกิดความเสียหายหรือเกิดอุบัติเหตุ 12. มีความพร้อมของร่างกายเพื่อประสิทธิภาพในการขับรถที่ดีและปลอดภัย 13. การปฏิบัติตามบทบาทและหน้าที่ของการเป็นพนักงานขับรถที่ดี 14. การปฏิบัติอย่างเข้าใจและถูกต้องตามกฎหมายจราจร กฎการใช้ถนน และกฎความปลอดภัย 15. ความเชี่ยวชาญในวิชาชีพ โดยการนำความรู้ในวิชาชีพมาประยุกต์ใช้ในการทำงาน 16. ความมุ่งมั่นเพื่อความสำเร็จ ความมุ่งมั่นในการทำงาน เพื่อให้งานมีประสิทธิภาพสูงสุด
ทักษะหลัก (Hard skill)	1. การเตรียมความพร้อมของรถ 2. การประเมิน ควบคุม และแก้ไขสถานการณ์ไม่ปกติและฉุกเฉิน 3. การบริหารความเหนื่อยล้า 4. การขับรถประหยัดน้ำมัน 5. มีความรู้ความสามารถในการขับรถเป็นอย่างดี 6. มีการนำความรู้ไปใช้จริง 7. ใช้ความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ 8. มีความสามารถในการแก้ไขเฉพาะหน้า 9. มีความรับผิดชอบ 10. มีความอิสระในการแก้ไขปัญหา 11. มีความชำนาญในเส้นทาง 12. ความสามารถในการใช้และบำรุงรักษารถและอุปกรณ์ส่วนควบต่าง ๆ ของรถ



กลุ่มทักษะ	ทักษะ
	13. ความสามารถในการใช้อุปกรณ์ความปลอดภัยที่จำเป็น 14. ความสามารถในการสื่อสารตั้งแต่การพูด การอ่านและการเขียน 15. ความรู้ที่ต้องใช้ในการปฏิบัติงาน เช่น กฎหมายจราจร ความรู้เกี่ยวกับสารเคมีและวัตถุอันตราย เป็นต้น 16. การปฏิบัติที่ถูกต้องเมื่อสินค้าเกิดความเสียหายหรือเกิดอุบัติเหตุ 17. การปฏิบัติสำหรับการแจ้งประกันภัย 18. การวางแผนการเดินทาง และกำหนดเวลาพักได้เองอย่างเหมาะสม 19. ขับรถได้อย่างถูกต้องปลอดภัย 20. ตรวจสอบสภาพความพร้อมของรถได้ 21. ขับรถแบบประหยัดเชื้อเพลิงได้ 22. ความสามารถในการปฏิบัติตามจริยธรรมที่กำหนดขึ้น และแสดงออกถึงความซื่อสัตย์ในการทำงาน 23. ความรับผิดชอบต่อสังคม โดยคำนึงถึงคุณภาพชีวิต สุขภาพ ความปลอดภัย 24. ความสามารถในการจำแนกระหว่างข้อมูล ประเด็น ปัญหา แนวคิด หรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างมีเหตุผล
ทักษะเสริม (Soft skill)	1. การตรวจสอบรถก่อนใช้งานแบบ BE-WAGON ตามเกณฑ์ของกรมการขนส่งทางบก 2. การเตรียมพร้อมก่อนการออกรถ 8 ขั้นตอน (บัญญัติ 8 ประการ) ตามเกณฑ์ของกรมการขนส่งทางบก 3. การพัฒนาหรือมีการเรียนรู้เทคโนโลยีสมัยใหม่ 4. มีความพยายามในการพัฒนาวิธีการทำงานของตนเอง 5. มีการพัฒนาความรู้ความสามารถ 6. ได้รับความไว้วางใจจากองค์กร 7. ทักษะในการคิดอย่างมีเหตุผล 8. ทักษะมนุษยสัมพันธ์และการทำงานร่วมกับผู้อื่นได้ดี 9. ทักษะในการแก้ปัญหาและตัดสินใจ 10. ทักษะในการควบคุมอารมณ์ 11. ทักษะในการมีวินัยและความรับผิดชอบ 12. สามารถวางแผนการซ่อม และการบำรุงรักษารถเบื้องต้นได้ด้วยตนเอง 13. สามารถถ่ายทอดงานหรือแนะนำการปฏิบัติงานให้กับลูกน้อง หรือเพื่อนร่วมงานและการทำงานเป็นทีม 14. สามารถใช้อุปกรณ์และเทคโนโลยีสื่อสารได้ 15. ความสามารถในการใช้ภาษา 16. การพัฒนาตนเองให้มีความเชี่ยวชาญในวิชาชีพในระดับที่สูงขึ้นไป 17. ความสามารถในการปรับตัวพร้อมรับการเปลี่ยนแปลง



กลุ่มทักษะ	ทักษะ
	18. แสวงหาความรู้ใหม่ ๆ เพื่อพัฒนาตนเองและทีมงานอยู่เสมอ

3.2.2 การจำแนกปัจจัยและจัดกลุ่มของปัจจัย

จากการรวบรวมทักษะต่าง ๆ ที่ได้จากการศึกษาทบทวน และการสัมภาษณ์เชิงลึก จึงได้แบ่งกลุ่มทักษะออกเป็น 3 กลุ่ม ประกอบด้วย 1) ทักษะพื้นฐาน (Basic skill) 2) ทักษะหลัก (Hard skill) และ 3) ทักษะเสริม (Soft skill) และได้นำไปสอบถามหน่วยงานราชการ ผู้เชี่ยวชาญและผู้ประกอบการขนส่งที่เกี่ยวข้อง จำนวน 10 แห่ง โดยใช้วิธีการสัมภาษณ์แบบเชิงลึก (In-depth interview) ใช้แบบสัมภาษณ์ แบบกึ่งมีโครงสร้าง (Semi-structured interview) ในเขตพื้นที่ ESDZ เพื่อเลือกทักษะที่ได้มาทำการพิจารณาคัดเลือกหาปัจจัยและจัดกลุ่มของปัจจัยอย่างเหมาะสมนั้น สรุปได้ว่าผลการพิจารณาปัจจัย สามารถแบ่งเป็นปัจจัยหลักออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) ปัจจัยพื้นฐาน 2) ปัจจัยหลัก และ 3) ปัจจัยเสริม ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่มีผลต่อการพัฒนาทักษะของพนักงานขับรถบรรทุก

ปัจจัยหลัก	ปัจจัยรอง
ทักษะพื้นฐาน	1. มีอายุ ตามเกณฑ์ การทดสอบความรู้และสอบใบขับขี่รถบรรทุก 2. มีประสบการณ์ และความชำนาญในการขับขี่รถยนต์หรือรถโดยสารมาก่อน 3. มีทัศนคติ มารยาทและจิตสำนึกในการขับอย่างปลอดภัย 4. มีการปฏิบัติอย่างเข้าใจและถูกต้องตามกฎหมายจราจร กฎการใช้ถนน 5. มีความมุ่งมั่นเพื่อความสำเร็จ ความมุ่งมั่นในการทำงาน
ทักษะหลัก	1. สามารถวางแผนการเดินทาง และกำหนดเวลาพักรถได้อย่างเหมาะสม 2. สามารถตรวจสภาพของรถและเตรียมความพร้อมของรถได้ 3. สามารถขับรถได้อย่างปลอดภัยและเป็นมิตรต่อผู้ร่วมเดินทาง 4. สามารถประเมิน ควบคุม และแก้ไขสถานการณ์ไม่ปกติและฉุกเฉินได้ 5. สามารถบริหารจัดการความเหนื่อยล้า และการขับระยะทางที่นานได้
ทักษะเสริม	1. พัฒนาให้สามารถขับรถขนส่งสินค้าวัสดุสารเคมีหรือวัตถุอันตรายได้ 2. พัฒนาการเรียนรู้การตรวจสภาพรถก่อนใช้งานแบบ BE-WAGON 3. พัฒนาการมีมนุษยสัมพันธ์และการทำงานร่วมกับผู้อื่น และการทำงานเป็นทีมได้ 4. พัฒนาทักษะในการแก้ปัญหา การตัดสินใจแบบมีเหตุผล และ การควบคุมอารมณ์ได้ 5. พัฒนาการเรียนรู้และใช้เทคโนโลยีการสื่อสาร หรือเทคโนโลยีสมัยใหม่ได้

3.3 ขั้นตอนที่ 3: การเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัย

เป็นการเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาทักษะของพนักงานขับรถบรรทุก โดยทำการออกแบบสอบถาม AHP การตัดสินใจที่ได้จากการเปรียบเทียบเป็นคู่ (Pairwise comparisons) ขององค์ประกอบการตัดสินใจ นำไปสอบถามผู้เชี่ยวชาญจำนวน 10 คน จากหน่วยงานและผู้ประกอบการขนส่งที่เกี่ยวข้องในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก โดยเป็นการสุ่มตัวแทนจำนวน 10 คนจากภาคส่วนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งจากภาครัฐ ภาคเอกชน และ ภาคการศึกษา โดยมีคุณสมบัติ คือ มีคุณวุฒิตั้งแต่ปริญญาโทขึ้นไป และมีประสบการณ์ด้านการขนส่งและจราจรไม่น้อยกว่า 10 ปี เพื่อให้ค่าน้ำหนักเปรียบเทียบความสำคัญของแต่ละปัจจัยในระดับชั้นเดียวกัน

3.4 ขั้นตอนที่ 4: การวิเคราะห์โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP)

เป็นการวิเคราะห์โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) เพื่อทำการวิเคราะห์ผลจากแบบสอบถาม AHP พร้อมทั้งตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency ratio: CR) โดยค่าสัดส่วนความสอดคล้อง (CR) ที่ยอมรับได้ คือ 0.1 หรือน้อยกว่า หากค่าความสอดคล้องสูงกว่าที่ยอมรับได้ต้องมีการวิเคราะห์เปรียบเทียบใหม่

3.5 ขั้นตอนที่ 5: การจัดลำดับความสำคัญของปัจจัย

เป็นการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาทักษะของพนักงานขับรถบรรทุกในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก ซึ่งงานวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ปัจจัยตามกระบวนการลำดับชั้น (AHP) ซึ่งประกอบด้วย 1) การจำแนกองค์ประกอบของการตัดสินใจออกเป็นส่วนย่อย ๆ 2) การจัดลำดับความสำคัญ (Prioritization) และ 3) การสังเคราะห์ (Synthesis) เมื่อได้ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยทั้งหมดแล้ว ในการศึกษาจะทำการตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency ratio) เท่านั้น โดยจะไม่มีขั้นตอนการสังเคราะห์เพื่อหาค่าน้ำหนักความสำคัญเป็นน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์รวม (Global relative importance) สำหรับพิจารณาหาทางเลือก เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยหลักและปัจจัยรองเท่านั้น

3.6 ขั้นตอนที่ 6: การสรุปผลและเสนอแนะ

เป็นการสรุปผลของงานวิจัยเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากำลังคนให้มีทักษะ ความรู้ ความสามารถและเตรียมความพร้อมที่จะก้าวเข้าสู่การรองรับพื้นที่ ESDZ และเพื่อสนับสนุนความต้องการกำลังคนด้านคนขับรถบรรทุกและรองรับระบบโลจิสติกส์ภายในพื้นที่ ESDZ ที่กำลังจะเกิดขึ้น โดยจะให้อธิบายไว้ในหัวข้อของ “การสรุปผลและการอภิปรายผล” ต่อไป

4. ผลการวิจัย

การให้ค่าน้ำหนักความสำคัญแก่ปัจจัยหลัก และปัจจัยรอง โดยผู้เชี่ยวชาญทั้ง 10 คน มีค่า CR น้อยกว่า 0.1 โดยปัจจัยหลักมีค่า $\lambda_{\max} = 3.091$, CI = 0.045, CR = 0.078 ปัจจัยรอง (ด้านทักษะพื้นฐาน) มีค่า $\lambda_{\max} = 5.056$, CI = 0.014, CR = 0.012 ปัจจัยรอง (ด้านทักษะหลัก) มีค่า $\lambda_{\max} = 5.091$, CI = 0.023, CR = 0.020 และ ปัจจัยรอง (ด้านทักษะเสริม) มีค่า $\lambda_{\max} = 5.200$, CI = 0.050, CR = 0.045 ดังแสดงในตารางที่ 5 ถึง ตารางที่ 8 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5 ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยหลัก

ปัจจัยหลัก	(1)	(2)	(3)	G.M	weight	λ
(1) ทักษะพื้นฐาน	1.000	1.854	1.593	1.435	0.456	3.091
(2) ทักษะหลัก	0.539	1.000	2.116	1.045	0.332	3.091
(3) ทักษะเสริม	0.628	0.473	1.000	0.667	0.212	3.091
รวม				3.147	1.000	

หมายเหตุ: $\lambda_{\max} = 3.091$, CI = 0.045, CR = 0.078

ตารางที่ 6 ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยรอง (ด้านทักษะพื้นฐาน)

ปัจจัยรอง (ด้านทักษะพื้นฐาน)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	G.M	weight	λ
(1) มีอายุ ตามเกณฑ์ การทดสอบความรู้ และสอบใบขับขี่รถบรรทุก	1.000	0.972	0.608	0.600	0.758	0.769	0.149	5.011
(2) มีประสบการณ์ และความชำนาญในการขับขี่รถยนต์หรือรถโดยสารมาก่อน	1.029	1.000	0.707	0.476	0.537	0.714	0.139	5.056
(3) มีทัศนคติ มารยาทและจิตสำนึกในการขับอย่างปลอดภัย	1.644	1.414	1.000	1.029	1.311	1.257	0.244	5.037
(4) มีการปฏิบัติอย่างเข้าใจและถูกต้องตามกฎหมายจราจร กฎการใช้ถนน	1.666	2.102	0.972	1.000	1.041	1.288	0.250	5.018
(5) มีความมุ่งมั่นเพื่อความสำเร็จ ความมุ่งมั่นในการทำงาน	1.320	1.863	0.763	0.960	1.000	1.125	0.218	5.037
รวม						5.153	1.000	

หมายเหตุ: $\lambda_{\max} = 5.056$, CI = 0.014, CR = 0.012

ตารางที่ 7 ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยรอง (ด้านทักษะหลัก)

ปัจจัยรอง (ด้านทักษะหลัก)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	G.M	weight	λ
(1) สามารถวางแผนการเดินทางและกำหนดเวลาพักรถได้อย่างเหมาะสม	1.000	0.451	0.651	0.657	0.509	0.628	0.122	5.091
(2) สามารถตรวจสอบสภาพของรถและเตรียมความพร้อมของรถได้	2.218	1.000	0.846	0.741	0.794	1.020	0.199	5.088
(3) สามารถขับรถได้อย่างปลอดภัยและเป็นมิตรต่อผู้ร่วมเดินทาง	1.537	1.182	1.000	1.277	1.323	1.251	0.244	5.058
(4) สามารถประเมิน ควบคุม และแก้ไขสถานการณ์ไม่ปกติและฉุกเฉินได้	1.522	1.350	0.783	1.000	0.912	1.080	0.210	5.044
(5) สามารถบริหารจัดการความเหนื่อยล้าและการขับรถประหยัคน้ำมันได้	1.966	1.259	0.756	1.096	1.000	1.154	0.225	5.027
รวม						5.134	1.000	

หมายเหตุ: $\lambda_{\max} = 5.091$, CI = 0.023, CR = 0.020

ตารางที่ 8 ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยรอง (ด้านทักษะเสริม)

ปัจจัยรอง (ด้านทักษะเสริม)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	G.M	weight	λ
(1) พัฒนาให้สามารถขับรถขนส่งสินค้าวัสดุสารเคมีหรือวัตถุอันตรายได้	1.000	0.608	0.321	0.454	0.260	0.470	0.084	5.200
(2) พัฒนาการเรียนรู้การตรวจสอบสภาพรถก่อนใช้งานแบบ BE-WAGON	1.644	1.000	0.278	0.382	0.712	0.659	0.118	5.139
(3) พัฒนาการมีมนุษยสัมพันธ์และการทำงานร่วมกับผู้อื่น และการทำงานเป็นทีมได้	3.116	3.597	1.000	0.741	1.149	1.570	0.281	5.134
(4) พัฒนาทักษะในการแก้ปัญหาการตัดสินใจแบบมีเหตุมีผล และการควบคุมอารมณ์ได้	2.203	2.618	1.349	1.000	1.540	1.643	0.294	5.141
(5) พัฒนาการเรียนรู้และใช้เทคโนโลยีการสื่อสารหรือเทคโนโลยีสมัยใหม่ได้	3.845	1.405	0.871	0.649	1.000	1.250	0.224	5.134
รวม						5.593	1.000	

หมายเหตุ: $\lambda_{\max} = 5.200$, CI = 0.050, CR = 0.045



ผลที่ได้จากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญทั้ง 10 คน ด้วยวิธี AHP สามารถคำนวณหาค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลัก โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) ทักษะพื้นฐาน 2) ทักษะหลัก และ 3) ทักษะเสริม มีค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย เท่ากับ 45.6% 33.2% และ 21.2% ตามลำดับ และค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองของแต่ละกลุ่มทักษะ ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยจากวิธี AHP

ปัจจัยหลัก	ค่า น้ำหนัก	ปัจจัยรอง	ค่า น้ำหนัก
ทักษะพื้นฐาน (1)	0.456	มีอายุ ตามเกณฑ์ การทดสอบความรู้และสอบใบขับขี่รถบรรทุก	0.068 (7)
		มีประสบการณ์ และความชำนาญในการขับขี่รถยนต์หรือรถโดยสารมาก่อน	0.063 (9)
		มีทัศนคติ มารยาทและจิตสำนึกในการขับอย่างปลอดภัย	0.111 (2)
		มีการปฏิบัติอย่างเข้าใจและถูกต้องตามกฎหมายจราจร กฎการใช้ถนน	0.114 (1)
		มีความมุ่งมั่นเพื่อความสำเร็จ ความมุ่งมั่นในการทำงาน	0.099 (3)
ทักษะหลัก (2)	0.332	สามารถวางแผนการเดินทาง และกำหนดเวลาพักรถได้เองอย่างเหมาะสม	0.041 (13)
		สามารถตรวจสอบสภาพของรถและเตรียมความพร้อมของรถได้	0.066 (8)
		สามารถขับรถได้อย่างปลอดภัยและเป็นมิตรต่อผู้ร่วมเดินทาง	0.081 (4)
		สามารถประเมิน ควบคุม และแก้ไขสถานการณ์ไม่ปกติและฉุกเฉินได้	0.070 (6)
		สามารถการบริหารจัดการความเหนื่อยล้า และการขับรถประหยัดน้ำมันได้	0.075 (5)
ทักษะเสริม (3)	0.212	พัฒนาให้สามารถขับรถขนส่งสินค้าวัสดุสารเคมีหรือวัตถุอันตรายได้	0.018 (15)
		พัฒนาการเรียนรู้การตรวจสอบสภาพรถก่อนใช้งานแบบ BE-WAGON	0.025 (14)
		พัฒนาการมีมนุษยสัมพันธ์และการทำงานร่วมกับผู้อื่น และการทำงานเป็นทีมได้	0.060 (11)
		พัฒนาทักษะในการแก้ปัญหา การตัดสินใจแบบมีเหตุมีผล และการควบคุมอารมณ์ได้	0.062 (10)
		พัฒนาการเรียนรู้และใช้เทคโนโลยีการสื่อสาร หรือเทคโนโลยีสมัยใหม่ได้	0.047 (12)
รวม	1.000		1.000

หมายเหตุ: ตัวเลขใน () คือ อันดับของปัจจัยภายใต้ปัจจัยในระดับเดียวกัน

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

ผลจากการวิเคราะห์หาปัจจัยและค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาทักษะของพนักงานขับรถบรรทุก ด้วยกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) สามารถสรุปผลได้ว่า ปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาทักษะของพนักงานขับรถบรรทุกในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก ประกอบด้วย 15 ปัจจัยย่อย ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มปัจจัยหลัก ได้แก่ 1) ทักษะพื้นฐาน 2) ทักษะหลัก และ 3) ทักษะเสริม โดยมีค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย เท่ากับ 45.6% 33.2% และ 21.2% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละปัจจัยหลักดังนี้

ทักษะพื้นฐาน (45.6%) ประกอบด้วย 5 ปัจจัยย่อย ได้แก่ 1) มีอายุ ตามเกณฑ์ การทดสอบ ความรู้และสอบใบขับขี่รถบรรทุก 2) มีประสบการณ์ และความชำนาญในการขับขี่รถยนต์หรือรถโดยสารมาก่อน 3) มีทัศนคติ มารยาทและจิตสำนึกในการขับอย่างปลอดภัย 4) มีการปฏิบัติอย่าง เข้าใจและถูกต้องตามกฎหมายจราจร กฎการใช้ถนน และ 5) มีความมุ่งมั่นเพื่อความสำเร็จ ความมุ่งมั่นใน การทำงาน โดยมีค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย เท่ากับ 6.8% 6.3% 11.1% 11.4% และ 9.9% ตามลำดับ โดยข้อมูลจากตัวแทนผู้ให้สัมภาษณ์ส่วนใหญ่ ได้ให้ความสำคัญกับปัจจัยย่อยในด้าน “มีการปฏิบัติอย่างเข้าใจและถูกต้องตามกฎหมายจราจร กฎการใช้ถนน” มากที่สุดในกลุ่มทักษะพื้นฐาน

ทักษะหลัก (33.2%) ประกอบด้วย 5 ปัจจัยย่อย ได้แก่ 1) สามารถวางแผนการเดินทาง และ กำหนดเวลาพักรถได้อย่างเหมาะสม 2) สามารถตรวจสอบสภาพของรถและเตรียมความพร้อมของรถ ได้ 3) สามารถขับรถได้อย่างปลอดภัยและเป็นมิตรต่อผู้ร่วมเดินทาง 4) สามารถประเมิน ควบคุม และ แก้ไขสถานการณ์ไม่ปกติและฉุกเฉินได้ และ 5) สามารถการบริหารจัดการความเหนื่อยล้า และการขับ รถประหยัดน้ำมันได้ โดยมีค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย เท่ากับ 4.1% 6.6% 8.1% 7.0% และ 7.5% ตามลำดับ โดยข้อมูลจากตัวแทนผู้ให้สัมภาษณ์ส่วนใหญ่ ได้ให้ความสำคัญกับปัจจัยย่อยใน ด้าน “สามารถขับรถได้อย่างปลอดภัยและเป็นมิตรต่อผู้ร่วมเดินทาง” มากที่สุดในกลุ่มทักษะหลัก

ทักษะเสริม (21.2%) ประกอบด้วย 5 ปัจจัยย่อย ได้แก่ 1) พัฒนาให้สามารถขับรถขนส่งสินค้า วัสดุสารเคมีหรือวัตถุอันตรายได้ 2) พัฒนาการเรียนรู้การตรวจสอบสภาพรถก่อนใช้งานแบบ BE-WAGON 3) พัฒนาการมีมนุษยสัมพันธ์และการทำงานร่วมกับผู้อื่น และการทำงานเป็นทีมได้ 4) พัฒนาทักษะ ในการแก้ปัญหา การตัดสินใจแบบมีเหตุมีผล และการควบคุมอารมณ์ได้ และ 5) พัฒนาการเรียนรู้ และใช้เทคโนโลยีการสื่อสาร หรือเทคโนโลยีสมัยใหม่ได้ โดยมีค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย เท่ากับ 1.8% 2.5% 6.0% 6.2% และ 4.7% ตามลำดับ โดยข้อมูลจากตัวแทนผู้ให้สัมภาษณ์ส่วนใหญ่ ได้ให้ความสำคัญกับปัจจัยย่อยในด้าน “พัฒนาทักษะในการแก้ปัญหา การตัดสินใจแบบมีเหตุมี ผล และการควบคุมอารมณ์ได้” มากที่สุดในกลุ่มทักษะเสริม

ดังนั้น หน่วยงานภาครัฐ อาทิเช่น กรมการขนส่งทางบก หน่วยงานที่เกี่ยวข้องในกระทรวงคมนาคม และหน่วยงานในภาคเอกชน อาทิเช่น ผู้ประกอบการขนส่งที่เกี่ยวข้อง ควรมีการนำปัจจัย ดังกล่าวในข้างต้นไปใช้สำหรับการวางแผนหลักสูตรการฝึกอบรมเพื่อพัฒนาทักษะของพนักงานขับ รถบรรทุกให้สามารถรองรับระบบโลจิสติกส์ในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเน้นไปที่ปัจจัย 5 อันดับแรกที่มีค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรวมกันสูงถึง 48% ประกอบด้วย 1) มีการปฏิบัติอย่างเข้าใจและถูกต้องตามกฎหมายจราจร กฎการใช้ถนน (11.4%) 2) มีทัศนคติ มารยาท และจิตสำนึกในการขับอย่างปลอดภัย (11.1%) 3) มีความมุ่งมั่นเพื่อความสำเร็จ ความมุ่งมั่นใน การทำงาน (9.9%) 4) สามารถขับรถได้อย่างปลอดภัยและเป็นมิตรต่อผู้ร่วมเดินทาง (8.1%) และ 5) สามารถการบริหารจัดการความเหนื่อยล้า และการขับรถประหยัดน้ำมันได้ (7.5%) ตามลำดับ

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยพะเยา ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยโครงการ “การยกระดับวิชาชีพพนักงานขับรถขนส่งสินค้าและวัสดุ เพื่อรองรับระบบโลจิสติกส์ใน EEC ระยะที่ 1” และขอขอบคุณหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ในเขตพื้นที่พัฒนาพิเศษภาคตะวันออก ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านข้อมูล การให้สัมภาษณ์เชิงลึก และให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- กรมการขนส่งทางบก. (2552). **โครงการพัฒนาศักยภาพการขนส่งด้วยรถบรรทุกเพื่อรองรับการพัฒนาโลจิสติกส์ ปี 2552**. (รายงานฉบับสมบูรณ์). กรุงเทพฯ: กรมการขนส่งทางบก.
- กรมการขนส่งทางบก. (2560). **คู่มือการอบรมหลักสูตรการอบรมด้านความปลอดภัยในการขนส่งสำหรับพนักงานขับรถขนส่ง**. ค้นจาก https://www.dlt.go.th/site/ltsb/m-news/4084/view.php?_did=10098
- ณัฐ นิวัตานนท์. (2561). **การพัฒนาทักษะพนักงานขับรถ**. ค้นจาก http://www.dgtrans.co.th/contentdetail.php?content_id=139
- ปกรณ ตระการวชิรหัตถ์, สมพงษ์ ศิริโสภณศิลป์, และอุบลวรรณ ภวากันท์. (2557). การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการขาดแคลนพนักงานขับรถบรรทุกในระดับอุตสาหกรรมและระดับธุรกิจ. **วารสารการจัดการ**, 3(2), 11-30.
- ภูมิพิทักษ์ ศิลปะสร, ภัทรวรรณ จีรพัฒน์ธนธร, และสุชาวดี เกษมณี. (2559). แนวทางการพัฒนาพนักงานขับรถบรรทุกขนส่งสินค้าในโรงเรียนทักษะพัฒนา เพื่อยกระดับมาตรฐานอาชีพ. **วารสารศึกษาศาสตร์ปริทัศน์**, 31(1), 112-122.
- มารดารัตน์ สุขสง่า. (2554). **ขีดความสามารถหลักที่พึงประสงค์ในการสรรหาและคัดเลือกบุคลากรขององค์กรชั้นนำในประเทศไทย กรณีศึกษา บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)**. (รายงานผลการวิจัย). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.
- ราชบัณฑิตยสถาน. (2542). **พจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2542** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: นานมีบุ๊คส์พับลิเคชั่นส์.
- วิญญะ น้อยมาลา (2564). ทักษะจำเป็นของการทำงานในศตวรรษที่ 21. **วารสารวิชาการรัตนบุศย์**, 3(1), 45-57.
- สำนักงานคณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (สกพอ). (2561). **แผนปฏิบัติการการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน รองรับการพัฒนาเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก**. ค้นจาก <https://www.eeco.or.th/th/infrastructure-development-action-plan/contact-eec>

- สำนักงานคณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (สกพอ). (2564). **อีอีซี โมเดล การพัฒนาทักษะบุคลากร**. ค้นจาก <https://www.eeco.or.th/th/filedownload/2932/2419bf66812ae3a02bb71dc79b226d32.pdf>
- สำนักงานราชบัณฑิตยสภา. (2558). **พจนานุกรมศัพท์ศึกษาศาสตร์ร่วมสมัย ฉบับราชบัณฑิตยสถาน** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักงานราชบัณฑิตยสภา.
- Basaran, B., & Keven, M. (2015). An Analytic Hierarchy Process Application for The Best Driver Selection in Universities. **Challenges of the Knowledge Society**, , 730-738. Retrieved from <https://www.proquest.com/scholarly-journals/analytic-hierarchy-process-application-best/docview/1698605427/se-2>
- Delhomme, P., & Alexandra, G. (2021). Perceived stress, mental health, organizational factors, and self-reported risky driving behaviors among truck drivers circulating in France. **Journal of Safety Research**, 79, 341-351. Doi: 10.1016/j.jsr.2021.10.001
- Kivett, D. (2016). **Clarity of View: An Analytic Hierarchy Process (AHP)-Based Multi-Factor Evaluation Framework for Driver Awareness Systems in Heavy Vehicles**. Retrieved from https://tigerprints.clemson.edu/all_dissertations/1719
- LeMay, S., & Keller, S.B. (2019). Fifty years inside the minds of truck drivers. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, 49(2), 626-643. Doi: 10.1108/IJPDLM-03-2018-0123
- Saaty, T.L. (2008). Decision Making with The Analytic Hierarchy Process. **International Journal of Services Sciences**, 1(1), 83-98.
- Saaty, T.L. (1980). **The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation**. New York: McGraw-Hill.
- Smidt, M., Mitchell, D., & Logan, K. (2021). The Potential for Effective Training of Logging Truck Drivers. **Journal of Agricultural Safety and Health**, 27(1), 29-41. Doi: 10.13031/jash.14084

การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เอบีซีและปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด
เพื่อจัดการสินค้าคงคลังของร้านจำหน่ายวัสดุอุปกรณ์ก่อสร้าง
กรณีศึกษา บริษัทสมนึกอินเตอร์เทรด จำกัด
APPLICATION OF ABC ANALYSIS AND ECONOMICAL ORDER
QUANTITY FOR INVENTORY MANAGEMENT OF
CONSTRUCTION MATERIALS AND EQUIPMENT SUPPLIER:
A CASE STUDY SOMNUEK INTERTRADE CO., LTD.

ฤดี นิยมรัตน์¹, กฤษฎา นาคะวงศ์¹, กษิดิ์เดช แซ่มสายทอง^{1*}

Ruedee Niyomrath¹, Kritsada Nakawong¹, Kasideth Chamsaythong^{1*}

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10300

¹Faculty of Industrial Technology, Suan Sunandha Rajabhat University, Dusit, Bangkok, Thailand, 10300

*Corresponding author e-mail: Kasideth10333@gmail.com

วันที่เข้ารับ 14 ธันวาคม 2565

วันที่แก้ไขบทความ 27 ธันวาคม 2565

วันที่ตอบรับบทความ 28 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์เอบีซีของสินค้าคงคลัง วิเคราะห์หาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด และเพื่อเปรียบเทียบต้นทุนการจัดการสินค้าคงคลังระหว่างรูปแบบปัจจุบันและรูปแบบการสั่งซื้อที่ประหยัด ของร้านจำหน่ายวัสดุและอุปกรณ์ก่อสร้าง กรณีศึกษาบริษัทสมนึกอินเตอร์เทรด จำกัด ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสินค้าคงคลังย้อนหลัง 1 ปี (เดือนพฤษภาคม 2564-เดือนพฤษภาคม 2565) โดยใช้การวิเคราะห์เอบีซี เพื่อจัดกลุ่มสินค้าคงคลังจำนวน 250 รายการ พบว่าสินค้าคงคลังกลุ่ม A มีจำนวน 14 รายการ มีมูลค่า 11,043,728 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 70.02 สินค้ากลุ่ม B จำนวน 83 รายการ มีมูลค่า 3,940,501 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 24.98 และกลุ่ม C จำนวน 153 รายการ มีมูลค่า 788,593 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 5.00 สินค้าคงคลังกลุ่ม A มีค่าสัมประสิทธิ์แปรปรวนน้อยกว่า 0.25 จึงเหมาะสมกับรูปแบบปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด ที่พบว่าจำนวนการสั่งซื้อที่ประหยัดของสินค้าคงคลังกลุ่ม A อยู่ระหว่าง 5-11 ครั้งต่อปี และมีจุดสั่งซื้อใหม่เมื่อสินค้าคงคลังลดจำนวนลงเหลือ 3-18 หน่วยในคลังสินค้า เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบปัจจุบันกับรูปแบบปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดพบว่า รูปแบบปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดสามารถลดต้นทุนในการสั่งซื้อลงได้ 197,386 บาท หรือร้อยละ 58.03 ลดต้นทุนในการเก็บรักษาได้ 5,213 บาท หรือร้อยละ 3.39 โดยรวมลดต้นทุนสินค้าคงคลังได้ 202,581 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 41.02 ต่อปี

คำสำคัญ: การจัดการสินค้าคงคลัง, การวิเคราะห์เอบีซี, ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด, จุดสั่งซื้อใหม่, ร้านจำหน่ายวัสดุอุปกรณ์ก่อสร้าง

Abstract

This research aimed to analyze the ABC of inventory and the economic order quantity (EOQ), and to compare inventory management costs between the current model and the EOQ model of construction materials and equipment supplier: a case study of Somnuek Intertrade Co., Ltd. The analysis of inventory data for the past 1 year (May 2021-May 2022) using ABC analysis to group the inventory of 250 items showed three different groups. In inventory Group A, there were 14 items with a value of 11,043,728 baht or 70.02%. In Group B, there were 83 items, valued at 3,940,501 baht or 24.98%. In Group C, there were 153 items with a value of 788,593 baht or 5.00 percent. Group A inventory had a variability coefficient (VC) of less than 0.25, in which all items were suitable for an EOQ model. It was found that the number of economical orders for Group A inventory ranged from 5-11 times a year, and there was a reorder point (ROP) when the inventory was reduced to 3-18 units in the warehouse. A comparison of the current model with the EOQ model showed that the EOQ model could reduce the cost of ordering by 197,386 baht or 58.03 percent, and the cost of storage by 5,213 baht or 3.39 percent. In total, the cost of inventory was reduced by 202,581 baht or 41.02 percent per year.

Keywords: Inventory management, ABC analysis, Economical order quantity, Reorder point, Construction materials and equipment supplier

1. บทนำ

ปี พ.ศ. 2564-2566 ธุรกิจวัสดุก่อสร้างมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มมากขึ้นตามความต้องการทั้งในและต่างประเทศ อีกทั้งได้รับปัจจัยหนุนจากการขยายตัวร้อยละ 4.9-5.2 ของการลงทุนด้านการก่อสร้างโดยรวมภายในประเทศ ตามการลงทุนในโครงการขนาดใหญ่ของรัฐบาล การขยายเส้นทางคมนาคมขนส่งทางถนนและระบบรางทั่วประเทศ นอกจากนี้การก่อสร้างที่อยู่อาศัยภาคเอกชนมีแนวโน้มฟื้นตัวตามทิศทางเศรษฐกิจหลังวิกฤต COVID-19 รายได้ของผู้ผลิตและผู้จำหน่ายวัสดุก่อสร้างมีแนวโน้มขยายตัว ท่ามกลางการแข่งขันที่รุนแรงทั้งจากผู้ผลิตในประเทศและจากสินค้านำเข้า ผู้ประกอบการค้าวัสดุก่อสร้างของไทยมีจำนวนประมาณ 8,200 ราย แบ่งเป็นผู้ประกอบการ

ขนาดใหญ่ 163 ราย ขนาดกลาง 723 ราย และขนาดเล็ก 7,332 ราย จำแนกได้ 2 กลุ่มตามลักษณะการจำหน่ายและรูปแบบการให้บริการ ได้แก่ผู้จำหน่ายวัสดุก่อสร้างสมัยใหม่ (Modern trade) เป็นร้านวัสดุก่อสร้างที่มีการจัดการอย่างเป็นระบบ ใช้เทคโนโลยีทันสมัย เป็นผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดใหญ่ และกลุ่มผู้ค้าวัสดุก่อสร้างแบบดั้งเดิม (Traditional trade) ได้แก่ร้านค้าวัสดุก่อสร้างที่ระบบการจัดการยังไม่ทันสมัย เน้นลูกค้าในพื้นที่และบริเวณใกล้เคียง แม้ว่าพฤติกรรมผู้บริโภคในปัจจุบันนิยมซื้อสินค้าจากร้านวัสดุก่อสร้างสมัยใหม่ แต่ทั้งนี้ร้านค้าวัสดุก่อสร้างขนาดเล็กแบบดั้งเดิมยังคงมีส่วนแบ่งตลาดร้อยละ 68 ของรายได้รวมในกลุ่มร้านค้าวัสดุก่อสร้างทั้งหมด (พุทธชาติ, 2564)

การเพิ่มโอกาสการแข่งขันให้ร้านวัสดุก่อสร้างแบบดั้งเดิม นอกจากการใช้กลยุทธ์การรวมตัวกันเพื่อสร้างอำนาจการต่อรองกับผู้ผลิต (Suppliers) แก้ปัญหาด้านต้นทุนสินค้าให้สามารถแข่งขันได้ ปรับตัวด้านการดำเนินธุรกิจ การส่งเสริมการตลาด และการติดตามพฤติกรรมผู้บริโภคแล้ว ผลการวิจัยของชัยวัฒน์ (2554) ที่ศึกษาผลกระทบทางธุรกิจของร้านวัสดุก่อสร้างสมัยใหม่ต่อร้านวัสดุก่อสร้างสมัยดั้งเดิม ให้ข้อเสนอแนะว่าร้านค้าวัสดุก่อสร้างแบบดั้งเดิมควรจัดระบบการบริหารสินค้าคงคลังเพื่อลดต้นทุนในการจัดเก็บสินค้า รวมทั้งช่วยให้สามารถหลีกเลี่ยงการเก็บสินค้าไว้นานเกินความจำเป็น เป็นเหตุให้สินค้าล้าสมัย และผู้ประกอบการต้องรับภาระต้นทุนของสินค้าที่ขายไม่ได้นั้น

สอดคล้องกับผลการศึกษาเพื่อเสนอแนวทางในการพัฒนาระบบการจัดการสินค้าคงคลัง ของร้านค้าปลีกก่อสร้างแบบดั้งเดิม ของพรชิตา (2560) ซึ่งพบปัญหาที่เกี่ยวข้องกับระบบการจัดการสินค้าคงคลังจำนวน 3 ด้านคือ (1) ปัญหาด้านกระบวนการทำงาน ได้แก่ปัญหาการสั่งซื้อ การรับสินค้า การรับรายการสั่งซื้อจากลูกค้า และการจัดสินค้าตามรายการสั่งซื้อจากลูกค้า (2) ด้านการจัดเก็บสินค้า เช่น ไม่กำหนดพื้นที่จัดวางสินค้า สินค้าเดียวกันมีราคาแตกต่างกัน วางหลายแห่ง หาสินค้าไม่พบ มีสินค้าชำรุดปะปนกับสินค้าที่พร้อมขาย สินค้ามีฝุ่นละอองเกาะ เป็นต้น และ (3) ด้านบุคลากร จากการทำงานแบบครอบครัว ไม่มีกฎเกณฑ์และมีความยืดหยุ่นสูง ส่งผลให้กำไรต่อหน่วยลดลง เกิดความล่าช้าในการทำงาน สั่งสินค้าซ้ำซ้อนเป็นผลให้มีสินค้ามากเกินความต้องการ เป็นต้น ดังนั้นปริมาณการสั่งซื้อและระยะเวลาในการสั่งซื้อที่เหมาะสมต่อความต้องการของลูกค้าเป็นสิ่งที่ผู้ขายจำเป็นต้องทราบ เพราะหากสั่งสินค้านามากเกินความต้องการ ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาสินค้า มีความเสี่ยงในการหมดอายุของสินค้าทั้งเชิงคุณภาพของสินค้า และความทันต่อสมัยนิยมของผู้บริโภค แต่หากสั่งซื้อสินค้ามาจำนวนน้อยเกินไป จะทำให้จำนวนครั้งการสั่งซื้อเพิ่มมากขึ้น เสียค่าใช้จ่ายเพื่อการจัดซื้อและขนส่ง รวมทั้งเสียโอกาสในการขายเนื่องจากสินค้ามีไม่เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า (พิภพ, 2546)

การจัดการสินค้าคงคลัง (Inventory) และคลังสินค้า (Warehouse) ที่มีประสิทธิภาพ ทำได้โดยใช้การวิเคราะห์เอบีซี (ABC analysis) ซึ่งเป็นที่นิยมและนำมาใช้ในการจัดการสินค้าคงคลังอย่างแพร่หลาย เป็นแนวคิดที่นำมาใช้แบ่งประเภทของสินค้าคงคลังตามมูลค่าและปริมาณของสินค้า ก่อน

นำสู่การควบคุมดูแลให้เหมาะสมสอดคล้องกับสินค้าประเภทนั้น ๆ การนำการวิเคราะห์เอปียีมาใช้เพื่อการจัดการสินค้าคงคลัง สามารถใช้ได้กับลักษณะสินค้าคงคลังหลากหลายชนิด รวมทั้งสามารถนำทฤษฎีอื่นมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน เช่น วีระ (2558) ใช้การวิเคราะห์เอปียีร่วมกับการหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (Economic order quantity; EOQ) เพื่อการสั่งซื้อวัตถุดิบในการผลิตเครื่องถ่างเอกสารและอะไหล่ ที่ช่วยลดต้นทุนสินค้าคงคลังได้ 217,478 บาทต่อปี เช่นเดียวกับ เยาวลักษณ์ และ ชญาพร (2557) ที่พบว่าโรงงานผลิตงานโลหะสามารถเพิ่มอัตราการหมุนเวียนของสินค้าคงคลังได้จาก 2 แนวทางคือการเพิ่มยอดขายและการลดจำนวนสินค้าในคลังสินค้า และเมื่อเปรียบเทียบต้นทุนสินค้าคงคลังพบว่ารูปแบบปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดมีมูลค่าต้นทุนต่ำกว่ารูปแบบปัจจุบัน 22,033,442 บาท

ดังนั้นการควบคุมสินค้าคงคลังที่เหมาะสม นอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพพื้นที่จัดวางสินค้าทั้งในคลังสินค้าและในกระบวนการผลิต (Work in process; WIP) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดเวลาการหยิบสินค้า ลดระยะเวลาการส่งมอบ ช่วยลดต้นทุนสินค้าคงคลัง รวมทั้งช่วยลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับสินค้าคงคลัง ทั้งที่มาจากความเสียหายและสูญหายของสินค้า และลดค่าใช้จ่ายเพื่อการเก็บรักษา อันจะส่งผลให้ผู้ประกอบการมีกำไรเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นความจำเป็นต่อการดำเนินธุรกิจที่ผู้ประกอบการร้านค้าต้องมีมาตรการในการควบคุมสินค้าคงคลังให้เหมาะสมและเพียงพอ

บริษัทสมนึกอินเตอร์เทรด จำกัด ตั้งอยู่ที่ 11/11 หมู่ 1 ตำบลบางโหลง อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ เป็นร้านจำหน่ายเครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อการก่อสร้างมานานกว่า 16 ปี อยู่ในกลุ่มผู้ค้าวัสดุก่อสร้างแบบดั้งเดิม โดยสินค้าของร้านมีจำนวน 250 รายการ แบ่งเป็น 5 ประเภทได้แก่ (1) เครื่องมือช่าง จำนวน 92 รายการ (2) อุปกรณ์ระบบน้ำ จำนวน 45 รายการ (3) เครื่องมือทำความสะอาด จำนวน 38 รายการ (4) อุปกรณ์ก่อสร้าง จำนวน 45 รายการ และ (5) เคมีภัณฑ์ จำนวน 30 รายการ ปัจจุบันบริษัทยังไม่มีกรวิเคราะห์และยังไม่ใช่ระบบการจัดการสินค้าคงคลัง ซึ่งการนำแนวทางการจัดการสินค้าคงคลังด้วยการวิเคราะห์เอปียี ร่วมกับการหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดมาประยุกต์ใช้ในการจัดการสินค้าคงคลัง จะช่วยลดต้นทุนการสั่งซื้อและการจัดเก็บรักษาสินค้า ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการสินค้าคงคลังของบริษัทได้

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อวิเคราะห์เอปียีของสินค้าคงคลัง
- 2.2 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด
- 2.3 เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนการจัดการสินค้าคงคลังระหว่างรูปแบบปัจจุบันและรูปแบบการสั่งซื้อที่ประหยัด

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 เก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสั่งซื้อสินค้าคงคลังของบริษัทสมนึกอินเตอร์เทรด จำกัด ตั้งแต่เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2564 ถึงเดือนพฤษภาคม พ.ศ.2565 รวมระยะเวลา 12 เดือน

3.2 วิเคราะห์เอบีซี (ABC analysis) ด้วยการคำนวณหาร้อยละของมูลค่าสินค้าคงคลังแต่ละรายการ และหาร้อยละสะสมของมูลค่าสินค้าคงคลังแต่ละรายการแล้วจึงจัดกลุ่มสินค้าตามกลุ่ม A, B และ C ดังนี้

3.2.1 สินค้ากลุ่ม A เป็นสินค้าที่มีมูลค่าร้อยละสะสมคิดเป็น 70 ของมูลค่าสินค้าทั้งหมด

3.2.2 สินค้ากลุ่ม B เป็นสินค้าที่มีมูลค่าร้อยละสะสมคิดเป็น 25 ของมูลค่าสินค้าทั้งหมด

3.2.3 สินค้ากลุ่ม C เป็นสินค้าที่มีมูลค่าร้อยละสะสมคิดเป็น 5 ของมูลค่าสินค้าทั้งหมด

3.3 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แปรปรวน (Variability coefficient; VC) ของสินค้าคงคลังกลุ่ม A โดยมีสูตรการหาค่าสัมประสิทธิ์แปรปรวนตามสมการที่ (1) (ภราภรณ์, 2559)

$$VC = \frac{\text{Est.varD}}{(\bar{d})^2} \quad (1)$$

โดยที่ VC คือ ค่าสัมประสิทธิ์แปรปรวน

$\bar{d}$ คือ ความต้องการเฉลี่ยต่อช่วงเวลา คำนวณได้ตามสมการที่ (2)

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (2)$$

Est. varD คือ ความแปรปรวนต่อช่วงเวลา คำนวณได้ตามสมการที่ (3)

$$\text{Est. varD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 - (\bar{d})^2 \quad (3)$$

3.4 วิเคราะห์ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (EOQ) ของสินค้าคงคลัง กลุ่ม A ตามขั้นตอนดังนี้

3.4.1 คำนวณหาค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อ (Ordering cost) ต่อปี ประกอบด้วย (1) ค่าแรงของพนักงาน (2) ค่าวัสดุสิ้นเปลือง (3) ค่าใช้จ่ายในการสื่อสาร (4) ค่าใช้จ่ายอุปกรณ์เครื่องเขียน และ (5) ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์สำนักงาน มีสูตรในการคำนวณตามสมการที่ (4)

$$\text{ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อต่อปี (บาท)} = \left[\frac{D}{Q} \right] S \quad (4)$$



3.4.2 คำนวณค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษา (Carrying cost) ประกอบด้วย (1) เงินลงทุน (2) ค่าภาษี (3) ค่าประกันภัย (4) ค่าเช่าคลังสินค้า (5) ค่าขนส่งเคลื่อนย้าย (6) ค่าบริหารและการควบคุม (7) ค่าวัสดุเสื่อมสภาพ และ (8) ค่าวัสดุขาดหาย มีสูตรการคำนวณตามสมการที่ (5)

$$\text{ค่าใช้จ่ายในการรักษาต่อปี (บาท)} = \left[\frac{Q}{2} \right] H \quad (5)$$

3.4.3 วิเคราะห์หาปริมาณสั่งซื้อที่ประหยัด มีสูตรการคำนวณตามสมการที่ (6) (ค่านาย, 2553)

$$EOQ = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \quad (6)$$

โดยที่	EOQ	คือ	ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดต่อครั้ง (หน่วย)
	D	คือ	ปริมาณความต้องการสินค้าต่อปี (หน่วย)
	S	คือ	ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อต่อปี (บาท)
	H	คือ	ค่าใช้จ่ายการเก็บรักษาต่อหน่วยต่อปี (บาท)
	Q	คือ	ปริมาณการสั่งซื้อต่อครั้ง (หน่วย)

3.5 เปรียบเทียบการสั่งซื้อรูปแบบปัจจุบันและรูปแบบปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด

3.6 คำนวณหาจุดสั่งซื้อใหม่ (Reorder point; ROP) ของสินค้าคงคลังกลุ่ม A มีสูตรการคำนวณตามสมการที่ (7) (ค่านาย, 2553)

$$ROP = d \times L \quad (7)$$

โดยที่	d	คือ	ความต้องการของสินค้า/จำนวนวันทำงาน
	L	คือ	เวลารอคอยสินค้า (วัน)

4. ผลการวิจัย

4.1 วิเคราะห์เอเปซีเพื่อจัดกลุ่มสินค้าคงคลัง

ข้อมูลสินค้าคงคลังของบริษัทสมนึกอินเตอร์เทรด จำกัด ระหว่างเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2564 ถึงเดือนพฤษภาคม พ.ศ.2565 มีจำนวนทั้งหมด 250 รายการ โดยมีมูลค่าการสั่งซื้อรวมตลอดปี 15,772,822 บาท จากการจัดกลุ่มสินค้าตามมูลค่าการสั่งซื้อด้วยการวิเคราะห์เอเปซี พบว่า สินค้าคงคลังกลุ่ม A มีจำนวนน้อยสุด คือ 14 รายการ คิดเป็นร้อยละ 5.6 ของรายการสินค้าทั้งหมด แต่มีมูลค่าการสั่งซื้อรวมมากที่สุด คือ 11,043,728 บาท หรือคิดเป็นมูลค่าร้อยละ 70.02 สินค้ากลุ่ม B มีจำนวนรองลงมาคือ 83 รายการ คิดเป็นร้อยละ 33.2 ของรายการสินค้าสินค้าคงคลังทั้งหมด โดยมีมูลค่าการสั่งซื้อรวม 3,940,501 บาท หรือคิดเป็นมูลค่าร้อยละ 24.98 และสินค้ากลุ่ม C มีจำนวนมากที่สุด คือ 153 รายการ คิดเป็นร้อยละ 61.2 ของรายการสินค้าคงคลังทั้งหมด แต่มีมูลค่าการสั่งซื้อรวมน้อยที่สุดคือ 788,593 บาท หรือคิดเป็นมูลค่าร้อยละ 5.00 แสดงตามตารางที่ 1 โดยสินค้าคงคลังกลุ่ม A ทั้ง 14 รายการ มีรายละเอียดแสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ผลการจัดกลุ่มสินค้าตามมูลค่าการสั่งซื้อด้วยการวิเคราะห์เอเปซี

กลุ่ม	จำนวนรายการ	มูลค่าการสั่งซื้อ (บาท)	ร้อยละมูลค่า สะสม	สัดส่วน (ร้อยละสะสม)
A	14	11,043,728	70.02	70.02
B	83	3,940,501	24.98	95.00
C	153	788,593	5.00	100.00
รวม	250	15,772,822	100	-

ตารางที่ 2 รายการสินค้าคงคลังกลุ่ม A จากการวิเคราะห์เอเปซี

ลำดับ	รายการสินค้า (รหัส)	ราคาต่อ หน่วย (บาท)	ปริมาณการ ใช้ต่อปี (หน่วย)	ราคารวม (บาท)	ร้อยละ มูลค่า	ร้อยละ มูลค่า สะสม
1	เครื่องตัดคอนกรีต (TS-420)	30,300	43	1,302,900	8.26	8.26
2	สายไฟ (07-0425)	590	2,120	1,251,648	7.94	16.20
3	ถังตกไขมัน (GTP-3000)	41,000	26	1,066,000	6.76	22.95
4	เหล็กทรงน้ำ 6 มม. (8115075)	3,520	270	950,400	6.03	28.98



ลำดับ	รายการสินค้า (รหัส)	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ปริมาณการใช้ต่อปี (หน่วย)	ราคารวม (บาท)	ร้อยละมูลค่า	ร้อยละมูลค่าสะสม
5	เมนเบรกเกอร์ (MB-30)	7,070	120	848,400	5.38	34.36
6	เหล็กรางน้ำ 5 มม. (ST-560)	1,682	500	841,000	5.33	39.69
7	ไม้อัด (W-8815)	780	1,050	819,000	5.19	44.88
8	เหล็กกล่อง (ST-320)	1,390	550	764,500	4.85	49.73
9	เครื่องพ่นสี (AR-650)	13,800	55	759,000	4.81	54.54
10	ใบตัดเหล็ก (14-066T)	7,640	87	664,680	4.21	58.75
11	กาวพียู (G-600)	363	1,500	544,500	3.45	62.20
12	เครื่องปั่นไฟ (KT-3500)	15,180	35	531,300	3.37	65.57
13	เครื่องเจาะคอนกรีต (DZZ031)	7,360	45	331,200	2.10	67.68
14	รถเข็นเครื่องคอนกรีต (FW-20)	14,200	26	369,200	2.34	70.02

4.2 วิเคราะห์ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดและจุดสั่งซื้อใหม่

4.2.1 ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์แปรปรวนของสินค้าคงคลังกลุ่ม A พบว่าสินค้าคงคลังทั้ง 14 รายการ มีค่าสัมประสิทธิ์แปรปรวนน้อยกว่า 0.25 หมายถึง มีความต้องการสินค้าคงคลังคงที่ ดังแสดงตามตารางที่ 3

4.2.2 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อ (Ordering cost) สินค้าคงคลังของบริษัทสมนึกอินเตอร์เทรด จำกัด นาน 12 เดือน (เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2564-พฤษภาคม พ.ศ. 2565) เป็นเงิน 55,4061 บาท โดยค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อต่อครั้งเป็นเงิน 1,231 บาท แสดงรายละเอียดตามตารางที่ 4

4.2.3 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษา (Carrying cost) สำหรับสินค้าคงคลังของบริษัทสมนึกอินเตอร์เทรด จำกัด พบว่าค่าใช้จ่ายเพื่อการเก็บรักษารวมร้อยละ 23 ประกอบด้วย ค่าเงินลงทุนร้อยละ 6 ค่าภาษีร้อยละ 2 ค่าประกันภัยร้อยละ 1 ค่าขนส่งเคลื่อนย้ายร้อยละ 2 ค่าบริหารและการควบคุมร้อยละ 3 ค่าวัสดุเสื่อมสภาพร้อยละ 6 และค่าวัสดุขาดหายร้อยละ 3 โดยไม่มีค่าใช้จ่ายในการเช่าคลังสินค้า



ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์แปรปรวนสินค้าคงคลังกลุ่ม A

ลำดับ	รายการสินค้า	ปริมาณสั่งซื้อ (หน่วย)	d_i^2	Variability Coefficient (VC)
1	TS-420	56	806	0.03
2	07-0425	2,675	1,575,625	0.10
3	GTP-3000	45	337	0.16
4	8115075	300	15,600	0.04
5	MB-30	146	2,528	0.07
6	ST-560	605	46,725	0.02
7	W-8815	1,260	181,550	0.03
8	ST-320	740	72,150	0.05
9	AR-650	64	546	0.07
10	14-066T	100	2,314	0.16
11	G-600	1,700	293,000	0.22
12	KT-3500	42	288	0.14
13	DZZ031	60	564	0.10
14	FW-20	49	381	0.11

4.2.4 ผลการคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (EOQ) ของสินค้าคงคลังกลุ่ม A พบว่า มีจำนวนการสั่งซื้ออยู่ระหว่าง 5-11 ครั้งต่อปี และเมื่อกำหนดให้ค่าเฉลี่ยวันทำงานของบริษัทสมนึก อินเทอร์เน็ต จำกัด เป็นปีละ 335 วัน และระยะในเวลาในการรอสินค้า 3 วัน พบว่ามีสินค้าจำนวน 9 รายการ ที่มีจำนวนสินค้าคงคลังในระดับต่ำสุด เพื่อพิจารณาสั่งซื้อใหม่ หรือจุดสั่งซื้อใหม่ (Reorder point) เท่ากับ 3 หน่วยจำนวน 9 รายการ และจุดสั่งซื้อใหม่ของสินค้าคงคลังที่สูงที่สุดคือ 18 หน่วย มีจำนวน 1 รายการ แสดงตามตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อ

รายการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)
1. ค่าแรงของพนักงาน (จำนวน 5 คน)	474,000
2. ค่าใช้จ่ายวัสดุสิ้นเปลือง	9,787
3. ค่าใช้จ่ายในการสื่อสาร	32,364
4. ค่าใช้จ่ายอุปกรณ์เครื่องเขียน	500
5. ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาอุปกรณ์สำนักงาน	37,410
รวมค่าใช้จ่าย (บาท)	554,061
จำนวนใบสั่งซื้อ (PO)	450
ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อต่อครั้ง	1,231

ตารางที่ 5 ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดและจุดสั่งซื้อใหม่ของสินค้าคงคลังกลุ่ม A

รายการสินค้า	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ความต้องการสินค้าต่อปี (หน่วย)	ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อต่อครั้ง (บาท)	ค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาต่อปี (บาท)	ปริมาณการสั่งซื้อต่อครั้ง (หน่วย)	จำนวนการสั่งซื้อที่ประหยัดต่อปี (ครั้ง)	จุดสั่งซื้อใหม่(หน่วย)
		(D)	(S)	(H)	(EOQ)	(D/EOQ)	(ROP)
1. TS-420	30,300	43	1,231	6,969	4	11	3
2. 07-0425	590	2,120	1,231	135.7	196	11	18
3. GTP-3000	41,000	26	1,231	9,430	3	10	3
4. 8115075	3,520	270	1,231	809.6	28	10	3
5. MB-30	7,070	120	1,231	1,626	13	10	3
6. ST-560	1,682	500	1,231	386.86	56	9	6
7. W-8815	780	1,050	1,231	179.4	120	9	9
8. ST-320	1,390	550	1,231	319.7	65	9	6
9. AR-650	13,800	55	1,231	3,174	7	8	3
10. 14-066T	7,640	87	1,231	1757.2	11	8	3
11. G-600	363	1,500	1,231	83.49	210	7	15
12. KT-3500	15,180	35	1,231	3,491	5	7	3
13. DZZ031	7,360	45	1,231	1,692	8	6	3
14. FW-20	14,200	26	1,231	3,266	5	5	3
รวม	144,875	6,427	17,234	33,320	-	-	-

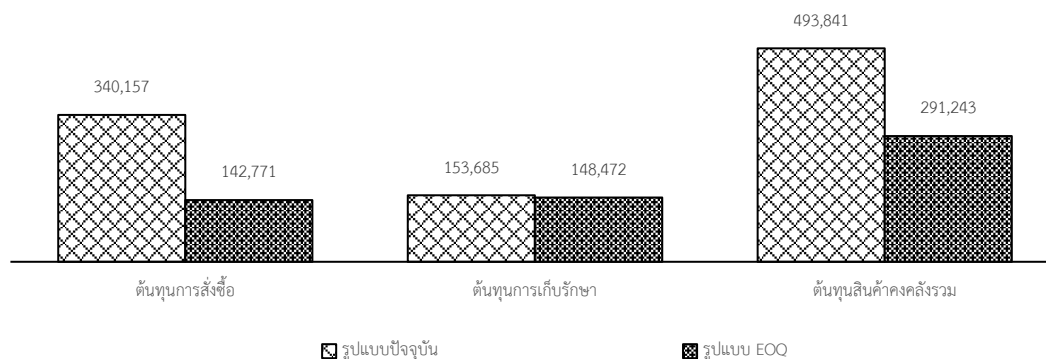


4.3 เปรียบเทียบต้นทุนการจัดการสินค้าคงคลังระหว่างรูปแบบปัจจุบันและรูปแบบการสั่งซื้อที่ประหยัด

เมื่อพิจารณาผลรวมของค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อต่อปี และค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาของสินค้าคงคลังกลุ่ม A สามารถเปรียบเทียบต้นทุนในการสั่งซื้อ ต้นทุนในการเก็บรักษา และต้นทุนสินค้าคงคลังรวมตลอดปีของสินค้าแต่ละชนิดแสดงตามตารางที่ 6 ซึ่งพบว่า รูปแบบปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด สามารถลดต้นทุนได้รวม 202,581 บาทต่อปี คิดเป็นร้อยละ 41.02 ดังแสดงกราฟการเปรียบเทียบตามภาพที่ 1

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบต้นทุนรวมแบบปัจจุบันและรูปแบบปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด

รายการสินค้า	แบบปัจจุบัน			แบบปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (EOQ)		
	ต้นทุน การสั่งซื้อ ต่อปี (บาท)	ต้นทุน การเก็บ รักษาต่อปี (บาท)	รวมต้นทุน สินค้าคง คลังต่อปี (บาท)	ต้นทุน การสั่งซื้อ ต่อปี (บาท)	ต้นทุน การเก็บ รักษาต่อปี (บาท)	รวมต้นทุน สินค้าคง คลังต่อปี (บาท)
1. TS-420	7,562	24,392	31,953	13,233	13,938	27,171
2. 07-0425	49,240	8,526	57,766	13,315	13,299	26,613
3. GTP-3000	6,401	23,575	29,976	10,669	14,145	24,814
4. 8115075	22,158	8,200	30,358	11,870	11,334	23,205
5. MB-30	29,544	4,065	33,609	11,363	10,569	21,932
6. ST-560	55,955	6,500	62,455	10,991	10,832	21,823
7. W-8815	35,904	7,516	43,420	10,771	10,764	21,535
8. ST-320	18,299	5,914	24,213	10,416	10,390	20,806
9. AR-650	6,771	15,870	22,641	9,672	11,109	20,781
10. 14-066T	26,774	6,400	33,174	9,736	9,665	19,401
11. G-600	52,757	5,890	58,647	8,793	8,766	17,559
12. KT-3500	21,543	9,450	30,993	8,617	8,728	17,345
13. DZZ031	3,693	12,690	16,383	6,924	6,768	13,692
14. FW-20	3,556	14,697	18,253	6,401	8,165	14,566
รวม	340,157	153,685	493,841	142,771	148,472	291,243



ภาพที่ 1 กราฟเปรียบเทียบต้นทุนสินค้าคงคลังแบบปัจจุบัน
และรูปแบบปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลการจัดกลุ่มสินค้าคงคลังของบริษัทสมนึกอินเตอร์เทรด จำกัด ด้วยการวิเคราะห์เอปซี พบว่ามีสินค้าคงคลังทั้งหมด 250 รายการ เป็นกลุ่ม A จำนวน 14 รายการ คิดเป็นร้อยละ 5.6 ของจำนวนสินค้าทั้งหมด มีมูลค่าการสั่งซื้อ 11,043,728 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 70.02 ของมูลค่าสินค้าคงคลังทั้งหมด กลุ่ม B มีจำนวน 83 รายการ คิดเป็นร้อยละ 33.2 ของจำนวนสินค้าทั้งหมด มีมูลค่าการสั่งซื้อ 3,940,501 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 24.98 ของมูลค่าสินค้าคงคลังทั้งหมด และกลุ่ม C มีจำนวน 153 รายการ คิดเป็นร้อยละ 61.2 ของจำนวนสินค้าทั้งหมด มีมูลค่าการสั่งซื้อ 788,593 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 5.00 ของมูลค่าสินค้าคงคลังทั้งหมด และการสั่งซื้อรวมตลอดปีเป็นเงิน 15,772,822 บาท

5.1.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดของสินค้าคงคลังกลุ่ม A จำนวน 14 รายการ พบว่าการสั่งซื้อรูปแบบการวิเคราะห์ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด มีค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อ 142,771 บาทต่อปี ค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษา 148,472 บาทต่อปี มีต้นทุนรวมสินค้าคงคลัง 291,243 บาทต่อปี ส่วนการสั่งซื้อรูปแบบปัจจุบันมีค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อ 340,157 บาทต่อปี ค่าจ่ายในการเก็บรักษา 153,685 บาทต่อปี และมีต้นทุนรวมสินค้าคงคลัง 493,841 บาท เมื่อเปรียบเทียบพบว่าสามารถรูปแบบการสั่งซื้อที่ประหยัดลดต้นทุนสินค้าคงคลังรวมได้ 202,598 บาทต่อปี คิดเป็นร้อยละ 41.02

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

การวิจัยเรื่องการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เอปซีเพื่อจัดการสินค้าคงคลังของร้านจำหน่ายวัสดุก่อสร้าง กรณีศึกษาบริษัทสมนึกอินเตอร์เทรด จำกัด มีข้อค้นพบจากผลการวิเคราะห์เอปซี ที่

จำแนกหมวดหมู่สินค้าคงคลังจำนวน 250 รายการ เป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่ม A, B และ C จำนวนสินค้าคงคลัง 14, 83 และ 153 รายการตามลำดับ มีร้อยละของมูลค่าสินค้า 70.02, 24.98 และ 5.00 ตามลำดับ รวมทั้งการจัดการสินค้าคงคลังตามรูปแบบปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดช่วยลดต้นทุนการสั่งซื้อได้ร้อยละ 58.03 หรือ 197,386 บาทต่อปี ลดต้นทุนการเก็บรักษาได้ร้อยละ 3.39 หรือ 5,213 บาทต่อปี หากพิจารณาต้นทุนสินค้าคงคลังรวมต่อปีสามารถลดต้นทุนได้ร้อยละ 41.02 หรือ 202,598 บาทต่อปี ซึ่งสอดคล้องกับการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เอบีซี การหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (EOQ) ในการจัดการสินค้าคงคลังที่ช่วยลดต้นทุนสินค้าคงคลังประเภทสินค้าสำเร็จรูปได้ร้อยละ 26.79 (กิ่งกาญจน์ และนพปฎล, 2559) ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการจัดการยาคงคลังของโรงพยาบาลรัฐได้ร้อยละ 21.23 (จันทร์เพ็ญ และคณะ, 2563) และลดมูลค่าการจัดเก็บสินค้าคงคลังของบริษัทผลิตโคมไฟพลาสติกได้ร้อยละ 25.95 (กชกร และคณะ, 2563)

นอกจากผลการวิจัยได้แนวทางการจัดหมวดหมู่สินค้าคงคลังจากผลของการวิเคราะห์เอบีซี ปริมาณการสั่งซื้อสินค้าต่อครั้ง (Economic order quantity; EOQ) จำนวนการสั่งซื้อที่ประหยัดต่อปี และจำนวนสินค้าคงคลังระดับต่ำสุดที่เหมาะสมเพื่อการสั่งซื้อใหม่ (Reorder point; ROP) ที่ช่วยลดต้นทุนการจัดการสินค้าคงคลังดังกล่าวข้างต้นแล้ว หากนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับการจัดการคลังสินค้า โดยเฉพาะรายการสินค้าคงคลังที่มีมูลค่าสูง มีความต้องการสูง และมีความเคลื่อนไหวหมุนเวียนสูงสุด ได้แก่สินค้ากลุ่ม A ที่ควรจัดวางตำแหน่งสินค้าในคลังสินค้าใกล้ประตูหรือทางเข้าออก เพื่อลดระยะเวลาและลดระยะทางในการหยิบ ดึงเช่นการปรับปรุงผังคลังสินค้าภายหลังการจัดกลุ่มสินค้าตามปริมาณความต้องการขายด้วยการวิเคราะห์เอบีซี ช่วยลดเวลาในการขนย้ายได้ร้อยละ 27.27 (ชยุตม์, 2561) และเมื่อนำแนวคิดการวิเคราะห์เอบีซีมาใช้ในการปรับปรุงตำแหน่งการจัดเก็บโดยอ้างอิงความถี่ในการหยิบเบิกสินค้า ช่วยลดระยะทางการหยิบเบิกลงร้อยละ 24.09 ลดระยะเวลาการทำงานล่วงเวลาลง และลดต้นทุนค่าล่วงเวลาลงด้วยเช่นกัน (วิญญู และพงศธร, 2565)

6. กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานและการเผยแพร่งานวิจัยได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา และบริษัทสมนึกอินเตอร์เทรด จำกัด

7. เอกสารอ้างอิง

กชกร เจียมสง่า, ศิริลักษณ์ เอกตระกูล, วรณลักษณ์ เหล่าทวีทรัพย์ และสุพิชชา ชีวพฤกษ์. (2563).

การจัดการสินค้าคงคลัง กรณีศึกษา บริษัทผลิตโคมไฟพลาสติก. วารสารข่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรมไทย, 6(1), 19-28.

- กึ่งกาญจน์ พลิกะ และนพปฎล สุวรรณทรัพย์. (2559). การบริหารสินค้าคงคลังโดยการประยุกต์ใช้
ทฤษฎี ABC Classification Analysis เทคนิค EOQ Model และวิธี Silver-Meal: กรณีศึกษา
บริษัท XYZ. วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์, 11(1),
102-114.
- ค่านาย อภิปรัชญาสกุล. (2553). การจัดการสินค้าคงคลัง = Inventory management.
กรุงเทพฯ: โฟกัสมีเดีย แอนด์ พับลิชชิง.
- จันทร์เพ็ญ อนุรัตน์นันท, ประจวบ กล่อมจิตร, พัทธธีรา พรหมทอง และรจเรข เลขกุล. (2563). การ
จัดตารางการสั่งซื้อยาในโรงพยาบาลรัฐ กรณีศึกษาโรงพยาบาลสิรินธร. วารสารข่าวงาน
วิศวกรรมอุตสาหกรรมไทย, 6(2), 8-19.
- ชยุตม์ บรรเทงจิตร. (2561). การประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์ในการออกแบบผัง
คลังสินค้าเพื่อลดเวลาในการขนถ่ายวัสดุ. วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต, 8(3), 1-14.
- ชัยวัฒน์ ชันดี. (2554). การศึกษาผลกระทบทางธุรกิจของร้านวัสดุก่อสร้างสมัยใหม่ต่อร้านวัสดุก่อสร้างสมัยดั้งเดิมในเขตอำเภอเมืองฯ จังหวัดอุดรธานี. วารสารวิทยาลัยบัณฑิตศึกษาการจัดการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 4(2), 89-112.
- พรชิตา หุทัยวรกุล. (2560). แนวทางในการพัฒนาระบบการจัดการสินค้าคงคลังของร้านค้าปลีก
ก่อสร้างแบบดั้งเดิม: กรณีศึกษาร้าน พ สุวรรณภูมิ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต).
มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพฯ.
- พิภพ ลลิตาภรณ์. (2546). การบริหารของคลังระบบ MRP และ ROP (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ:
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- พุทธชาติ ลุนคำ. (2564). วิจัยกรุงศรี แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2564-2566: ธุรกิจวัสดุก่อสร้าง. ค้นจาก <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/Construction-Construction-Materials/Construction-Materials/IO/io-construction-materials-21>.
- ภราภรณ์ ทศพร. (2559). การปรับปรุงการบริหารวัตถุดิบคงคลัง กรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยาน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- เยาวลักษณ์ ซาหนองหว่า และชญาพร ฑีฆาอุตมากร. (2557). การเพิ่มประสิทธิภาพการบริหาร
สินค้าคงคลังของบริษัท ซี.เอส.สตีล โปรดักส์ จำกัด. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต).
มหาวิทยาลัยรามคำแหง, กรุงเทพฯ.
- วิญญู ปรอยกระโทก และพงศธร คำควร. (2565). การปรับปรุงรูปแบบการจัดเก็บและการหยิบเบิก
สินค้าวางกองในคลังสินค้า: กรณีศึกษาบริษัทผู้ให้บริการโลจิสติกส์ในอุตสาหกรรม



เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์. วารสารวิทยาลัยโลจิสติกส์และซัพพลายเชน, 8(1), 34-48.

วีระ จรัสศิริรัตน์. (2558). การศึกษาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมในการสั่งซื้อวัตถุดิบ กรณีศึกษา บริษัทผลิตเครื่องถ่ายเอกสารและอะไหล่. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี.

การจำแนกความสุกของผลกาแฟด้วยการประมวลผลภาพปริภูมิสี COFFEE RIPENESS CLASSIFICATION WITH HSV IMAGE PROCESSING

ศิริเรือง พัฒน์ช่วย^{1*}, อาทิตย์ อยู่เย็น¹, มหศักดิ์ เกตุฉำ²

Siriruang Phatchuay^{1*}, Arthit Yooyen¹, Mahasak Ketcham²

¹คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ ประเทศไทย 77110

²คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขตบางซื่อ

กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10800

¹Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin,
Hua Hin, Prachuap Khiri Khan, Thailand, 77110

²Faculty of Information Technology and Digital Innovation, King Mongkut's University of Technology North
Bangkok, Bangsue, Bangkok, Thailand, 10800

*Corresponding author e-mail: Siriruang.pha@rmutr.ac.th

วันที่เข้าระบบ 1 ธันวาคม 2565

วันที่แก้ไขบทความ 28 ธันวาคม 2565

วันที่ตอบรับบทความ 29 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการจำแนกความสุกของผลกาแฟจากภาพถ่าย โดยวิธีจำแนกจากความสุก 4 แบบ คือ สีแดง-สุก สีเหลือง-กึ่งสุกกึ่งดิบ สีเขียว-ดิบ สีนํ้าตาล-สุกมาก โดยวิเคราะห์จากคุณลักษณะของสีด้วยการประมวลผลภาพ ซึ่งขั้นตอนการวิจัยประกอบไปด้วย 1) การแปลงค่าสีจาก RGB เป็นปริภูมิสี HSV 2) การตรวจจับสีที่อยู่ในช่วงสี HSV ที่กำหนด 3) การตรวจจับรูปทรงของวัตถุ และ 4) การตีกรอบวัตถุ ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบด้านความแม่นยำในการจำแนกผลกาแฟจากภาพถ่าย พบว่า 1) สีแดง-สุก มีประสิทธิภาพ 97% 2) สีเหลือง-กึ่งสุกกึ่งดิบ มีประสิทธิภาพ 95.67% 3) สีเขียว-ดิบ และ 4) สีนํ้าตาล-สุกมาก มีประสิทธิภาพ 100% ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 98.17% มีประสิทธิภาพอยู่ในระดับสูงมาก สามารถสรุปได้ว่าวิธีการจำแนกความสุกของผลกาแฟจากภาพถ่ายจะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการนำไปใช้ในการพัฒนาเครื่องคัดแยกสีของผลกาแฟ

คำสำคัญ: การจำแนกประเภท, ความสุก, ผลกาแฟ, การประมวลผลภาพ, ปริภูมิสี HSV

Abstract

The research aimed to present a method for determining the coffee ripeness from photographs in 4 types of ripeness: red (ripe), yellow (half ripe), green (raw) and brown (very ripe) by analyzing color characteristics with image processing. The research process consisted of 4 stages. First, a color was converted from RGB to HSV color space. Second, colors were detected within a given HSV color range. Third, object contours were detected. Fourth, the object was framed. The results of testing the system performance on the accuracy of coffee classification from photographs showed that the efficiency of red (ripe) was 97%, yellow (half ripe) 95.67%, green (raw) and brown (very ripe) 100%. Therefore, the average system efficiency was 98.17%, which was very high. It can be concluded that the methods for determining the coffee ripeness from photographs will be very useful for developing a coffee color sorter.

Keywords: Classification, Ripeness, Coffee, Image processing, HSV color space

1. บทนำ

กาแฟถือเป็นเครื่องดื่มที่เข้าถึงลูกค้าได้เกือบทุกกลุ่ม และเพราะปัจจัยนี้ทำให้ผู้ประกอบการมีการพัฒนาและคิดค้นผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของกาแฟอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคแต่ละกลุ่ม โดยมีการพัฒนาในด้านรสชาติ ความหอมของกลิ่น หรือการนำไปแปรรูปและเป็นส่วนผสมเพื่อเพิ่มสารอาหารที่เกี่ยวข้องแต่ละชนิด ซึ่งทำให้ยกระดับผลิตภัณฑ์สินค้าและเพิ่มคุณค่าให้กับผลิตภัณฑ์ได้ด้วย จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันมีร้านกาแฟเปิดตัวมากมาย โดยอยู่ในรูปแบบคาเฟ่อาจเปิดร้านกาแฟในสวนเพื่อให้ลูกค้าได้สัมผัสบรรยากาศ โดยมีกิจกรรมเสริมเข้ามาในบริเวณของคาเฟ่แบบครบวงจร ซึ่งเมื่อมองในภาพรวมกว้าง บางครั้งพ่อแม่ไม่ได้มีความต้องการอยากกินกาแฟ แต่เมื่อลูกมีความต้องการอยากไปเที่ยว ทำกิจกรรมให้อาหารสัตว์ นั่งรถไฟชมบรรยากาศ ระบายสีภาพวาดท่ามกลางบรรยากาศธรรมชาติ โดยการพยากรณ์และคาดคะเนได้ว่าพ่อแม่อาจจะซื้อกาแฟนั่งกินระหว่างรอลูกทำกิจกรรม ซึ่งถือได้ว่าเป็นลักษณะธุรกิจของกาแฟที่อยู่ในความนิยมของผู้บริโภคในปัจจุบันเป็นอย่างมาก ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงกาแฟสายพันธุ์ที่มีการปลูก โดย นภารัตน์ และคณะ (2565) ได้กล่าวว่า กาแฟที่ได้รับความนิยมอยู่ 2 สายพันธุ์ คือ อราบิก้า (Arabica) และโรบัสต้า (Robusta) สำหรับสายพันธุ์อราบิก้านั้น จะเห็นได้ว่ามีปลูกกันมากทางภาคเหนือของประเทศไทย และสายพันธุ์โรบัสต้าจะนิยมปลูกกันมากทางภาคใต้ของประเทศไทย จากผลการสำรวจจะเห็นได้ว่า จังหวัดชุมพรจะมีพื้นที่ในการปลูกกาแฟมากที่สุด แต่ไม่ได้หมายความว่ากาแฟที่มีขายในท้องตลาดความหอมจะมีกลิ่นเหมือนกัน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ก็เกิดมาจากกระบวนการผลิตตั้งแต่ขั้นตอน

การปลูก ต้องดูแลยังงให้ผลกาแฟมีขนาดใหญ่ การเก็บผลกาแฟต้องเก็บแบบไหน แบบเชอรี่หรือแบบหลากหลายสี การตากต้องตากแบบใด การคั่วใช้ไฟระดับไหน และการบดมีกรรมวิธีอย่างไรล้วนแล้วแต่เป็นปัจจัยของความหอมกรุ่นของกาแฟชวนให้น่าดื่มทั้งสิ้น ดังนั้นการที่จะได้กาแฟที่มีคุณภาพนั้น จำเป็นต้องเริ่มตั้งแต่การปลูก ซึ่งในปัจจุบันเกษตรกรมีการพัฒนาเพื่อก้าวทันเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว เพื่อที่จะนำเทคโนโลยีไปประยุกต์ใช้กับงานตนเอง และในปัจจุบันมีโครงการสนับสนุนมากมาย เช่น การเข้าร่วมโครงการเกษตรรุ่นใหม่ (Smart young farmer) โดย Jansuwan & Zander (2021) กล่าวว่า โครงการ YSF ได้ออกแบบมาเพื่อพัฒนาศักยภาพธุรกิจการเกษตรของเกษตรกรรุ่นใหม่ การพัฒนาแนวทางของโครงการยึดหลักการให้เกษตรกรเป็นศูนย์กลางของการพัฒนา (Bottom-up approach) และอาศัยกระบวนการแบ่งปันความรู้และการสร้างเครือข่ายระหว่างเกษตรกรในทุกจังหวัดของประเทศ ทำให้ได้รับข่าวสารความรู้ด้านอนาคตและทิศทางภาคเกษตรไทย ทำให้ปรับตัวให้ทันกับเทคโนโลยีในอนาคตอีกด้วย

จากที่กล่าวมาถึงกระบวนการของกาแฟนั้น ผู้วิจัยเล็งเห็นว่าการที่จะได้มาซึ่งกาแฟที่มีคุณภาพมีความหอมกรุ่นนั้น ต้องเริ่มตั้งแต่การเก็บเกี่ยวจะต้องเลือกผลที่มีสีแดงสุกหรือเรียกว่า เชอรี่ แต่การเก็บผลกาแฟนั้นในแต่ละรอบเป็นไปไม่ได้ที่จะมีแต่ผลเชอรี่ ล้วนมีสีเขียว เหลือง น้ำตาล ปะปนมาด้วยทุกครั้ง แสดงดังภาพที่ 1 ทำให้เมื่อเข้าสู่กระบวนการตาก ก็จะมีกาแฟสีอื่นร่วมอยู่ด้วย อาจส่งผลให้กาแฟไม่ได้คุณภาพ หรืออีกประเด็นในกรณีที่เกษตรกรนำไปขายให้พ่อค้าคนกลางราคาที่ได้อาจจะต่ำไปด้วย จากประเด็นปัญหาของกระบวนการคัดแยกสีผลเชอรี่ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบจำแนกความสุกของผลกาแฟด้วยการประมวลผลภาพปริภูมิสีจากภาพถ่าย (Dubey & Jalal, 2012; Dubey & Jalal, 2012; Kumari & Gomathy, 2018; Pardede *et al.*, 2019) โดยวิเคราะห์จากคุณลักษณะของสี ได้แก่ การแปลงค่าสีจาก RGB เป็นปริภูมิสี HSV การตรวจสอบค่าสีและเทียบเคียงสี การหาขอบเขตวัตถุ และการตีกรอบวัตถุ โดยจำแนกจากความสุก 4 แบบ คือ สีแดง-สุก สีเหลือง-กึ่งสุกกึ่งดิบ สีเขียว-ดิบ สีน้ำตาล-สุกมาก โดยเกษตรกรก็จะได้ประโยชน์จากจุดนี้ก่อนนำไปขาย ทำให้ยกระดับราคาของผลกาแฟได้ และอีกประเด็นคือ เกษตรกรที่อยู่ในรูปแบบผู้ประกอบการที่ทั้งปลูกและแปรรูปกาแฟเป็นเครื่องดื่ม ก็จะได้ประโยชน์จากการคัดแยกสีของเชอรี่ด้วย จากประเด็นที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นผู้วิจัยเล็งเห็นถึงประโยชน์ของระบบที่พัฒนาขึ้นและหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิธีการนี้จะเป็ประโยชน์อย่างมากสำหรับการพัฒนาเครื่องคัดแยกสีผลกาแฟสำหรับการทำวิจัยต่อยอดในอนาคตต่อไป



ภาพที่ 1 ผลกาแฟสด

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อพัฒนาระบบการจำแนกความสุกของผลกาแฟด้วยการประมวลผลภาพปริภูมิสี
- 2.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบการจำแนกความสุกของผลกาแฟด้วยการประมวลผลภาพปริภูมิสี

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1.1 การประมวลผลภาพ

กวิน และคณะ (2564) กล่าวว่า การประมวลผลภาพ (Image processing) คือ กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลรูปภาพในลักษณะของข้อมูลดิจิทัล โดยการวิเคราะห์จะประมวลผลผ่านคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการคำนวณต่างๆ ที่ทำให้ได้คุณสมบัติทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ ซึ่งในเอกรัตน์ และคณะ (2565) ได้กล่าวไว้สอดคล้องกันว่า การประมวลผลภาพ (Image processing) คือ กระบวนการจัดการและวิเคราะห์ รูปภาพให้เป็นข้อมูลในแบบดิจิทัล โดยใช้ระบบของคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เราต้องการทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ (ขนาด รูปร่าง และสี) หลังจากนั้นสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ และสร้างเป็นระบบต่าง ๆ เช่น ระบบดูแลการจราจรบนท้องถนน ระบบตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตระบบเก็บข้อมูลรถที่เข้าและออกอาคาร ระบบตรวจจับใบหน้า เป็นต้น อีกทั้ง พิศณุ (2564) กล่าวไว้ว่า การประมวลผลภาพจะมีการแปลงสัญญาณภาพจากสัญญาณอนาล็อกที่เป็นสัญญาณที่มีความต่อเนื่องเป็นสัญญาณดิจิทัลที่เป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง โดยจะเริ่มจากแสงตกกระทบกับอุปกรณ์รับแสง และจะแปรรูปข้อมูลเป็นรูปแบบดิจิทัล มีขั้นตอนสำคัญอยู่ 2 ขั้นตอนคือ การสุ่มข้อมูลสัญญาณภาพ (Image sampling) และการควอนไทซ์สัญญาณภาพ (Image quantization)

3.1.2 ปริภูมิสี (HSV)

พิศณุ (2564) กล่าวไว้ว่า ปริภูมิสี (HSV) ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ H หมายถึง Hue หรือสีที่มีค่าที่แตกต่างออกไปตามความถี่ของแสง เช่น แดง เหลือง เขียว น้ำเงิน หรือ ม่วง เป็นต้น S หมายถึง Saturation หรือความอิ่มตัวของ Hue นั้น ๆ เช่น สีแดงและสีชมพู คือ สีแดงเพียงแต่สีชมพูมีความอิ่มตัวน้อยกว่า V หมายถึง Value หรือค่าความสว่างของสี โดยที่ค่า Value ต่ำสุดหมายถึง สีดำ ไม่ว่าจะ Hue หรือ Saturation เท่าใดและค่า Value สูงสุดหมายถึง สีขาว ซึ่งเป็นสีที่สว่างที่สุดของ Hue และ Saturation นั้น ๆ เช่น Hue ใดๆ มีค่า Saturation มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ Value สูงที่สุดคือ สีเหลืองและ Value ต่ำสุดคือ สีดำ อีกทั้ง บอย และนรภัทร (2564) กล่าวว่า ตำแหน่งแรก คือค่าสีของสีหลัก (Hue) หรือเรียกว่าเฉดสี โดยตำแหน่งที่สอง คือ ความบริสุทธิ์ของสี (Saturation) และตำแหน่งที่สาม คือ ความสว่างของสี (Value) ซึ่งสามารถวัดได้โดยความเข้มของความสว่างของแต่ละสี โดยผลลัพธ์จะอยู่ในรูปแบบภาพไบนารี (Binary Image) หรือเรียกอีกอย่างว่า หน้ากาก (Mask) โดยสีขาว คือ พิกเซล (Pixel) ที่มีระดับค่าสีอยู่ในช่วงที่กำหนด และเนื้อที่ส่วนพิกเซล อื่นจะมีลักษณะเป็นสีดำ

3.1.3 โมเดลสีอาร์จีบี (RGB color model)

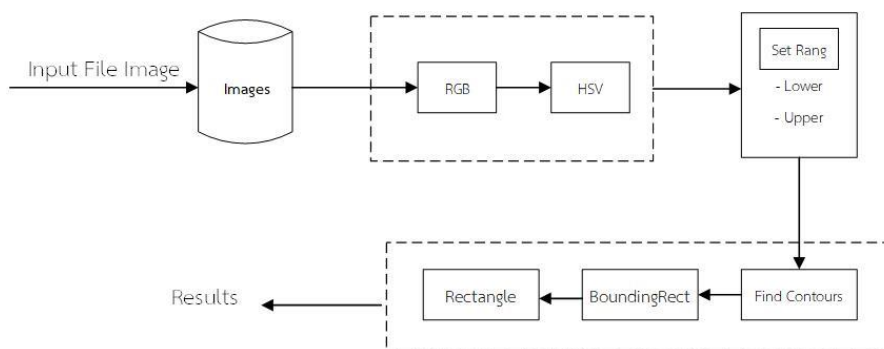
อรอุมา (2564) ได้กล่าวว่า โมเดลสีอาร์จีบี (RGB color model) ประกอบด้วยแม่สีของแสง 3 สี คือ สีแดง (Red) สีเขียว (Green) และสีน้ำเงิน (Blue) แต่ละสีจะถูกแยกเป็นช่อง ซึ่งเป็นโมเดลสีที่นำไปใช้ในประเภทจอแสดงผล เช่น จอทีวี จอคอมพิวเตอร์ โดยลักษณะของรูปแบบของช่องสีจะแสดงเป็นระนาบ (Plane) ซึ่งความสามารถในการแสดงผลขึ้นอยู่กับจำนวนบิตที่ใช้เก็บค่าพิกเซล โดยปัจจุบันใช้ระบบสีละ 8 บิต ในแต่ละระนาบพิกเซลจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 255 โดย ค่า 0 หมายถึง ความมืด และค่า 255 หมายถึง ความสว่าง โดยแม่สีทั้ง 3 เมื่อนำมารวมกันจะให้ค่าสีขาว

3.2 กรอบแนวคิดงานวิจัย

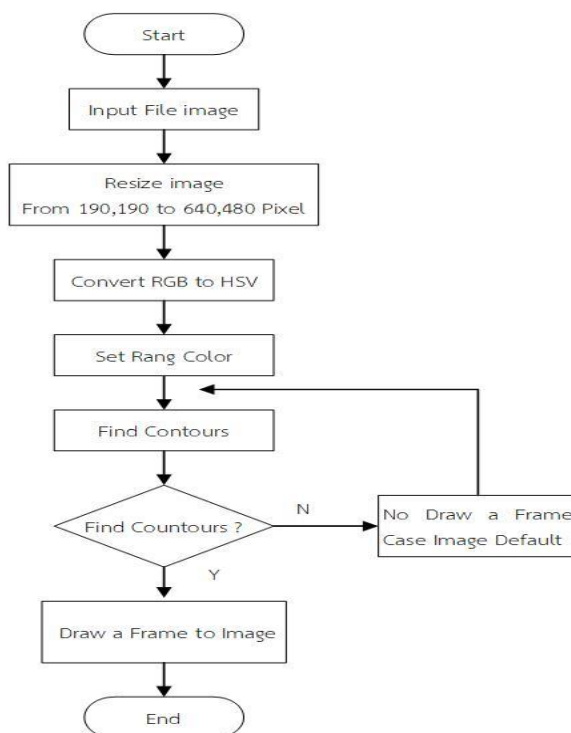
การทำงานของภาพรวมงานวิจัยของการจำแนกความสุขของผลกาแฟด้วยการประมวลผลภาพปริภูมิสีมีกรอบแนวคิดขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วยขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 2

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบจำแนกความสุขของผลกาแฟ โดยเขียนโปรแกรมใช้งาน OpenCv ผ่านภาษา Python โดยแสดงผังระบบการทำงาน (Flowchart) แต่ละขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัยซึ่งประกอบด้วย 1) การรับไฟล์ภาพ 2) การปรับปรุงคุณภาพของภาพจากไฟล์ภาพต้นฉบับ 3) การแปลงค่าสีจาก RGB เป็นปริภูมิสี HSV 4) การตรวจจับสีที่อยู่ในช่วงสี HSV ที่กำหนด 5) การตรวจจับรูปทรงของวัตถุ และ 6) การตีกรอบวัตถุ แสดงดังภาพที่ 3



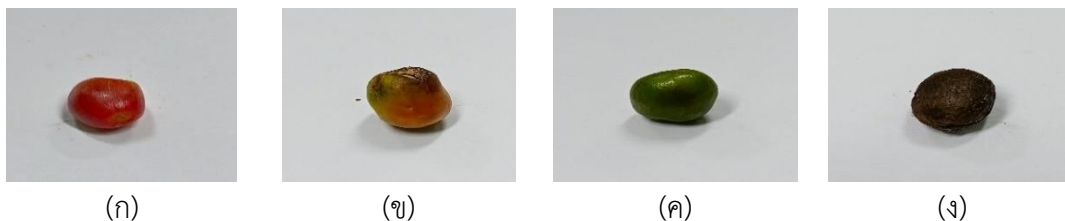
ภาพที่ 2 กรอบแนวคิดการจำแนกความสุกของผลกาแฟ



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการจำแนกความสุกของผลกาแฟ

3.3.1 ขั้นตอนที่ 1 การรับไฟล์ภาพ (Input file image)

ในขั้นตอนนี้เป็นการนำเข้าไฟล์ภาพถ่ายผลกาแฟแต่ละสีโดยไฟล์ภาพทั้งหมด 1,500 ภาพและเลือกทดสอบโดยใช้ไฟล์ภาพจำนวน 1,200 ภาพ โดยแบ่งสีละ 300 ภาพ คือ สีแดง-สุก สีเหลือง-กึ่งสุกกึ่งดิบ สีเขียว-ดิบ สีนํ้าตาล-สุกมาก ตามลำดับ โดยไฟล์ภาพนามสกุล JPEG พื้นหลังสีขาว และขนาดของภาพเท่ากับ 190*190 พิกเซล โดยไฟล์ภาพต้นฉบับของผลกาแฟทั้ง 4 แบบ แสดงดังภาพที่ 4

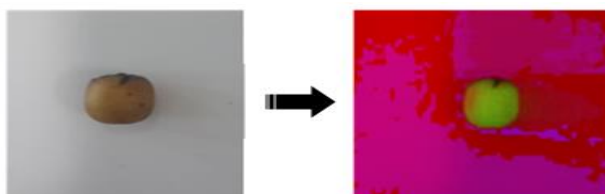


ภาพที่ 4 ไฟล์ภาพต้นฉบับของผลกาแพทั้ง 4 แบบ

(ก) แดง-สุก (ข) เหลือง-กึ่งสุกกึ่งดิบ (ค) สีเขียว-ดิบ (ง) สีนํ้าตาล-สุกมาก

3.3.2 การปรับปรุงคุณภาพของภาพจากไฟล์ภาพต้นฉบับเท่ากับ 190×190 พิกเซล ให้มีขนาดมาตรฐานเท่ากับ 640×480 พิกเซล เนื่องจากไฟล์ต้นฉบับมีขนาดเล็กเกินไปทำให้เกิดค่าผิดพลาดในการตีกรอบวัตถุและอ่านค่าระดับสี จึงต้องขยายขนาดภาพ เพื่อเข้าสู่กระบวนการแปลงค่าสีจาก RGB เป็น HSV

3.3.3 การแปลงภาพ RGB ที่รับเข้ามาให้เป็น HSV เพื่อง่ายต่อการคัดกรองสีในขอบเขตที่ต้องการ โดยใช้คำสั่ง `cv2.cvtColor` และกระบวนการตรวจสอบสีจะใช้ไฟล์ภาพที่ทำการแปลงเป็น HSV แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การแปลงภาพจาก RGB เป็น HSV

3.3.4 การกำหนดค่าสีเป็นขั้นตอนของการนำภาพที่ทำการแปลงเป็น HSV แล้ว มาทำการเทียบเคียงสีกับในระบบโดยแสดงระดับค่าสีตั้งค่าไว้ 4 ระดับ ดังนี้

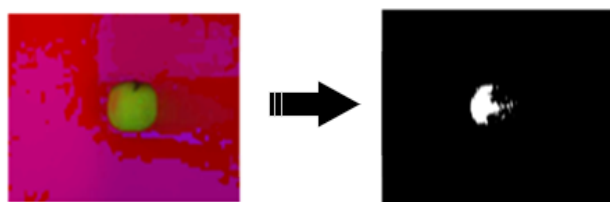
ตารางที่ 1 การกำหนดระดับค่าสี 4 ระดับ

ชนิดสี	ค่าสีต่ำสุด (HSV)	ค่าสีสูงสุด (HSV)
Red	[0, 50, 50]	[8, 255, 255]
Yellow	[15, 25, 25]	[25, 255, 255]
Green	[34, 50, 50]	[38, 255, 255]
Brown	[0, 0, 0]	[[0, 50, 50]

ซึ่งในการกำหนดระดับค่าสีโดยใช้โครงสร้างอาร์เรย์ (Array) ภายในจะประกอบไปด้วยค่าของ H คือค่าสี S ค่าความบริสุทธิ์ และ V ค่าความสว่าง ซึ่งจะใช้อาร์เรย์ (Array) 2 ชุดในการกำหนดช่วงของสี คือ ชุดของ Lower คือค่าสีต่ำสุด และใช้ Upper เป็นค่าสีสูงสุดที่ต้องการ ดังนั้นหากระดับค่าสีมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ จะถูกตรวจจับทั้งสิ้น โดยกำหนดระดับค่าสีอยู่ที่ช่วง 34-38 ซึ่งเป็นช่วงเฉดสีของสีเขียว-ดิบ ช่วง 15-25 ซึ่งเป็นช่วงเฉดสีของสีเหลือง-กึ่งสุกกึ่งดิบ และช่วง 0-8 ซึ่งเป็นช่วงเฉดสีของสีแดง-สุก และสีน้ำตาล-สุกมาก จะเป็น 0 - 0 และปรับความบริสุทธิ์ และความสว่าง ให้อยู่ในช่วงของสีของผลกาแพ

3.3.5 การตรวจจับสีที่อยู่ในช่วงสี HSV ที่กำหนด

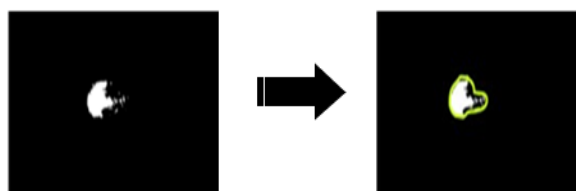
โดยจะใช้คำสั่ง cv2.inRange เพื่อนำภาพมากำหนดระดับสีกับภาพที่แปลงเป็น HSV ออกมา โดยใช้ค่าสีต่ำสุด (Lower) กับ ค่าสีสูงสุด (Upper) เป็นช่วงของสีที่ต้องการ แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การตรวจจับสีที่อยู่ในช่วงสี HSV ที่กำหนด

3.3.6 การตรวจจับรูปทรงของวัตถุ

ในขั้นตอนของการตรวจจับรูปทรงของวัตถุใช้คำสั่ง cv2.findContours กับตัวแปรภาพถ่ายผลกาแพที่ทำการเซ้ระดับค่าสีไว้ โดยแสดงเป็นเส้นสีเหลืองตามขอบเขตของผลกาแพ โดยระบบจะอ่านค่าสีแต่ละพิกเซลที่ได้ติกรอบสีเหลืองไว้ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับช่วงค่าสีแม่แบบที่บันทึกไว้แล้วหาค่าเฉลี่ยของค่าสีที่อ่านได้ว่าตรงกับสีใด และใช้คำสั่ง cv2.contourArea ในการเก็บค่าสีของวัตถุเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การตรวจจับรูปทรงของวัตถุ

3.3.7 การตีกรอบวัตถุ

ในส่วนขั้นตอนนี้จะทำการ เก็บค่าตำแหน่งแกน (x,y) และค่าความกว้างความสูง (w,h) ของวัตถุนั้นๆ ด้วยคำสั่ง cv2.boundingRect จากนั้นจะนำค่าตำแหน่งแกน (x,y) และความกว้างความสูง (w,h) ไปสร้างกรอบสีแดงลงบนตำแหน่งของภาพ ด้วยคำสั่ง cv2.rectangle และทำการแสดงภาพที่มีกรอบสีแดงล้อมรอบกรอบของวัตถุ โดยเลือกเฉพาะพิกเซล (Pixel) ที่อยู่ในกรอบของผลกาแพเท่านั้นเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ว่าผลกาแพจัดอยู่ในช่วงสีอะไรตามที่ได้กำหนดระดับค่าสี ไว้ 4 ระดับ จากการเก็บตัวอย่างของสีเมล็ดกาแพ จากสีอ่อนไปยังสีเข้มของแต่ละช่วงสีของเมล็ดกาแพ ถือเป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการจำแนกสีผลกาแพแสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การตีกรอบวัตถุ

4. ผลการวิจัย

การทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกความสุกของผลกาแพด้วยการประมวลผลภาพปริภูมิสี โดยการทดลอง ณ อาคารคณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี บริเวณ ชั้น 6 สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล โดยแบ่งเป็นการทดสอบสีผลกาแพ 4 แบบ คือ สีแดง-สุก สีเหลือง-กึ่งสุกกึ่งดิบ สีเขียว-ดิบ สีน้ำตาล-สุกมาก โดยใช้ไฟล์ภาพจำนวน 1,200 ภาพ โดยแบ่งภาพสีผลกาแพละ 300 ภาพ และแสดงค่าความถูกต้องแม่นยำ โดยรวมแสดงดังตารางที่ 2 และนำเสนอการทดลองเป็น Confusion Matrix เพื่อจะได้ทราบว่าในส่วนที่จำแนกผิดนั้น ได้จำแนกเป็นกาแพสีอะไร แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 การจำแนกความสุกของผลกาแพด้วยการประมวลผลภาพปริภูมิสี

สีผลกาแพ	จำนวนภาพ ที่ทดสอบ	จำนวนภาพที่ จำแนกได้	จำนวนภาพที่ จำแนกไม่ได้	ความถูกต้อง โดยรวม (%)
สีแดง-สุก	300	291	9	97%
สีเหลือง-กึ่งสุกกึ่งดิบ	300	287	13	95.67%
เขียว-ดิบ	300	300	0	100%
สีน้ำตาล-สุกมาก	300	300	0	100%
ค่าเฉลี่ยรวม				98.17%

ตารางที่ 3 การจำแนกความสุกของผลกาแฟเป็น Confusion matrix

	สีแดง-สุก	สีเหลือง-กึ่ง สุกกึ่งดิบ	เขียว-ดิบ	สีน้ำตาล- สุกมาก	Precision
สีแดง-สุก	291	0	0	9	0.97
สีเหลือง-กึ่งสุกกึ่งดิบ	0	287	13	0	0.96
เขียว-ดิบ	0	0	300	0	1.00
สีน้ำตาล-สุกมาก	0	0	0	300	1.00
Recall	1.00	1.00	0.96	0.97	

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 การพัฒนาระบบการจำแนกความสุกของผลกาแฟด้วยการประมวลผลภาพปริภูมิสี

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบจำแนกความสุกของผลกาแฟ โดยกระบวนการทำงานในส่วนของการประมวลผลภาพด้วยการวิเคราะห์จากคุณลักษณะของสี ได้แก่ 1) การแปลงค่าสีจาก RGB เป็นปริภูมิสี HSV 2) การตรวจจับสีที่อยู่ในช่วงสี HSV ที่กำหนด 3) การตรวจจับรูปทรงของวัตถุ และ 4) การตีกรอบวัตถุ โดยกระบวนการวิเคราะห์คุณลักษณะของสีผลการแฟ ในส่วนการทำงานของการทำงาน RGB และ HSV นั้นมีความสอดคล้องกับ วีระยุทธ และคณะ (2564) โดยได้ศึกษาการจำแนกความสุกของกล้วยฉาบ และดำเนินการศึกษาลักษณะของความเหมาะสมของกล้วยในกระทะที่สุกกรอบมีสีที่น่ารับประทาน โดยนำเทคนิคการประมวลผลภาพในส่วนการวิเคราะห์จากคุณลักษณะสี ได้แก่ แบบจำลอง RGB และ HSV เพื่อได้ข้อมูลสำหรับนำไปทำเครื่องทอดกล้วยกึ่งอัตโนมัติ โดยประสิทธิภาพความถูกต้องของการจำแนกสีจากภาพถ่ายเท่ากับ 86.27% ซึ่งระบบการจำแนกความสุกของผลกาแฟด้วยการประมวลผลภาพปริภูมิสี ที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถนำผลการวิจัยไปใช้กับเครื่องจำแนกระดับความสุกของผลกาแฟแบบสายพานลำเลียงโดยประยุกต์ใช้งานร่วมกับบอร์ด Raspberry Pi ซึ่งเป็นบอร์ดควบคุมการทำงานหลักของฮาร์ดแวร์ เพื่อสั่งงานให้โซลินอยด์ A โซลินอยด์ B และโซลินอยด์ C ในการตีผลกาแฟแต่ละสีตามที่พัฒนาไว้ในส่วนของการพัฒนาซอฟต์แวร์ อีกทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านการเกษตรในการจำแนกความสุกของพืชผลชนิดอื่นต่อไปได้ในอนาคต

5.2 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบการจำแนกความสุกของผลกาแฟด้วยการประมวลผลภาพปริภูมิสี

งานวิจัยนี้ใช้ประเด็นในการทดสอบโดยมีรายละเอียดหัวข้อในการทดสอบ คือ สีของผลกาแฟ จำนวนภาพที่ทดสอบ จำนวนภาพที่จำแนกได้ จำนวนภาพที่จำแนกไม่ได้ และความถูกต้องโดยรวม (%) โดยผลของการจำแนกผิวนั้นเกิดจากสีของผลกาแฟมีลักษณะสีเหลือง-กึ่งสุกกึ่งดิบ กับสีเขียว-

ดิบ เนื่องจากผลของกาแพบางลูกไม่ได้เหลืองทั้งหมดมีลักษณะสีเขียวอยู่บ้างเล็กน้อย ทำให้ผลการทดสอบมีความผิดพลาดอยู่ระดับหนึ่ง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ สีผลกาแพ มี 4 แบบ คือ 1) แดง-สุกใช้ภาพ 300 โดยภาพที่จำแนกได้ 291 จำแนกไม่ได้ 9 คิดเป็นค่าความถูกต้องโดยรวม 97% 2) สีเหลือง-กึ่งสุกกึ่งดิบใช้ภาพ 300 โดยภาพที่จำแนกได้ 287 จำแนกไม่ได้ 13 คิดเป็นค่าความถูกต้องโดยรวม 95.67% 3) สีเขียว-ดิบ ใช้ภาพ 300 โดยภาพที่จำแนกได้ 100 จำแนกไม่ได้ 0 คิดเป็นค่าความถูกต้องโดยรวม 100% และ 4) สีน้ำตาล-สุกมาก ใช้ภาพ 300 โดยภาพที่จำแนกได้ 300 จำแนกไม่ได้ 0 คิดเป็นค่าความถูกต้องโดยรวม 97% ซึ่งผลจากค่าความถูกต้องโดยรวมทั้ง 4 แบบ สรุปค่าเฉลี่ยรวมประสิทธิภาพของระบบอยู่ที่ 98.17% ซึ่งมีความสอดคล้องกับ ธนโชติ และคณะ (2565) ซึ่งได้กล่าวสรุปไว้ในตารางการทดสอบการคัดแยกขยะรีไซเคิล ดังนี้ ประเภทขยะมี 4 แบบ คือ 1) กระป๋อง ใช้ภาพ 50 โดยภาพคัดแยกสำเร็จได้ 48 คัดแยกไม่สำเร็จ 2 ความถูกต้องเท่ากับ 96% 2) ขวดแก้ว ใช้ภาพ 50 โดยภาพคัดแยกสำเร็จได้ 49 คัดแยกไม่สำเร็จ 1 ความถูกต้องเท่ากับ 98% 3) กล่องกระดาษใช้ภาพ 50 โดยภาพคัดแยกสำเร็จได้ 50 คัดแยกไม่สำเร็จ 0 ความถูกต้องเท่ากับ 100% และ 4) ขวดพลาสติกใช้ภาพ 50 โดยภาพคัดแยกสำเร็จได้ 50 คัดแยกไม่สำเร็จ 0 ความถูกต้องเท่ากับ 100%

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีรัตนโกสินทร์ที่ให้ทุนสนับสนุนประจำปีงบประมาณ 2560 สัญญาเลขที่ A86/2560 และขอขอบคุณข้อมูลจากไร้อธรรมโชติในการให้ข้อมูลและผลกาแพสำหรับใช้ในการดำเนินวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

กวิณ ชินพงศ์, อสมา ตั้งปรมัตถ์สกุล, ธัญรดา โพธิ์พระรส, ทศพร บุญชู, ปกรณ์ ล่องทอง, พร พันธุ์จรรยา และพิรุฑย์ เขียววิชัย. (2564). การสกัดคุณลักษณะเอปีซีดีเพื่อประเมินความเสี่ยงโรคผิวหนังเมลาโนมาด้วยการ ประมวลผลภาพ: การทบทวนวรรณกรรม. **วารสารวิชาการราชวิทยาลัยจุฬาภรณ์**, 3(4), 230-245.

ธนโชติ ภาชนะนัย, จักรกริช ปานเงิน, กรรณิการ์ คนงาน, วรชัย ศรีสมุดคำ และวาสนา วงศ์ษา. (2565). เครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วย การประมวลผลภาพ. **วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม**, 4(2), 242-253.

นภารัตน์ ชูไพร, เอกรินทร์ วิจิตรพันธ์, พิมพ์ชนก แก้วอุดม และชุติมา ยอดเกื้อ. (2565). การพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับเพิ่มช่องทางการจำหน่ายผลิตภัณฑ์กาแพวิสาหกิจชุมชน

- บ้านถ้ำสิงห์ จังหวัดชุมพร.วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 24(3), 39-49.
- บอย ดาศรี และนรภัทร สาณจิตร. (2564). ระบบการตรวจจับไฟไหม้ด้วยวิธีการหาเส้นขอบของภาพ และระบบสี HSV. วารสารวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรม, 2(1), 10-14.
- พิศณุ คูมีชัย. (2564). ระบบรู้จำสัญญาณมือทางทหารด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัล. วารสาร วิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรม, 2(5), 28-36.
- พิศณุ คูมีชัย. (2565). การประมาณน้ำหนักสุกรโดยใช้การประมวลผลภาพและโครงข่ายประสาท เยี่ยม. วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 5(1), 72-82.
- วีระยุทธ สุริคำ, นพดล อ่ำดี และชัยธำรง พงษ์พัฒนศิริ. (2564). การจำแนกความสุกของกล้วยฉาบ ด้วยเทคนิคการ ประมวลผลภาพ. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม, 3(1), 55-67.
- อรอุมา พร้าโมต. (2564). การวิเคราะห์ระดับความสุกของกล้วยจากภาพถ่ายด้วยโมเดลสีอาร์จีบีและ การเรียนรู้ แบบมีผู้สอน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร. สุวรรณภูมิ (The Journal of Science and Technology RMUTSB), 5(พิเศษ), 34-34.
- เอกรัตน์ สุขสุนทร, ชลทิศ สันติวงศ์งาม, วัชรพล คำแขก และศศิชา ปานสุวรรณ. (2565). ระบบ วิเคราะห์การสุกของ ผลไม้ด้วยเทคโนโลยีการประมวลผลภาพ. วารสารวิทยาการและ เทคโนโลยีสารสนเทศ (JIST), 12(1), 61-66.
- Dubey, S.R., & Jalal, A.S. (2012). **Detection and classification of apple fruit diseases using complete local binary patterns**. Paper presented at the 2012 Third International Conference on Computer and Communication Technology. Allahabad, India.
- Dubey, S.R., & Jalal, A. (2012). Robust approach for fruit and vegetable classification. **Procedia Engineering**, 38, 3449-3453.
- Jansuwan, P., & Zander, K. K. (2021). Getting Young People to Farm: How Effective Is Thailand's Young Smart Farmer Programme? Sustainability.MDPI Journal, 13(21), 11611.
- Kumari, R.S.S., & Gomathy, V. (2018). **Fruit classification using statistical features in svm classifier**. Paper presented at the 2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). Chennai, India.
- Pardede, J., Husada, M.G., Hermana, A.N., & Rumapea, S.A. (2019). **Fruit Ripeness Based on RGB, HSV, HSL, L ab Color Feature Using SVM**. Paper presented at the 2019



International Conference of Computer Science and Information Technology
(ICoSNIKOM). Medan, Indonesia.

การทดลองนวัตกรรมบอลดินเผาโดยใช้ส่วนผสมดินเหนียว ขี้เถ้าแกลบ
และขี้เถ้ากากกาแฟ สำหรับการปลูกข้าว
TERRACOTTA BALL INNOVATION EXPERIMENT MIXTURE OF CLAY
RICE HUSK ASH AND COFFEE GROUNDS ASH FOR
RICE CULTIVATION

วิมล ทองดอนกลิ้ง^{1*}, นฤพล สิงห์กลิ่น¹

Wimol Thongdornkling¹, Naruepon Singklin¹

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

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

*Corresponding author e-mail: wimol.1100tdk@gmail.com

วันที่เข้ารับ 13 พฤศจิกายน 2565

วันที่แก้ไขบทความ 30 ธันวาคม 2565

วันที่ตอบรับบทความ 30 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อทดลองและสร้างสูตรส่วนผสมเนื้อดินนวัตกรรมบอลดินเผา สำหรับการปลูกข้าว และเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นทั้งก่อนและหลังเผา ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากหาสูตรผสมจากวัตถุดิบ 4 ชนิด ได้แก่ ดินพื้นบ้าน ขี้เถ้าแกลบ ขี้เถ้ากากกาแฟและ กัมมันต์ 20 โดยกำหนดความถี่ของวัตถุดิบอยู่ที่ 5-90 เปอร์เซ็นต์ ผสมและการขึ้นรูปตามอัตราส่วนที่กำหนดและทดสอบเพื่อให้ทราบสมบัติทางกายภาพเนื้อดินปั้นสโตนแวร์ทั้งคุณสมบัติทางกายภาพก่อนเผาและคุณสมบัติทางกายภาพหลังเผาอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยเลือกสูตรส่วนผสมที่มีสมบัติทางกายภาพเหมาะสมมากที่สุดคือสูตรส่วนผสมที่ 7 โดยมีส่วนผสมของดินพื้นบ้าน 30 ขี้เถ้าแกลบ 35 ขี้เถ้ากากกาแฟ 35 และกัมมันต์ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีอัตราการหดตัวหลังเผา ร้อยละ 18.21 ความแข็งแรง (kg/cm^3) ร้อยละ 1 การดูดซึมน้ำ ร้อยละ 92.05 และสามารถทนไฟได้ หลังจากนั้นปั้นด้วยมือให้มีลักษณะเป็นลูกบอลทรงกลม 4 ขนาด คือ 1 2 3 และ 4 เซนติเมตร ผลการทดลองพบว่าเนื้อดินสามารถคงรูปได้หลังเผา สามารถทนไฟได้ สามารถขึ้นรูปด้วยรูปทรงที่กำหนดไว้ได้ และสามารถนำไปใช้งานได้จริง ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการขึ้นรูปอย่างง่ายโดยไม่ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีสามารถต่อยอดเพื่อการผลิตและจำหน่ายได้ตามที่กำหนดไว้

คำสำคัญ: นวัตกรรม, บอลดินเผา, การปลูกข้าว

Abstract

The purposes of this study were to experiment and create an innovative ball formula for rice cultivation, and test the physical properties of clay before and after firing. The data from documents and sources were studied to obtain as much information as possible to have clear and definite information for the possibility of the innovation. There were two stages of the experiment. First, the formula of the ingredients was investigated by specifying 3 types of raw materials: local clay, rice husk ash, coffee grounds ash, and activated carbon (20 Percent). The frequency of raw materials was setting at 5-90 percent. The materials were mixed and formed according to the specified ratio. Second, the physical properties of stoneware clay were tested both before firing and after firing at 800°C. Then the mixture formula was selected. The most suitable physical properties were formula 7, with the mixture of local clay 30, rice husk ash 35 percent, coffee grounds ash 35 percent and activated carbon 20 percent. After firing, the shrinkage was 18.21 percent, strength (kg/cm^3) 1 percent, water absorption 92.05 percent and ability of water absorption 92.05 percent, and fire resistant. Then the mixture was molded by hand into the forms of 4 spherical balls: 1 centimeter, 2 centimeters, 3 centimeters, and 4 centimeters. In conclusion, the results showed that the clay could maintain shape after firing and be molded with a specified shape. It could be used for real practice and produced by a simple forming process without having to rely on technology. Also, it could be extended to produce for sale as specified.

Keywords: Innovation, Pottery ball, Rice cultivation

1. บทนำ

จากหลักฐานทางโบราณคดีต่างๆ มีข้อสันนิษฐานว่าทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เป็นภูมิภาคแรกในโลกที่ปลูกข้าวเพื่อยังชีพ บรรพบุรุษที่อาศัยอยู่ในดินแดนแถบนี้ ได้สร้างและสั่งสมภูมิปัญญาการปลูกข้าวมาอย่างยาวนาน ซึ่งต่อมาได้ถ่ายทอดมรดกทางภูมิปัญญาเหล่านี้มาสู่ชนรุ่นหลัง โดยคนโบราณที่อาศัยในดินแดนประเทศไทยปัจจุบันก็ได้รับเอาภูมิปัญญาการปลูกข้าวมาด้วยเช่นกัน ในหลักฐานเกี่ยวกับการปลูกข้าวเก่าที่สุดในประเทศไทยเป็นร่องรอยกลบข้าวเหนียวบริเวณภาคเหนือและอีสาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผู้คนในบริเวณนี้รู้จักและนิยมปลูกพันธุ์ข้าวเหนียวก่อนที่จะหันมานิยมปลูกข้าวเจ้าในช่วงเวลาต่อมาภูมิปัญญาในการปลูกข้าวที่คนโบราณได้รับมรดกมาแล้วสืบทอดมายัง

คนรุ่นปัจจุบัน สามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่างๆได้ดังนี้ ภูมิปัญญาการจัดการพื้นที่นาคนไทยมี ภูมิปัญญาในการจัดแบ่งประเภทของพื้นที่นาตามลักษณะของภูมิประเทศต่างๆ อาทิ นาฟางลอย นาพุทโค นาปริง นาปี นาน้ำตม นาดำ นาสวน และนาไร่ ซึ่งจะมีวิธีการปลูกและการเตรียมพื้นที่แตกต่างกันไป จึงทำให้ชาวนาไทยสามารถปลูกข้าวที่เป็นอาหารหลักได้ในทุกสภาพภูมิประเทศที่มีอยู่ในดินแดนไทย ทั้งบนภูเขา ที่ราบสูง ที่ดอน และพื้นที่ลุ่ม แม้แต่พื้นที่ที่น้ำท่วมอยู่ตลอดเวลาหรือบริเวณที่เป็นน้ำ กร่อย ภูมิปัญญาการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำเนื่องจากน้ำมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการปลูกข้าว ซึ่ง จะต้องเตรียมน้ำให้เพียงพอสำหรับการปลูกข้าวหรือหล่อเลี้ยงต้นข้าวไว้คนไทยตั้งแต่ยุคโบราณก็มีภูมิ ปัญญาในการชักน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติทั้งบนที่สูงและในที่ราบเข้ามาสู่ที่นา แม้แต่การทำนาบน ภูเขาในลักษณะนาขั้นบันไดก็ยังสามารถแสวงหาแหล่งน้ำจากบนภูเขาเช่นตาน้ำ ห้วย ลำธารต่างๆ มา ใช้หล่อเลี้ยงพื้นที่นา ซึ่งมีขั้นตอนและวิธีการมากมาย สำหรับข้าวบางชนิดต้องทำแปลงตกกล้าก่อน แล้วจึงนำต้นกล้าไปปักดำ คนโบราณยังมีภูมิปัญญาในการนำพิธีกรรมความเชื่อมาประกอบการทำนา เพื่อใช้เป็นเครื่องยึดเหนี่ยวทางจิตใจ อันเนื่องมาจากสภาพการดำรงชีวิตที่ต้องพึ่งพาฟ้าฝนในการ เพาะปลูกข้าว ซึ่งเป็นปัจจัยเหนือการควบคุมจึงได้ประกอบพิธีกรรมในทุกๆ ขั้นตอนของการปลูกข้าว อาทิ พิธีแรกนาขวัญในช่วงการเตรียมที่นา พิธีทำขวัญข้าวในช่วงข้าวออกรวง พิธีลาซางในช่วงหลัง การเก็บเกี่ยว ทั้งนี้เพื่อความสบายใจว่าจะสามารถได้ผลผลิตเพียงพอในแต่ละปี

นอกจากนี้หลักฐานภาพเขียนบนผนังถ้ำหรือผนังหินอายุไม่น้อยกว่า 2,000 ปี ที่ผาหมอนน้อย บ้านตากุ่ม ตำบลห้วยไผ่ อำเภอโขงเจียม จังหวัดอุบลราชธานี บันทึกการปลูกธัญพืชอย่างหนึ่ง มี ลักษณะเหมือนข้าว ภาพควายแปลงพืชคล้ายข้าวอาจตีความได้ว่ามนุษย์สมัยนั้นรู้จักข้าวหรือการ เพาะปลูกข้าวแล้วศาสตราจารย์ชิน อยู่ดี สรุปลไว้เมื่อ ปี พ.ศ. 2535 ว่าประเทศไทยทำนาปลูกข้าว มาแล้วประมาณ 5,471 ปี (นับถึง ปี พ.ศ. 2514) ก่อนการปลูกข้าวในประเทศจีนหรืออินเดียราว 1,000 ปี ผลของการขุดค้นที่โนนภักทาสันสนุนสมมติฐานที่ว่าข้าวเริ่มปลูกในทวีปเอเชีย อาคเนย์ใน สมัยหินใหม่ จากนั้นแพร่ขึ้นไปประเทศอินเดียประเทศจีน ประเทศญี่ปุ่นและประเทศเกาหลี

จากการลงสำรวจพื้นที่ในบริเวณเขตพื้นที่ บ้านทุ่งน้ำใส ตำบลดงประคำ อำเภอพรหมพิราม จังหวัดพิษณุโลก นั้นพบว่าในการทำนานั้นปัญหาของชาวนาเป็นปัญหาที่ยืดเยื้อยาวนาน แก่กันไม่ตก เสียที่อีกประการหนึ่งของชาวนาก็คือ อาชีพชาวนาและเกษตรกรทั้งหลายนี้ มีความเสี่ยงสูงจากความ ไม่แน่นอนของธรรมชาติ ดินฟ้า อากาศ บางปีน้ำมากไป น้ำท่วมก็ไม่ได้ผลผลิต แล้งไปไม่มีน้ำทำนา น้ำไม่พอผลผลิตก็ตกต่ำ ร้อนไปข้าวก็ได้ผลผลิตไม่ดี หนาวไปอย่างเช่นปีนี้ข้าวก็ไม่ยอมออกรวง ถ้ามี เครื่องมือหรือนวัตกรรมอย่างใดอย่างหนึ่งเข้ามาเพื่อเพิ่มหรือช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ก็จะทำให้ผลผลิต ข้าวมะลิอินทรีย์ได้ผลผลิตที่มากขึ้นและเป็นประโยชน์กับชาวนาทั้งประเทศ (นายชูชาติ มีพาด, 24 ตุลาคม 63: สัมภาษณ์) ซึ่งผู้วิจัยมีความสนใจที่จะสร้างนวัตกรรมสำหรับการเก็บความชื้นสำหรับยืด ระยะเวลาในการเพิ่มความชื้นของดิน นวัตกรรมบอลลินเผาเพื่อกักเก็บความชื้นในขณะให้น้ำเกิดการ



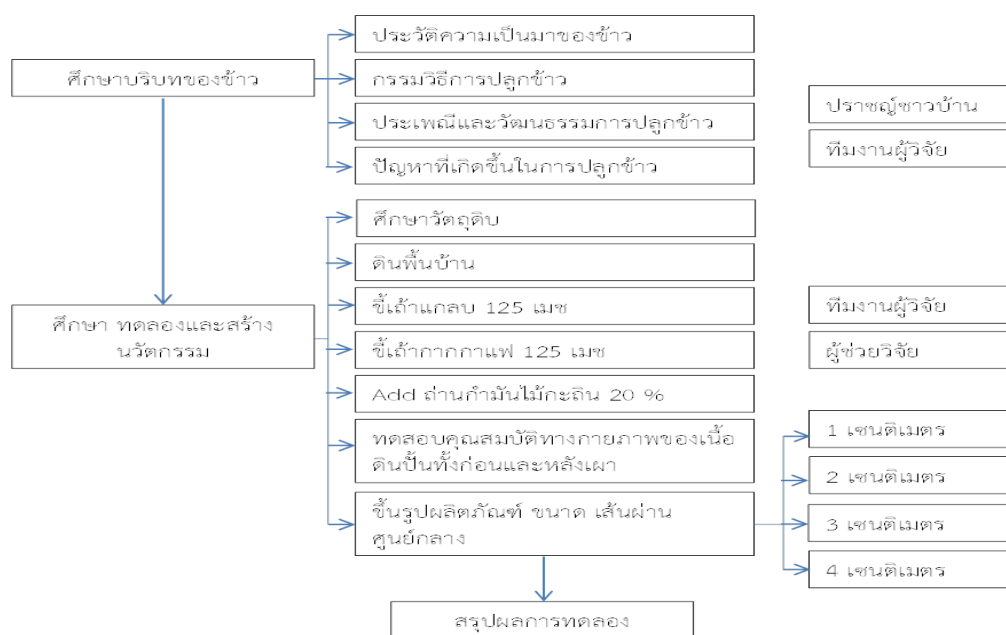
แห่งตามระยะเวลาและยังสามารถยืดระยะเวลาในการเพิ่มความชื้นในดินทำให้ลดความเสี่ยงความเสียหายต่อผลผลิตของชาวนา จากการทดลองและทดสอบเบื้องต้นแล้วนั้นนวัตกรรมบอลลินเผา ดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการดูดซึมน้ำได้มากถึง 40 เปอร์เซ็นต์ จากสูตรของเนื้อดินที่สร้างขึ้นซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำและปุ๋ยมีประสิทธิภาพดีขึ้นนอกจากนั้นยังสามารถยืดระยะเวลาในการดูดซับและแผ่กระจายของปุ๋ยซึ่งจะส่งผลช่วยทำให้การเจริญเติบโตของต้นข้าวได้ดีและเพิ่มผลผลิตของต้นข้าวได้อีกด้วย เพื่อให้เกิดนวัตกรรมสำหรับประโยชน์ของเกษตรกรชาวนาผู้วิจัยได้มีการทดลองและคิดขึ้นดังกล่าวจะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับเกษตรกรชาวนาและด้านอื่นๆ เป็นอย่างมากและยังสามารถต่อยอดนวัตกรรมยังเป็นประโยชน์ด้านอื่นๆ ได้อีกด้วย

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษา ทดลองและสร้างสูตรส่วนผสมเนื้อดินนวัตกรรมการบดดินเผาสำหรับการปลูกข้าว
- 2.2 เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นทั้งก่อนและหลังเผา

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การสร้างนวัตกรรมสำหรับการเก็บความชื้นสำหรับยืดระยะเวลาในการเพิ่มความชื้นของดิน
นวัตกรรมบอลดินเผาเพื่อกักเก็บความชื้นในขณะที่ยังเกิดการแห้งตามฤดูกาล ระยะเวลาและยัง
สามารถยืดระยะเวลาในการเพิ่มความชื้นในดินทำให้ลดความเสี่ยงความเสียหายต่อผลผลิตของชาวนา
เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มากขึ้นกว่าเดิม



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย



3.1 การทดลองหาสูตรส่วนผสมของเนื้อดินปั้นการทดลองเนื้อดินปั้นสโตนแวร์เพื่อใช้สำหรับการผลิตนวัตกรรมบอลดินเผาทำการเผาทดลองตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1.1 ศึกษาข้อมูลสูตรส่วนผสมของเนื้อดินปั้นบอลดินเผา วัตถุดิบที่ใช้จากเอกสาร ตำรา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อวางกรอบในการดำเนินการวิจัยและกำหนดอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบที่ใช้

3.1.2 กำหนดกลุ่มตัวอย่าง คำนวณจากอัตราส่วนผสมของเนื้อดินปั้นโดยใช้ตารางสามเหลี่ยม ใช้วัตถุดิบ 3 ชนิด คือ ดินพื้นบ้าน ขี้เถ้ากลบ (ช่วยเพิ่มความพรุนตัวและการดูดซับความชื้น) และขี้เถ้ากากกาแฟ (ช่วยเพิ่มความพรุนตัวและการดูดซับความชื้น) ถ่านกัมมันต์ ร้อยละ 20 จำนวน 9 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนผสมของดินพื้นบ้าน ขี้เถ้ากลบ ขี้เถ้ากากกาแฟ และ Add กัมมันต์ ร้อยละ 20 เปอร์เซ็นต์

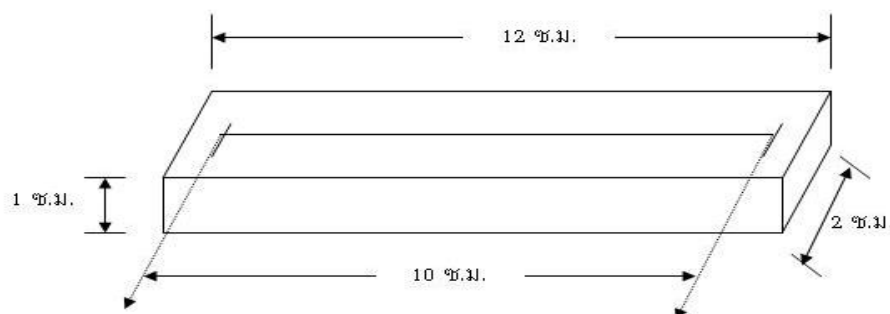
สูตรที่	อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ (ร้อยละ)			
	ดินพื้นบ้าน	ขี้เถ้ากลบ	ขี้เถ้ากากกาแฟ	Add กัมมันต์
1	90	5	5	20
2	80	10	10	20
3	70	15	15	20
4	60	20	20	20
5	50	25	25	20
6	40	30	30	20
7	30	35	35	20
8	20	40	40	20
9	10	45	45	20

3.1.3 ขอบเขตของประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

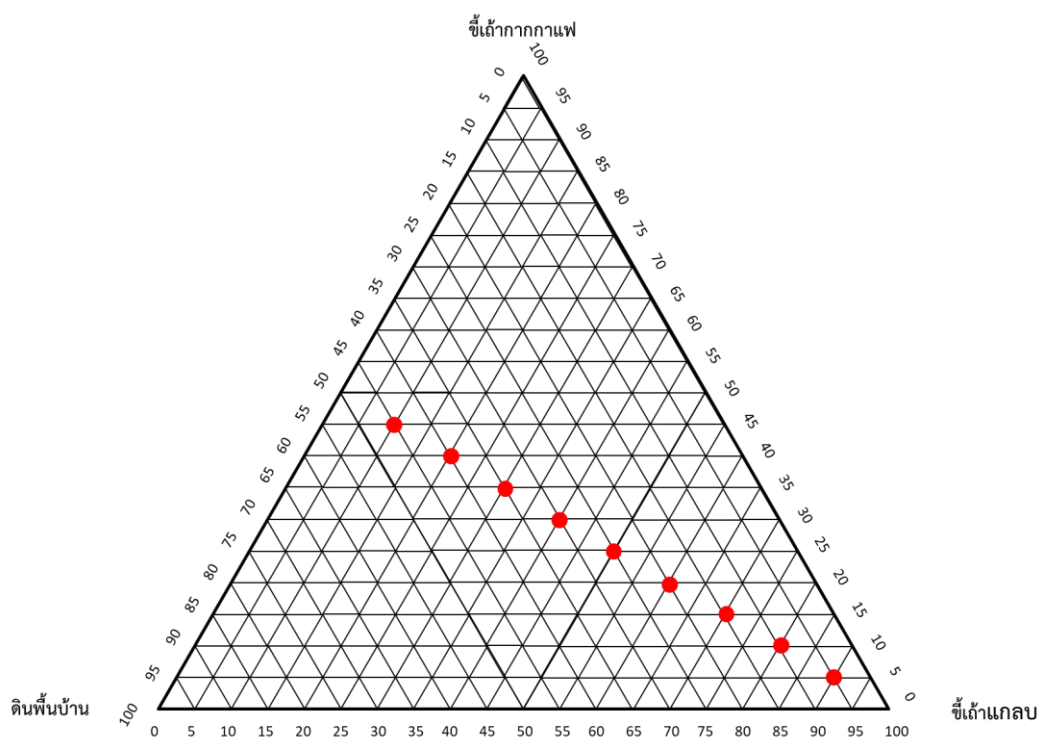
1) ประชากร ได้แก่ ส่วนผสมของ ดินพื้นบ้าน ขี้เถ้ากลบ ขี้เถ้ากากกาแฟและAdd กัมมันต์ 20 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 9 สูตรส่วนผสม

2) กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ส่วนผสมของดินพื้นบ้าน ขี้เถ้ากลบ ขี้เถ้ากากกาแฟและadd กัมมันต์ ร้อยละ 20 จำนวน 9 สูตรส่วนผสมได้มาโดยการสุ่มตัวอย่างแบบจำเพาะเจาะจง (Purposive sampling) อย่างมีระบบจากตารางสามเหลี่ยมด้านเท่า (Triaxial diagram) ซึ่งประกอบด้วยดินพื้นบ้าน (ตั้งแต่ร้อยละ 5 ขึ้นไป)

- 3) ชั่งส่วนผสมวัตถุดิบสูตรละ 500 กรัม ผสมให้เข้ากันผสมน้ำเพื่อให้เกิดความเหนียว
- 4) นำเนื้อดินปั้นที่ได้มาทำแท่งทดลอง ขนาดความกว้าง 2 เซนติเมตร ความหนา 1 เซนติเมตร ความยาว 12 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยพิมพ์กดสูตรเนื้อดินปั้นตัวอย่างละ 2 ชิ้นทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 2 แสดงแท่งทดลองเนื้อดินปั้นสโตนแวร์



ภาพที่ 3 แสดงการสุ่มตัวอย่างจากตารางสามเหลี่ยมด้านเท่า เพื่อหาส่วนผสมของดินพื้นบ้าน ซีเถ้าแกลบ ซีเถ้ากากกาแฟ และ Add กัมมันต์ ร้อยละ 20

จากการสุ่มจากตารางสามเหลี่ยมด้านเท่าข้างต้นได้ส่วนผสมของดินพื้นบ้าน ขี้เถ้าแกลบ ขี้เถ้ากากกาแฟและ Add กัมมันต์ ร้อยละ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ใช้ต่างกันในเรื่องดินปั้น โดยแต่ละสูตรเนื้อดินปั้นคิดเป็นร้อยละซึ่งสามารถแสดงได้ในตารางที่ 1

- 5) ผึ่งชิ้นงานให้แห้งที่อุณหภูมิห้องหลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส
- 6) นำชิ้นทดลองชุดที่ 1 ทดสอบสมบัติทางกายภาพก่อนเผา
- 7) นำชิ้นทดลองชุดที่ 2 เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส บรรยากาศออกซิเดชัน ด้วยเตาแก๊สชนิดทางเดินลมร้อนลง
- 8) นำชิ้นทดลองชุดที่ 2 ที่ผ่านการเผาทดสอบสมบัติทางกายภาพหลังเผา
- 9) นำข้อมูลที่ได้จาก ข้อ 1.6 และ 1.8 มาวิเคราะห์ข้อมูล

3.2 การทดลองหาสูตรส่วนผสมของเนื้อดินปั้นการทดลองเนื้อดินเพื่อใช้สำหรับการผลิตนวัตกรรมบอลดินเผา ดำเนินการวิจัยตามลำดับ ขั้นตอนดังนี้

3.2.1 การทดลองในตอนต้นที่ 1 จะทำให้ทราบสมบัติทางกายภาพเนื้อดินปั้นสโตนแวร์ทั้งคุณสมบัติทางกายภาพก่อนเผาและคุณสมบัติทางกายภาพหลังเผาอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เลือกสูตรส่วนผสมที่มีสมบัติทางกายภาพเหมาะสมมากที่สุด

3.2.2 ชั่งน้ำหนักส่วนผสมวัตถุดิบตามสูตรส่วนผสมที่เลือก

3.2.3 ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ในการทดสอบจำนวน 4 ขนาด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 2 3 และ 4 เซนติเมตร

3.2.4 ปลอบชิ้นงานให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสให้แห้งสนิท

3.2.5 นำชิ้นงานที่ผ่านการอบแล้วเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส บรรยากาศออกซิเดชัน ด้วยเตาแก๊สทางเดินลมร้อนลง

3.2.6 ทดสอบการดูดซึมน้ำ

3.2.7 ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์บอลดินเผา

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

3.3.1 ค่าความแข็งแรงของดินก่อนการเผาและหลังการเผาใช้สมการที่ (1)

$$M = 3 PL/2bd^2 \quad (1)$$

เมื่อ M คือ ค่าความแข็งแรงของดิน (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

P คือ แรงที่กดทำให้แท่งทดลองหัก (กิโลกรัม)



- L คือ ระยะห่างของแท่นรองรับชั้นทดลอง (เซนติเมตร)
b คือ ความกว้างของชั้นทดลอง (เซนติเมตร)
d คือ ความหนาของชั้นทดลอง (เซนติเมตร)

3.3.2 ค่าความหดตัวก่อนเผาและหลังเผา ใช้สมการที่ (2) และ (3)

$$\text{ร้อยละความหดตัวก่อนการเผา} = \frac{\text{ความยาวดินเปียก} - \text{ความยาวดินแห้ง}}{\text{ความยาวดินเปียก}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{ร้อยละความหดตัวหลังการเผา} = \frac{\text{ความยาวดินเปียก} - \text{ความยาวดินหลังเผา}}{\text{การหดตัวดินเปียก}} \times 100 \quad (3)$$

3.3.3 ค่าการดูดซึมน้ำ ใช้สมการที่ (4)

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักหลังต้ม} - \text{น้ำหนักก่อนต้ม}}{\text{น้ำหนักก่อนต้ม}} \times 100 \quad (4)$$

3.3.4 สีของเนื้อดินวิเคราะห์โดยการเทียบสีของเนื้อดินหลังเผากับแผ่นเทียบสี (Pantone formula guides)

4. ผลการวิจัย

หลังจากผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามกระบวนการครบทุกขั้นตอนแล้วนั้น จึงได้ข้อมูลซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ดังรายละเอียดต่อไปนี้ การทดลองหาอัตราส่วนผสมดินพื้นบ้าน ขี้เถ้าแกลบ ขี้เถ้ากากกาแฟ และ Add กัมมันต์ ร้อยละ 20 โดยการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจงจากตารางสามเหลี่ยมอย่างมีระบบจำนวน 9 สูตรส่วนผสม นำมาทำการอัดขึ้นรูปแท่งทดลองมีขนาดความกว้าง 2 เซนติเมตร ความยาว 12 เซนติเมตรและความหนา 1 เซนติเมตร เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นก่อนเผาและภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงรายละเอียดดังตาราง



ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นก่อนเผาของดินปั้น

สูตรที่	อัตราส่วนวัตถุดิบ (กรัม)				หัตถ์ก่อนเผา (ร้อยละ)
	ดินพื้นบ้าน	ขี้เถ้าแกลบ	ขี้เถ้ากากกาแฟ	Add กัมมันต์	
1	90	5	5	20	19.83
2	80	10	10	20	23.29
3	70	15	15	20	20.13
4	60	20	20	20	17.92
5	50	25	25	20	18.08
6	40	30	30	20	15.88
7	30	35	35	20	16.92
8	20	40	40	20	19.83
9	10	45	45	20	16.88

จากตารางที่ 2 เนื้อดินปั้นก่อนเผาที่มีค่าความหดตัวน้อยที่สุดอยู่ที่ 15.88 ได้แก่สูตรส่วนผสมที่ 6 และเนื้อดินปั้นก่อนเผาที่มีค่าความหดตัวมากที่สุดอยู่ที่ 23.29 ได้แก่สูตรส่วนผสมที่ 2

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นหลังเผาของดินปั้น

สูตรที่	อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ (ร้อยละ)				หัตถ์หลังเผา (ร้อยละ)	ความแข็งแรง (kg/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความทนไฟ	สีที่ปรากฏ
	ดินพื้นบ้าน	ขี้เถ้าแกลบ	ขี้เถ้ากากกาแฟ	Add กัมมันต์					
1	90	5	5	20	19.65	41.06	26.90	✓	5 YR 5/6 Yellowish red
2	80	10	10	20	19.04	24.68	33.59	✓	5 YR 6/8 Reddish yellow
3	70	15	15	20	19.69	12.51	45.24	✓	5 YR 5/6 Yellowish red
4	60	20	20	20	17.60	8.11	53.93	✓	5 YR 5/6 Yellowish red



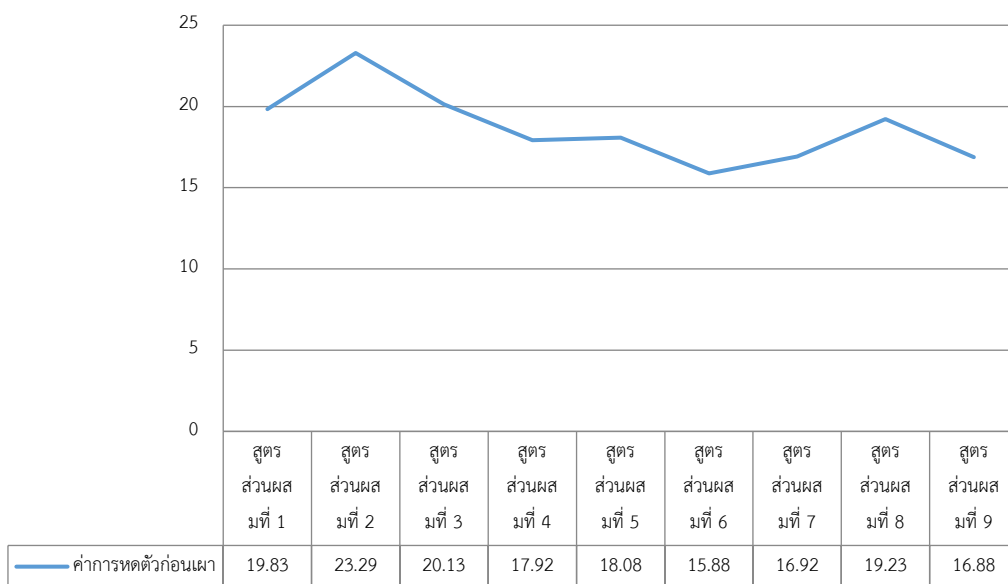
สูตรที่	อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ (ร้อยละ)				หัตถ์ หลังเผา (ร้อยละ)	ความ แข็งแรง (kg/cm ³)	การดูด ซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความ ทนไฟ	สีที่ ปรากฏ
	ดิน พื้นบ้าน	ซีเมนต์ แกลบ	ซีเมนต์ กาแฟ	Add กัมมันต์					
5	50	25	25	20	18.25	6.57	73.75	✓	5 YR 5/6 Yellowish red
6	40	30	30	20	18.38	5.17	75.86	✓	10 YR 6/6 Brownish yellow
7	30	35	35	20	18.21	1	92.05	✓	10 YR 6/6 Brownish yellow
8	20	40	40	20	19.23	-	75.30	×	10 YR 8/1 White
9	10	45	45	20	-	-	-	×	5 YR 6/8 Reddish yellow

จากตารางเนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีค่าความหดตัวน้อยที่สุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 3 เนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีค่าความหดตัวมากที่สุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 4 เนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีค่าความแข็งแรงน้อยที่สุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 7 เนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีค่าความแข็งแรงมากที่สุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 1 เนื้อดินปั้นหลังเผาที่มี ค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 1 เนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 7 เนื้อดินปั้นที่ไม่สามารถทนไฟได้ ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 1, 2, 3, 4, 5 และสูตรส่วนผสมที่ 7 เนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีสี 5 YR 5/6 Yellowish red ได้แก่สูตรส่วนผสมที่ 1,3,4 และสูตรส่วนผสมที่ 5 เนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีสี 10 YR 6/6 Brownish yellow ได้แก่สูตรส่วนผสมที่ 2,6,7 และสูตรส่วนผสมที่ 9 เนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีสี 10 YR 8/1 White ได้แก่สูตรส่วนผสมที่ 9

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การหาส่วนผสมและศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นก่อนเผาและหลังเผาโดยใช้ดินพื้นบ้าน ขี้เถ้าแกลบ ขี้เถ้ากากกาแฟ และ Add กัมมันต์ ร้อยละ 20 เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สามารถสรุปผล ได้ดังต่อไปนี้

5.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นก่อนเผา สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้
ค่าความหดตัวของเนื้อดินปั้นก่อนเผาที่มีค่าความหดตัวน้อยที่สุดได้แก่สูตร ส่วนผสมที่ 6 ร้อยละ 15.88 และเนื้อดินปั้นก่อนเผาที่มีค่าความหดตัวมากที่สุดได้แก่สูตรส่วนผสมที่ 2 ร้อยละ 23.29 ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การหดตัวของเนื้อดินปั้นก่อนการเผา

5.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นหลังเผา สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

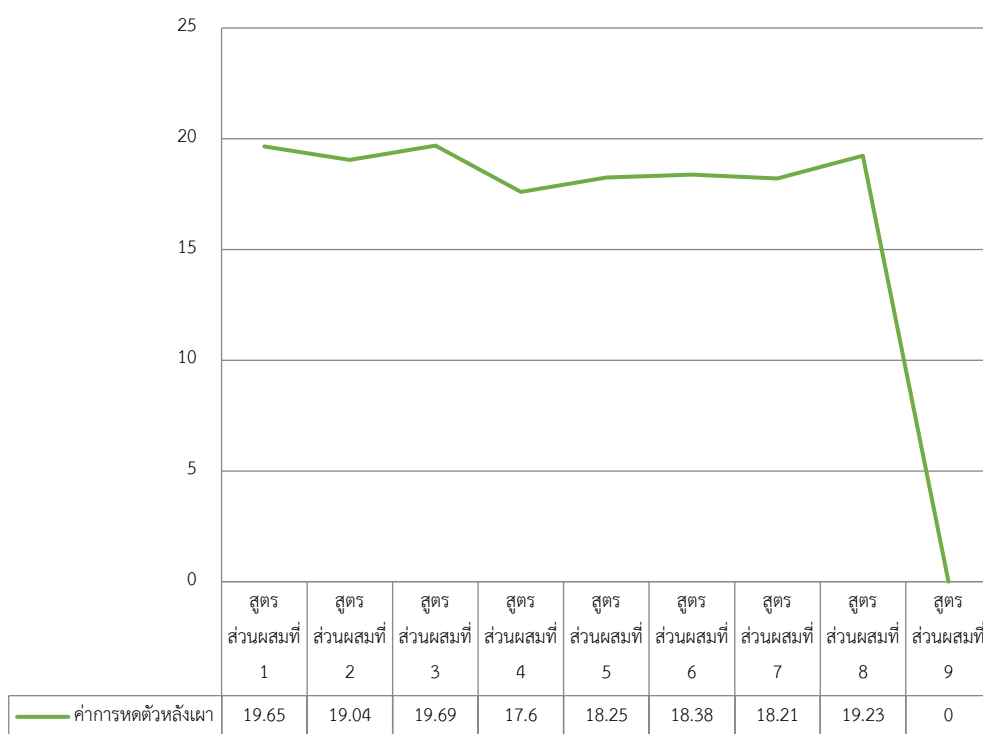
5.2.1 ความหดตัวของเนื้อดินปั้นภายหลังการเผา เนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีค่าความหดตัวน้อยที่สุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 4 ร้อยละ 17.6 เนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีค่าความหดตัวมากที่สุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 3 ร้อยละ 19.69 ดังแสดงในภาพที่ 5

5.2.2 ความแข็งแรงของเนื้อดินปั้นหลังเผาของเนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีค่าความแข็งแรงน้อยที่สุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 7 ร้อยละ 1.00 Kg/cm³ เนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีค่าความแข็งแรงมากที่สุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 1 ร้อยละ 41.06 Kg/cm³ ดังแสดงในภาพที่ 6

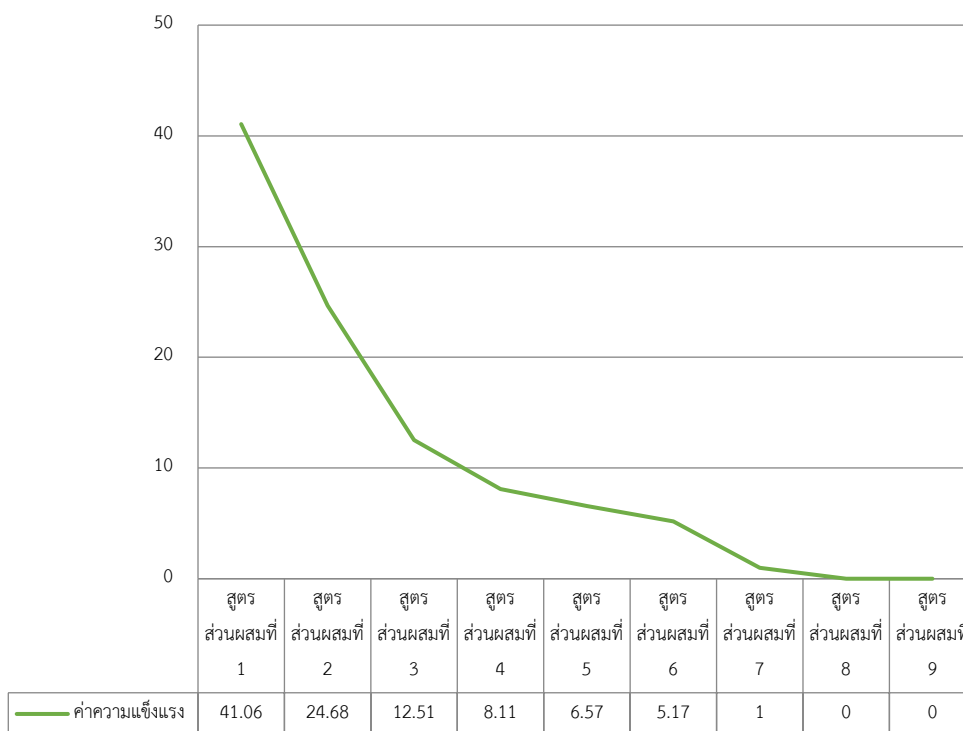
5.2.3 ค่าการดูดซึมน้ำของเนื้อดินปั้นภายหลังการเผาของเนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 1 ร้อยละ 26.90 เนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 7 ร้อยละ 92.05 ดังแสดงในภาพที่ 7

5.2.4 ค่าความทนไฟของเนื้อดินปั้นภายหลังการเผาของเนื้อดินปั้นหลังเผาที่สามารถทนไฟได้ ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 1,2,3,4,5,6 และสูตรส่วนผสมที่ 7 เนื้อดินปั้นที่ไม่สามารถทนไฟได้ ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 8 และสูตรส่วนผสมที่ 9 ดังแสดงในภาพที่ 8

5.2.5 สีของเนื้อดินปั้นภายหลังการเผาของเนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีสี 5 YR 5/6 Yellowish red ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 1, 3, 4 และสูตรส่วนผสมที่ 5 เนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีสี 5 YR 6/8 Reddish yellow ได้แก่สูตรส่วนผสมที่ 2, 6 และสูตรส่วนผสมที่ 7 เนื้อดินปั้นหลังเผาที่มีสี 5 YR 6/8 Reddish yellow ได้แก่สูตรส่วนผสมที่ 8 และสูตรส่วนผสมที่ 9 ดังแสดงในภาพที่ 9



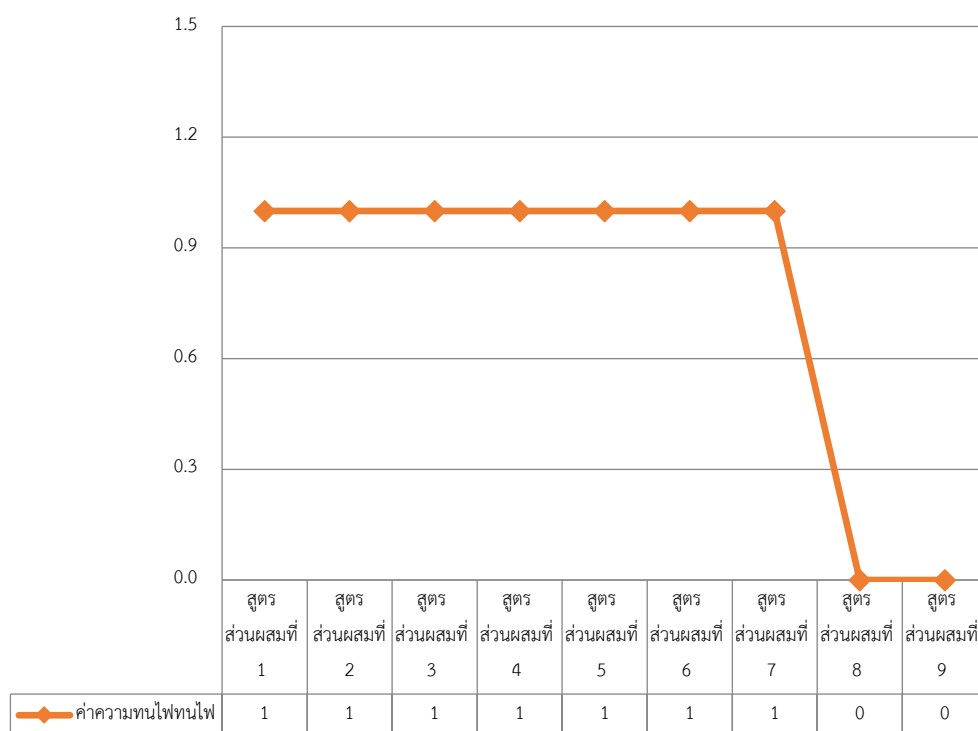
ภาพที่ 5 การหัดตัวของเนื้อดินปั้นภายหลังการเผา



ภาพที่ 6 ความแข็งแรงของเนื้อดินปั้นหลังเผาภายหลังการเผา



ภาพที่ 7 การดูดซึมน้ำของเนื้อดินปั้นภายหลังการเผา



ภาพที่ 8 แสดงกราฟค่าความทนไฟของเนื้อดินปั้นภายหลังการเผา



ภาพ 9 แสดงภาพผลิตภัณฑ์งานนวัตกรรมบอลดินเผาจากสูตรส่วนผสมที่ 7

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 ควรมีการนำดินไปหาผลวิเคราะห์ทางเคมี เพื่อให้ผลการวิจัยเกิดความน่าเชื่อถือในกระบวนการทางวิทยาศาสตร์มากขึ้น

6.2 ควรศึกษาดินพื้นที่ใกล้เคียง เพื่อให้เกิดความหลากหลายในด้านการนำวัตถุดิบมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเกิดความหลากหลายในการนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาซึ่งจะทำให้เกิดประโยชน์สามารถต่อยอดในการพัฒนาต่อไปได้

6.3 ควรออกแบบลักษณะของบอลดินเผาให้มีรูปทรงที่หลากหลาย

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของสาขาวิชาเซรามิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ได้ที่ได้เห็นความสำคัญของการเขียนบทความทางวิชาการในครั้งนี้และจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ที่ใช้ในการทดลอง ขอขอบพระคุณเพื่อนร่วมงานที่เป็นกำลังใจเป็นอย่างดีมาตลอดให้คำแนะนำในด้านต่างๆ เกี่ยวกับการทำให้ผลการบทความมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณครอบครัวของผู้เขียนและทุกท่านที่ผู้เขียนไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมดที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดจนทำให้การทำให้บทความนี้สำเร็จด้วยดี ความดีทั้งหมดของบทความฉบับนี้ ผู้เขียนขอบแต่คุณพ่อ คุณแม่ ภรรยา ลูก ครู อาจารย์ อันเป็นที่รักและเคารพอย่างสูงสุด ผู้มีพระคุณทุกท่าน ตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องที่ให้การสนับสนุนแก่ผู้เขียนด้วยดีตลอดมา ขออ้อมคารวะแด่ผู้เขียนตำราวิชาการที่ได้ศึกษาค้นคว้าและใช้อ้างอิงทุกท่าน

8. เอกสารอ้างอิง

- จิรพันธ์ สมประสงค์. (2535). เทคนิคการสร้างสรรค์ศิลปะเครื่องปั้นดินเผา (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์
- ชูชาติ มีพาด เป็นผู้ให้สัมภาษณ์ ที่ตำบลดงประคำ เมื่อวันที่ 24 ตุลาคม 2563.
- ทวี พรหมพฤกษ์. (2523). ,เครื่องเคลือบดินเผาเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์
- ภรดี พันธุมกร. (2558). การออกแบบเซรามิกส์สร้างสรรค์ ชุด “บันทึกแห่งดอกไม้”. (รายงานวิจัย). มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี.