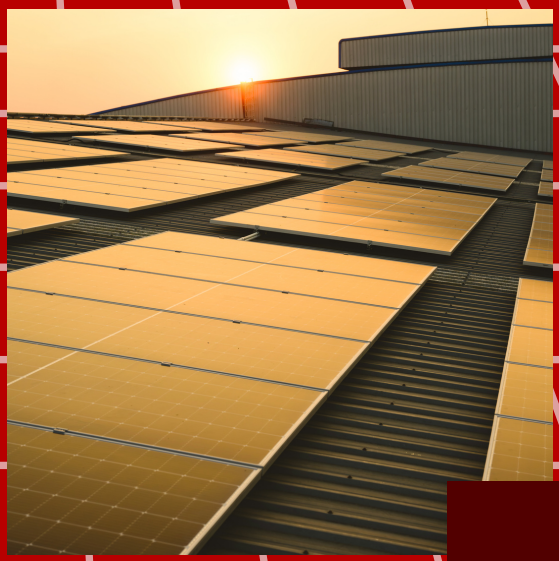
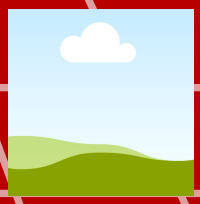
JOURNAL OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND
ENGINEERING
PIBULSONGKRAM RAJABHAT UNIVERSITY

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

ปีที่ 6 ฉบับที่ 1
มกราคม - เมษายน ปี2567

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 การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง

2. ครอบคลุมสาขาที่เกี่ยวข้อง

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

ขั้นตอนการประเมินบทความมีกระบวนการดังต่อไปนี้

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

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

- กรณีมีความเห็นให้ ปฏิเสธการรับตีพิมพ์ (Decline Submission) กองบรรณาธิการจะส่งจดหมายแจ้งผลดังกล่าวให้ผู้เขียนรับทราบ พร้อมทั้งเหตุผลของการปฏิเสธการรับ

- กรณีมีความเห็นให้ ตอบรับการตีพิมพ์ (Accept Submission) กองบรรณาธิการจะแจ้งผู้เขียนให้ทราบ 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 นวัตกรรมเซรามิกส์ ออกแบบผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และครุศาสตร์อุตสาหกรรม อีกทั้งยังรวมถึงงานวิจัยที่มีการบูรณาการศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรมในสาขาอื่นๆ มี 3 กลุ่ม คือ ผู้นิพนธ์ (Author) บรรณาธิการ (Editor) และผู้ประเมินบทความ (Reviewer) ซึ่งได้ปฏิบัติตามข้อกำหนดในบทบาทและหน้าที่อย่างเคร่งครัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

7. บทบาทและหน้าที่ของผู้นิพนธ์ (Duties of Authors)

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

8. บทบาทและหน้าที่ของบรรณาธิการวารสาร (Duties of Editors)

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

8. บรรณาธิการวารสารต้องไม่ปฏิเสธการตีพิมพ์บทความเพราะความสงสัยหรือไม่แน่ใจ โดยจะต้องหาหลักฐานมาพิสูจน์ข้อสงสัยนั้น ๆ ก่อน

9. บรรณาธิการวารสารต้องไม่เปลี่ยนแปลงการตัดสินใจในการตอบรับบทความที่ได้ปฏิเสธการตีพิมพ์ไปแล้ว

10. บรรณาธิการวารสารต้องพิจารณาตรวจสอบบทความในด้านการคัดลอกผลงานผู้อื่น

11. กรณีที่มีการปรับเปลี่ยนบรรณาธิการวารสาร ผู้ที่เข้ามารับตำแหน่งใหม่ต้องไม่กลับคำตัดสินใจเกี่ยวกับบทความที่บรรณาธิการวารสารคนก่อนตอบปฏิเสธไปแล้ว ยกเว้นมีการพิสูจน์ได้อย่างเหมาะสมและชัดเจน

12. หากบรรณาธิการวารสารตรวจพบการคัดลอกผลงานของผู้อื่นในกระบวนการประเมินบทความ บรรณาธิการวารสารต้องหยุดกระบวนการประเมิน และติดต่อผู้นิพนธ์หลักทันทีเพื่อขอคำชี้แจง เพื่อประกอบการ ตอบรับ หรือ ปฏิเสธ การตีพิมพ์บทความนั้น ๆ

13. บรรณาธิการวารสารต้องไม่ตีพิมพ์บทความที่เคยตีพิมพ์ที่อื่นมาแล้ว

14. บรรณาธิการวารสารต้องมีระบบในการจัดการที่ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้นิพนธ์และผู้ประเมินบทความรวมทั้งกองบรรณาธิการ

15. บรรณาธิการวารสารต้องสนับสนุนเสรีภาพในการแสดงความคิดเห็น และคงไว้ซึ่งความถูกต้องของผลงานทางวิชาการ อีกทั้งปกป้องมาตรฐานของทรัพย์สินทางปัญญา

9. **บทบาทและหน้าที่ของผู้ประเมินบทความ (Duties of Reviewers)**

1. ผู้ประเมินบทความต้องได้รับระบบปกป้องข้อมูลส่วนตัวของผู้ประเมินบทความ ยกเว้นกรณีที่มีการประเมินบทความแบบเปิด ซึ่งได้แจ้งให้ผู้นิพนธ์และผู้ประเมินบทความรับทราบล่วงหน้า

2. ผู้ประเมินบทความต้องได้รับระบบที่ทำให้เกิดความมั่นใจได้ว่าบทความที่ส่งเข้ามาทำการประเมิน ได้รับการปกปิดความลับในระหว่างขั้นตอนการพิจารณาประเมิน

3. ผู้ประเมินบทความ ต้องรักษาความลับและไม่เปิดเผยข้อมูลของบทความที่ส่งมาเพื่อพิจารณาแก่บุคคลอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง ในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความ

4. หลังจากได้รับบทความจากบรรณาธิการวารสาร และผู้ประเมินบทความตระหนักว่าตัวเองอาจมีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้นิพนธ์ เช่น เป็นผู้ร่วมโครงการ หรือรู้จักผู้นิพนธ์เป็นการส่วนตัว หรือเหตุผลอื่น ๆ ที่ทำให้ไม่สามารถให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะอย่างอิสระได้ ผู้ประเมินบทความควรแจ้งให้บรรณาธิการวารสารทราบ และปฏิเสธการประเมินบทความนั้น ๆ

5. ผู้ประเมินบทความต้องรับทราบคำแนะนำในทุกประเด็นที่บรรณาธิการวารสารคาดหวัง และต้องรับทราบการปรับปรุงคำแนะนำที่ทันสมัยอยู่เสมอ ซึ่งสามารถอ้างอิง หรือเชื่อมโยงกับระเบียบดังกล่าว

6. ผู้ประเมินบทความ ควรประเมินบทความในสาขาวิชาที่ตนมีความเชี่ยวชาญ โดยพิจารณาความสำคัญของเนื้อหาในบทความที่จะมีต่อสาขาวิชานั้น ๆ คุณภาพของการวิเคราะห์ และความเข้มข้นของผลงาน

7. ผู้ประเมินบทความไม่ควรใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่มีข้อมูลรองรับมาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินบทความวิจัย

8. หากผู้ประเมินบทความทราบว่ามีส่วนใดของบทความที่มีความเหมือน หรือซ้ำซ้อนกับผลงานชิ้นอื่น ๆ ผู้ประเมินบทความต้องแจ้งให้บรรณาธิการวารสารทราบด้วย

10. **ลิขสิทธิ์และสิทธิ์ (Copyright and Right)**

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

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

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

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

11. นโยบายจริยธรรมการทดลอง (Research Integrity Policy) ในงานวิจัย

บทความจากงานวิจัยที่ส่งเข้ามารับการตีพิมพ์และเกี่ยวข้องกับการทำวิจัยในมนุษย์ ต้องได้รับการอนุมัติจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคนจากสถาบันที่ผ่านการรับรองจากสำนักงานมาตรฐานการวิจัยในคน สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และเป็นไปตามมาตรฐานจริยธรรมและกฎหมายสากล สำหรับการทดลองในสัตว์ทดลองต้องผ่านการรับรองจากคณะกรรมการพิจารณาจรรยาบรรณการใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ เช่นกัน และอยู่ภายใต้หลักพระราชบัญญัติสัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ พ.ศ. 2558

นอกจากนี้วารสารคาดหวังให้ผู้เขียนเคารพสิทธิ์ความเป็นส่วนตัว (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 อย่างเป็นลายลักษณ์อักษร หรือผ่านทางการส่งข้อความผ่านระบบเว็บไซต์วารสาร

สำหรับผู้เขียน ต้องมีการใช้ข้อมูลในการเขียนงานวิจัยโดยไม่มีส่วนเกี่ยวข้องที่อาจทำให้เกิดความโน้มเอียงในงานวิจัย ในผลการศึกษา สรุปผล หรือ การอภิปรายผล โดยเฉพาะผลประโยชน์ทางตรงหรือทางอ้อมต่อการทำงานวิจัย

สำหรับผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบททความ ควรให้ข้อมูลต่อบรรณาธิการผู้รับผิดชอบบทความ หากมีผลประโยชน์เกี่ยวข้องกับงานวิจัยหรือมีความเกี่ยวข้องอย่างใดอย่างหนึ่ง ให้แจ้งบรรณาธิการ เพื่อยืนยันความโปร่งใสต่อการประเมินบทความ ทั้งนี้การเกี่ยวข้องย่อมมีโอกาสเกิดขึ้นได้เสมอ บรรณาธิการจะเป็นผู้พิจารณาให้ความเห็นในการยอมรับต่อการประเมินบทความอีกครั้ง

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม (Industrial Technology and Engingeering Pibulsongkram Rajabhat University) Print ISSN : 2697-5602, E-ISSN : 2697-5629 ฉบับนี้เป็นปีที่ 6 ฉบับที่ 1 มีเนื้อหาที่เน้นด้านทางด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีเนื้อหาครอบคลุมเกี่ยวข้องกับงานวิจัยในสาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์สาขาต่างๆ โดยบทความทั้งหมดได้ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Review) ในสาขานั้นๆ เพื่อให้ได้ผลงานที่มีคุณภาพก่อนการตีพิมพ์และสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/psru-jite/issue/view/16508 ภายใต้ระบบ ThaiJo ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย

กองบรรณาธิการและคณะกรรมการจัดทำวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาคุณภาพบทความ และผู้สนใจที่กรุณาช่วยกัน สนับสนุนและให้ความไว้วางใจผลงานของวารสารฉบับนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากนักวิจัยที่ได้กรุณาเผยแพร่ผลงานใน วารสารนี้ กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับเกียรติและความอนุเคราะห์จากท่านในโอกาสต่อไป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ เมืองไหว
บรรณาธิการ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากชานอ้อยด้วยกระบวนการไมโครอิมัลชัน .....วุฒิกร จิตจักร, รัชพล สันติวรากร	1-14
การออกแบบและพัฒนาเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรสสำหรับกลุ่มผู้ผลิตมะขามจังหวัดเพชรบูรณ์ .....ศักดิ์ศิริชัย ศรีสวัสดิ์, บุญสิน นาดอนดู่	15-26
ระบบลำเลียงและจัดเรียงชิ้นงานอัตโนมัติด้วยระบบ IOT .....ภูมิพัฒน์ ก๋าคำ, เสกสรรค์ สุชัยพร, ชัชวาล มงคล	27-39
การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์โดยการมีส่วนร่วมของชุมชนบ้านลำพุก จังหวัดสุรินทร์ .....ศิวพร แน่นหนา, ธาริณี มีเจริญ, ศุภวิช นิยมพันธุ์, พงศ์ไกร วรรณตรง, นิศานาถ แก้ววินัด, ชลิตา แก้วบุตรดี	40-55
การลดต้นทุนพลังงานในกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่นด้วยระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์ .....กมลวรรณ วงศ์วุฒิ, ดวงกมล อังอำนวยศิริ	56-71
การออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด .....ณัฐธิดา จงรักษ์, จักรพันธ์ จันทร์ไพโรจน์, ทัตพงศ์ คาดสันเทียะ	72-80
อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการอบแห้งขมิ้นชันโดยใช้เทคนิคสุญญากาศ .....วีรนุช บูรณะ, เอกภูมิ บุญธรรม, วิริยา นิตย์ธีรานนท์, จิรวัฒน์ สิตรานนท์, กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์	81-95
ความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่มีส่วนผสมของเถ้าพืช .....ทนารัช จิตชาญวิชัย	96-109

การหาคำตอบที่ดีที่สุดของที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้จังหวัดอุตรดิตถ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 110-124
.....รัตน์ติยากร มีรัตน์, บุญทรัพย์ พานิชการ

แบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มสำหรับการวางแผนการจัดหาวัตถุดิบในการผลิตอาหารสัตว์ 125-135
.....กัญญาณัฐ น่วมอิ่ม, ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ

การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากชานอ้อย ด้วยกระบวนการไมโครอิมัลชัน

QUALITY IMPROVEMENT OF BIOFUEL FROM BAGASSE BY MICROEMULSION PROCESS

วุฒิกร จิตจักร*, รัชพล สันติวรากร
Wootikorn Jitjak*, Ratchaphon Suntivarakron
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น ประเทศไทย 40002
Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang, Khon Kaen, Thailand, 40002
*Corresponding author e-mail: wootikorn_j@kkumail.com

วันที่เข้าระบบ 28 มิถุนายน 2566
วันที่แก้ไขบทความ 28 ธันวาคม 2566
วันที่ตอบรับบทความ 16 มกราคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่เป็นไมโครอิมัลชันระหว่างการผสมน้ำมันดีเซล B7 กับน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ และสารลดแรงตึงผิว และหาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผสมที่ได้จากการทำไมโครอิมัลชันเทียบกับน้ำมันดีเซล B7 และน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากชานอ้อย โดยใช้น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ผลิตจากชานอ้อยซึ่งได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการไมโครอิมัลชันที่ผสมสารลดแรงตึงผิวสัดส่วน 5%v/v-20%v/v กับน้ำมันดีเซล B7 สัดส่วน 50%v/v-90%v/v งานวิจัยนี้จะศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผสม ได้แก่ ค่าองค์ประกอบทางเคมี ค่าความร้อน ค่าความหนาแน่น ค่าความหนืดเชิงจลน์ และจุดวาบไฟ จากการทดลองพบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมน้ำมันดีเซล B7 น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ และสารลดแรงตึงผิวมี 2 สัดส่วน คือ สัดส่วนที่ 1 ประกอบด้วยน้ำมันดีเซล B7 55%v/v :น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ 25%v/v :สารลดแรงตึงผิว 20%v/v สัดส่วนที่ 2 ประกอบด้วยน้ำมันดีเซล B7 50%v/v :น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ 30%v/v :สารลดแรงตึงผิว 20%v/v จากการศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผสม ได้แก่ ค่าความร้อน ค่าความหนาแน่น ค่าความหนืดเชิงจลน์ และจุดวาบไฟ พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ น้ำมันเชื้อเพลิงผสมทั้งสองสัดส่วนจะมีความหนืดต่ำกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ ส่วนค่าความร้อนจะสูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ เพราะตัวอย่างทั้งสองสัดส่วนจะมีน้ำมันดีเซล B7 ผสมอยู่ เมื่อนำน้ำมันเชื้อเพลิงผสมทั้งสองสัดส่วนเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล B7 พบว่าทั้งสองสัดส่วนจะมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล B7 เพราะตัวอย่างทั้งสองมีน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีความหนืดสูงผสมอยู่ แต่มีค่าความร้อน ค่าความหนาแน่น และจุดวาบไฟใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล B7

คำสำคัญ: ไมโครอิมัลชัน, สารลดแรงตึงผิว, น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ

Abstract

The objectives of this research were to determine the optimum microemulsion ratio by mixing B7 diesel fuel, biofuel, and surfactants and examine the properties of mixed fuel obtained from a Microemulsion process compared with B7 diesel and biofuel produced from sugar cane bagasse, of which the quality was improved by the Microemulsion process containing surfactant of 5% v/v – 20% v/v and B7 diesel fuel of 50% v/v – 90%. This research also studied the properties of mixed fuel, namely chemical composition, heating value, density value, kinematic viscosity, and flash point. The results of the experiment showed that there were 2 appropriate proportions in mixing B7 diesel, biofuel and surfactants. The first proportion consisted of B7 diesel 55%v/v: Biofuel 25%v/v: Surfactant 20%v/v, and the second proportion consisted of B7 diesel 50%v/v: Biofuel 30%v/v: Surfactant 20%v/v. According to the study of mixed fuel properties including heating value, density value, kinematic viscosity, and flash point, it was found that the viscosity of the two proportions was lower than that of biofuel, and the heating value was higher than that of biofuel, because both proportions contained B7 diesel which led these two proportions to have higher heating value and lower viscosity than biofuel. When comparing the two proportions of mixed fuel with B7 diesel, it was found to have higher viscosity than B7 diesel in both proportions as they contained highly viscous biofuel, but the heating value, density, and flash point of these two proportions were similar to B7 diesel.

Keywords: Microemulsion, Surfactants, Biofuel

1. บทนำ

ปริมาณน้ำมันสำรองที่หมดลงอย่างรวดเร็ว ทุกประเทศทั่วโลกต้องเผชิญกับปัญหาวิกฤตการณ์ด้านพลังงานที่นับวันก็มีแต่จะรุนแรงมากขึ้น หนึ่งวิธีที่จะนำมารับมือกับปัญหานี้ได้อย่างเห็นผล คือ การเลือกใช้พลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทนซึ่งมีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ มาพัฒนาและประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ทั้งพลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล พลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพ และพลังงานก๊าซชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งล้วนแล้วเป็นพลังงานสะอาด เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และเป็นพลังงานที่ใช้แล้วไม่รู้จักหมด

ปัจจุบันมีงานวิจัยมากมายที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพชีวภาพชนิดต่างๆ ไปใช้ประโยชน์ทั้งในภาคอุสาหกรรมและภาคการเกษตร มีการปรับปรุงและพัฒนาระบบผลิต

น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพในรูปแบบใหม่ แต่อย่างไรก็ตามการนำไปใช้ในเครื่องยนต์หรือห้องเผาไหม้โดยตรงอาจก่อให้เกิดปัญหาได้ เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพมีค่าความร้อนและความหนาแน่นต่ำ (Treedet *et al*., 2012) ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันดีเซลหลายเท่า จึงเป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้งานในห้องเผาไหม้ หรือทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ อีกทั้งน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสมีการระเหยตัวได้ช้า มีผลทำให้เผาไหม้ติดยาก เกิดเขม่าไปเกาะติดที่หัวฉีดได้ ด้วยเหตุนี้จึงปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันก่อนนำไปใช้งาน โดยมีด้วยกัน 4 วิธี ได้แก่ กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น (Tranesterification) กระบวนการเอสเทอริฟิเคชั่น (Esterification) กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การทำไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) โดยการทำไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) เป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ ซึ่งการทำไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) เป็นการผสมของเหลว 2 ชนิดที่มีเฟสต่างกัน ได้แก่ น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพกับน้ำมันดีเซลเป็นเฟสที่ไม่มีขั้ว และแอลกกอฮอล์ (เฮกเซน) เป็นเฟสที่มีขั้ว ให้สามารถรวมตัวเกิดความเสถียรภาพเป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้สารลดแรงตึงผิวและสารร่วมลดแรงตึงผิวเป็นตัวเชื่อมผสาน แต่อย่างไรก็ตาม การผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงผสมให้ได้คุณภาพที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่อัตราส่วน ส่วนผสมรวมทั้งชนิดของสารลดแรงตึงผิวและตัวทำละลาย เชื้อเพลิงที่ได้จะมีขนาดอนุภาคขนาด 10-100 นาโนเมตร ไมโครอิมัลชันที่มีขนาดอนุภาคภายในเล็กมากจะทำให้มองเห็นอิมัลชันในลักษณะโปร่งใสหรือโปร่งแสง (วราภรณ์, 2555) ข้อดีของการทำไมโครอิมัลชัน คือ เป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อนไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี ไม่เกิดของเสียที่ต้องกำจัดหรือบำบัดต่อ สามารถลดปริมาณเขม่าและก๊าซไนโตรเจนออกไซน์ที่เกิดจากการเผาไหม้ภายใต้อุณหภูมิสูง ข้อเสียของการทำไมโครอิมัลชัน คือ ค่าความร้อนและค่าซีเทนต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ส่งผลต่อการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงชีวภาพ ต้องใช้เชื้อเพลิงชีวภาพปริมาณมากเพื่อป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Do *et al*., 2011)

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจการทำไมโครอิมัลชันมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากชานอ้อย โดยทำการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากการผสมระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพกับน้ำมันดีเซล และใช้สารลดแรงตึงผิวในระบบผสมสององค์ประกอบเป็นตัวเชื่อมประสาร สารลดแรงตึงผิวชนิดที่ 1 คือ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุที่นิยมใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงจากการทำไมโครอิมัลชัน ได้แก่ Span 80 และ Tween 80 ผลิต และสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ 2 ใช้คือ เฮกเซน (n-hxane) เป็นสารร่วมลดแรงตึงผิว (Jie *et al*., 2018) เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการเกิดไมโครอิมัลชัน หลังจากนั้นนำไปวัดขนาดอนุภาคและวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี หลังจากนั้นศึกษาสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง ได้แก่ ค่าความร้อน (Heating value) ความหนาแน่น (Density) ค่าความหนืดเชิงจลน์ (Kinematic viscosity) และจุดวาบไฟ (Flash point)

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่เป็นไมโครอิมัลชันระหว่างการผสมน้ำมันดีเซล B7 กับน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ และสารลดแรงตึงผิว

2.2 เพื่อหาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผสมที่ได้จากการทำไมโครอิมัลชันเทียบกับน้ำมันดีเซล B7 และน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากชานอ้อย

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การทบทวนวรรณกรรม

เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพมีค่าความร้อน และความหนาแน่นต่ำจึงเป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้งาน ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ อีกทั้งน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากกระบวนการไพโรไล ซิสมีการระเหยตัวได้ช้ามีผลทำให้ห้องเผาไหม้ติดยากเกิดเขม่าไปเกาะติดที่หัวฉีดได้ ด้วยเหตุนี้จึงปรับปรุงคุณภาพของเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพก่อนนำไปใช้งาน โดยตัวอย่างงานวิจัยที่ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ มีดังนี้

Chiaramontia *et al.* (2003) กล่าวว่าเพื่อให้มีการใช้งานเชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งเป็นพลังงานทดแทนได้สะดวก และมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีเชื้อที่เสถียรและพร้อมใช้งานในการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ การนำน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากกระบวนการ Fast pyrolysis มาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลต้องใช้สารมาช่วยผสมในน้ำมันดีเซลและน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อช่วยลดแรงตึงผิว จึงจะสามารถนำน้ำมันเชื้อไปใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Michio & Hogan (2003) ได้ทดลองผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ที่มีความหนืด ความเป็นกรดสูง และไม่ติดไฟง่าย เพรามีส่วนผสมของน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก โดยนำน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพไปไล่ความชื้นแบบหมุนเหวี่ยงหลังจากนั้นทดสอบนำน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพผสมกับน้ำมันดีเซล สารลดแรงตึงผิว และกำลังไฟฟ้าที่ใช้เพื่อให้เกิดอิมัลชันเพื่อทำให้น้ำมันมีความเสถียรมากขึ้น การทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุด คือการใช้สารลดแรงตึงผิว ทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงลดการกัดกร่อน และมีความหนืดต่ำ

Din *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผสมสารลดแรงตึงผิวชนิดสองประจุคู่บวก กับสารลดแรงตึงผิวประจุบวก สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ พบว่าเมื่อผสมสารลดแรงตึงผิวชนิดคู่บวกสามารถทำให้ประสิทธิภาพในการลดแรงตึงผิวของสารลดแรงตึงผิวชนิดเดิมมีมากขึ้น โดยที่เรียงลำดับตามนี้สารลดแรงตึงผิวชนิดสองประจุคู่บวก > กับสารลดแรงตึงผิวประจุบวก > สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ พบว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดสองประจุคู่บวกมีประสิทธิภาพมากที่สุด

Arpornpong (2011) ได้ทำการศึกษาพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันพืช-น้ำมันดีเซล โดย ใช้รีเวิร์สไมเซลล์ไมโครอิมัลชัน ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีรีเวิร์สไมเซลล์ไมโครอิมัลชันเตรียมโดยการผสม น้ำมันพืชกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 50 : 50 สารลดแรงตึงผิวต่อสารลดแรงตึงผิวร่วม (S/C ratio) ในอัตราส่วน 1:8, 1:4, 1:1 และ 4:1 โดยโมล ซึ่งพบว่า อัตราส่วน 1:8 โดยโมล ทำให้ค่าความหนืดลดลงและใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณน้อย หลังจากนั้นได้ทำการวิจัยเพิ่มเติม โดยได้ทำการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยวิธีไมโครอิมัลชันจาก การผสมระหว่าง เอทานอล น้ำมันปาล์ม และน้ำมันดีเซล โดยใช้สารลดแรงตึงผิวแบบไม่มีประจุ ได้แก่ Oleyl alcohol, Stearyl alcohol, Methyl oleate และ Brij-010 สารร่วมลดแรงตึงผิว คือ 1-Butanol, 1-Octanol และ 1-Decanol ได้ศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างสารลดแรงตึงผิวกับสารร่วมลดแรงตึงผิวที่ 1:8 และอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างน้ำมันปาล์มและน้ำมันดีเซล เป็น 1:1 ที่อุณหภูมิ 25องศาเซลเซียส พบว่า สารลดแรงตึงผิว มีผลต่อความหนืดมากกว่าสารลดแรงตึงผิวร่วม

เพ็ญพธู และคณะ (2559) ได้นำน้ำมันปาล์มมาผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อเป็นพลังงานทางเลือกโดยต้องลดความหนืดของน้ำมันปาล์มก่อนนำไปใช้ วิธีที่ใช้ลดความหนืด คือ ไมโครอิมัล โดยการผสมของเหลว 2 ชนิดที่มีเฟสต่างกัน คือ เฟสที่ไม่มีขั้ว น้ำมันปาล์มผสมกับดีเซล และเฟสที่มีขั้ว เอทานอลผสมกับบิวทานอล โดยใช้สารลดแรงตึงผิวกลุ่มเอสเทอร์ชนิดไม่มีประจุเป็นตัวเชื่อมประสาร พบว่าสามารถทำให้เชื้อเพลิงร่วมเป็นเนื้อเดียวกันได้และค่าความหนืด ความหนาแน่น จุดไหลเท และค่าความร้อน มีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานน้ำมันไปโอดีเซล

ศกลวรรณ (2561) ผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่เตรียมจากน้ำมันรำข้าวและเอทานอล โดยใช้วิธีไมโครอิมัลชันที่ใช้สารลดแรงตึงผิวในระบบผสมเป็นตัวผสาน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างสารลดแรงตึงผิวทั้งสองกลุ่มคือ 1:0, 7:3, 4:6 และ 0:1 โดยใช้อัตราส่วนสารลดแรงตึงผิวแบบผสมและสารร่วมลดแรงตึงผิว : น้ำมันรำข้าว : เอทานอล นำไปทดสอบกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างสารลดแรงตึงผิวและสารร่วมลดแรงตึงผิวที่ 1:30 สมบัติทางเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงชีวภาพไมโครอิมัลชันส่วนใหญ่เป็นไปตามมาตรฐาน มีประสิทธิภาพทางความร้อนใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลและการปล่อยมลพิษไอเสียน้อยกว่า แต่การจุดระเบิดช้ากว่า และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากกว่า

Jie *et al*. (2018) ได้นำน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากน้ำมันละหุง เมทานอลและกากของขยะมาทำการผสมกับน้ำมันดีเซล โดยเริ่มจากนำน้ำมันดีเซลมาผสมกับสารลดแรงตึงผิวในระบบสององค์ประกอบคือ Span 80 และ Tween 80 ในอัตราส่วน 7:3 โดยมวล ปั่นผสมจนใส จากนั้นเติมน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพลงไปผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเติมเฮกซานอล 2% เชื้อเพลิงผสมที่ได้จะมีความหนืด คือ 5.18 cst และจะมีค่าความร้อน 40.57 MJ/Kg ซึ่งค่าความร้อนที่ได้ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล อีกทั้งค่าความร้อนที่ได้ยังสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงผสมที่ใช้สารลดแรงตึงผิวในระบบ

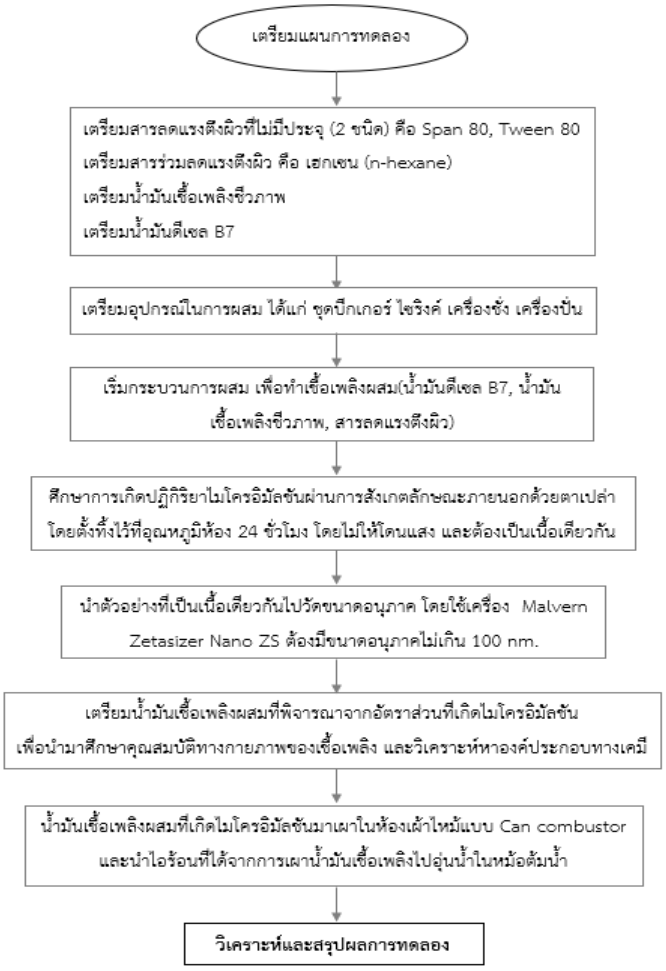
องค์ประกอบเดียวซึ่งมีค่าความร้อน 39.45 MJ/Kg และเชื้อเพลิงผสมที่ไม่มีเฮกซานอลผสมอยู่ซึ่งมีค่าความร้อน 39.88 MJ/Kg

การุญ (2562) ศึกษาการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยกระบวนการปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Trans-esterification) และเบส เป็นสารเร่งปฏิกิริยา โดยผ่านกระบวนการกลั่นเพื่อปรับปรุงคุณภาพจากสารเติมแต่งนาโนซิงค์ออกไซด์ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซล และนำไปทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ พบว่าการใช้น้ำมันปาล์มดิบที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมีค่าความหนืดมากเกินไปและทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ แต่เมื่อนำกลุ่มน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลที่ผ่านการปรับปรุงด้วยวิธีการกลั่น ผสมสารเติมแต่งนาโนซิงค์ออกไซด์ 0.05 กรัม ให้การปล่อย CO น้อยกว่า 61 % และเกิดกระบวนการสันดาปภายในสมบูรณ์มากขึ้นจากปริมาณออกซิเจนมากขึ้น

จากตัวอย่างการงานวิจัยที่ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ ทำให้พบว่า การนำน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็ว มาใช้ต้องทำการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกระบวนการทำไมโครอิมัลชัน ต้องใช้สารมาช่วยผสมในน้ำมันดีเซลและน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อช่วยลดแรงตึงผิว จึงจะสามารถนำน้ำมันเชื้อไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้คือ Span 80 และ Tween 80 ในอัตราส่วน Span 80:Tween 80 = 7:3 โดยมวล ซึ่งเป็นอัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวที่ดีที่สุด ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มีค่าความร้อนใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และใช้เฮกเซนเป็นสารร่วมลดแรงตึงผิว ในอัตราส่วน 1:8 โดยโมล โดยจะทำให้ค่าความหนืดลดลงและใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณน้อย

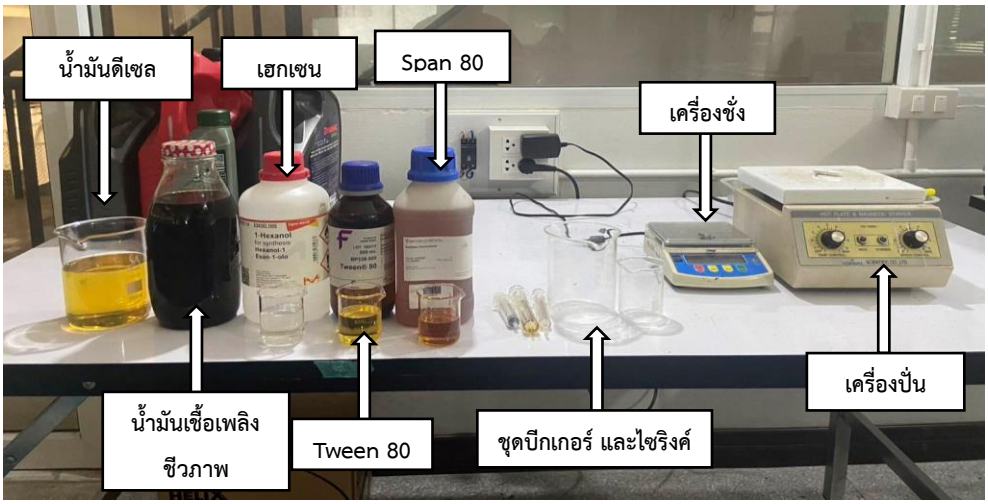
3.2 กระบวนการวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยได้เริ่มต้นขึ้นด้วยการมองเห็นปัญหาของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากชานอ้อยเนื่องจากมีความหนืดที่สูง นำไปใช้งานลำบาก และจุดติดไฟยาก ผู้จัดทำจึงมองเห็นว่าควรที่จะนำน้ำมันดีเซล B7 เพื่อให้สามารถจุดติดไฟได้ง่าย และมีการผสมสารลดแรงตึงผิวลงไปด้วยเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติลดความหนืด และช่วยเป็นตัวผสานให้น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพผสมกับน้ำมันดีเซล B7 จนเป็นไมโครอิมัลชัน กระบวนการวิจัยสามารถสรุปได้ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการวิจัย

3.3 อุปกรณ์ในการทดลอง



ภาพที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมน้ำมันดีเซล B7 น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ และสารลดแรงตึงผิว

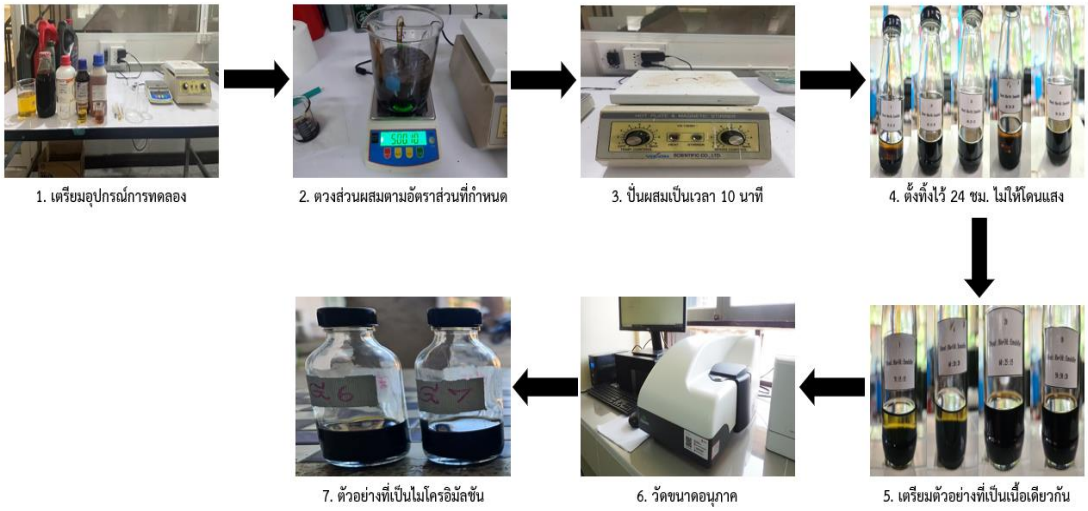
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองผสมน้ำมันดีเซล B7 น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ และสารลดแรงตึงผิว ที่แสดงในภาพที่ 2 ประกอบด้วย น้ำมันดีเซล B7 น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ผลิตจากชานอ้อย สารลดแรงตึงผิวในระบบสององค์ประกอบ คือสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ 1 ได้แก่ Span 80 และTween 80 สารลดแรงตึงผิวชนิดที่ 2 ได้แก่ เฮกเซน เป็นสารร่วมลดแรงตึงผิว ชุดบีกเกอร์ ไซริงค์ และเครื่องชั่งดิจิตอล สำหรับใช้ตวงส่วนประผสม เครื่องปั่นสำหรับใช้ปั่นผสมน้ำมันดีเซล B7 น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ และสารลดแรงตึงผิว โดยกำหนดอัตราส่วนการผสมน้ำมันดีเซล B7 น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ (Bio-oil) และสารลดแรงตึงผิว ในอัตราส่วนต่างๆ ทั้ง 30 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนผสมน้ำมันดีเซล B7 น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ และสารลดแรงตึงผิว

อัตราส่วนที่	น้ำมันดีเซล B7	น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ	สารลดแรงตึงผิว	อัตราส่วนที่	น้ำมันดีเซล B7	น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ	สารลดแรงตึงผิว
1	90	5	5	**16**	55	35	10
2	85	10	5	**17**	50	40	10
3	80	15	5	**18**	80	5	15
4	75	20	5	**19**	75	10	15
5	70	25	5	**20**	70	15	15
6	65	30	5	**21**	65	20	15
7	60	35	5	**22**	60	25	15
8	55	40	5	**23**	55	30	15
9	50	45	5	**24**	50	35	15
10	85	5	10	**25**	75	5	20
11	80	10	10	**26**	70	10	20
12	75	15	10	**27**	65	15	20
13	70	20	10	**28**	60	20	20
14	65	25	10	**29**	55	25	20
15	60	30	10	**30**	50	30	20

3.4 วิธีการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงผสมที่ได้จากการทำไมโครอิมัลชัน โดยใช้เชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจากชานอ้อย ผสมกับน้ำมันดีเซล B7 ซึ่งจะมีสารลดแรงตึงผิวช่วยในการผสมเชื้อเพลิงชีวภาพและน้ำมันดีเซล B7 ให้เป็นเนื้อเดียวกันได้ จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผสมที่ได้ กระบวนการวิจัยเริ่มต้นด้วยการผสมสารลดแรงตึงผิวในระบบสององค์ประกอบ คือ สารลดแรงตึงผิวชนิดที่ 1 โดยใช้สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุสองชนิดมาผสมกัน ได้แก่ Span 80 และ Tween 80 มาผสมกันในอัตราส่วน 7:3 โดยมวล นำสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ 1 ผสมกับสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ 2 คือ สารร่วมลดแรงตึงผิว(เฮกเซน) ในอัตราส่วนสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ 1 ต่อ สารลดแรงตึงผิวชนิดที่ 2 คือ 1:8 โมล (Arpornpong, 2011; ศกลวรรณ , 2561; Jie *et al*., 2018) เตรียมผสมน้ำมันดีเซล B7 น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ (Bio-oil) และสารลดแรงตึงผิว ในอัตราส่วนต่างๆ ทั้ง 30 ตัวอย่าง ในงานวิจัยนี้จะใช้สารลดแรงตึงผิวไม่เกิน 20 %v/v เพราะ ปริมาตรของสารลดแรงตึงผิวเป็นข้อจำกัดในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวไม่ควรมีปริมาตรเกินร้อยละ 20 โดยปริมาตร เพราะออกซิเจนในโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวมีผลทำให้ค่าร้อนในเชื้อเพลิงชีวภาพลดลง (Arpornpong, 2011) ทำการผสมน้ำมันดีเซล B7 น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ และสารลดแรงตึงผิว ทั้ง 30 ตัวอย่าง โดยใช้ บีกเกอร์ ไซริงค์ และเครื่องชั่ง ในการตวงส่วนผสมให้แม่นยำ จากนั้นทำการปั่นผสมน้ำมันดีเซล B7 น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ และสารลดแรงตึงผิว เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้ความแรงในการปั่นสูงสุด แล้วใส่ขวดตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง โดยไม่ให้โดนแสงทั้ง 30 ตัวอย่าง โดยปริมาตรเมื่อทำการผสมแล้วรวมกันอยู่ที่ 100 ml. หลังจากตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ทำการคัดกรองเบื้องต้นด้วยตาเปล่า โดยนำน้ำมันเชื้อเพลิงผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีการแยกชั้นไปวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค Zetasizer Nano ZS โดยที่เชื้อเพลิงผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน วัดขนาดอนุภาคได้ไม่เกิน 100 nm. แสดงว่าเป็นไมโครอิมัลชัน นำเชื้อเพลิงผสมที่เป็นเป็นไมโครอิมัลชันมาทำการทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิง ได้แก่ ความหนาแน่น (Density) ค่าความหนืดเชิงจลน์ (Kinematic viscosity) จุดวาบไฟ (Flash point) ค่าความร้อน (Heating value) ค่าองค์ประกอบทางเคมี (Ultimate analysis) โดยรายละเอียดเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2 และวิธีการทดลองสามารถสรุปได้ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ขั้นตอนผสมน้ำมันดีเซล B7 น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ และสารลดแรงตึงผิว

3.5 วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

การวิเคราะห์	รุ่น	เครื่องวิเคราะห์
ขนาดอนุภาค	Nano ZS	Malvern Zetasizer Nano ZS
องค์ประกอบทางเคมี	ASTM D5373	LECO SC-144DR
ความหนาแน่น	ASTM D4052	Digital Scales
ค่าความหนืดเชิงจลน์	ASTM D445	Kinetic Viscosity Analyzer
จุดวาบไฟ	ASTM D93-C	Flash Point Tester
ค่าความร้อน	DIN 51900	Torino Bomb Calorimeter

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง

เมื่อทำการผสมน้ำมันดีเซล B7 น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ และสารลดแรงตึงผิว จะได้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่เป็นไมโครอิมัลชัน ขนาดอนุภาคไม่เกิน 100 nm. มีความหนืดลดลงน้อยกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ และสามารถติดไฟได้ ดังแสดงในภาพที่ 4

ภาพที่ 4 น้ำเชื้อเพลิงผสมที่เป็นไมโครอิมัลชัน

4.2 ผลการผสมน้ำมันดีเซล B7 น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ และสารลดแรงตึงผิว

จากตารางที่ 3 พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมที่เป็นไมโครอิมัลชันซึ่งมีขนาดอนุภาคไม่เกิน 100 nm. คือ เชื้อเพลิงผสมตัวอย่างที่ 29 ที่ประกอบด้วย น้ำมันดีเซล B7 55%v/v ต่อน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ 25%v/v ต่อสารลดแรงตึงผิว 20%v/v มีขนาดอนุภาค 44.11 nm. เชื้อเพลิงผสมตัวอย่างที่ 30 ที่ประกอบด้วย น้ำมันดีเซล B7 50%v/v ต่อน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ 30%v/v ต่อสารลดแรงตึงผิว 20%v/v มีขนาดอนุภาค 26.37 nm. ทำให้อธิบายได้ว่าสารลดแรงตึงผิว 20%v/v นั้นเหมาะสมที่สุดที่จะเป็นตัวช่วยผสานให้น้ำมันดีเซล B7 และน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพเป็นเนื้อเดียวกัน และเป็นไมโครอิมัลชัน แต่ถ้าเพิ่มการใช้สารลดแรงตึงผิวให้มากกว่า 20%v/v จะส่งผลให้ค่าความร้อนลดต่ำลง (Arpornpong, N., 2011) ขนาดอนุภาคที่แสดงในตารางที่ 3 นั้นสามารถวิเคราะห์ได้จากการนำเชื้อเพลิงผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Malvern Zetasizer Nano ZS

ตารางที่ 3 แสดงอัตราส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงผสมที่เป็นไมโครอิมัลชัน

ตัวอย่างที่	น้ำมันดีเซล B7	เชื้อเพลิงชีวภาพ	สารลดแรงตึงผิว (S:C)				ขนาดอนุภาค (nm)
			S (S1:S2 =7:3)		C	รวม	
			Span 80 (S1)	Tween 80 (S2)	เฮกเซน		
29	55.00	25.00	8.65	3.71	7.64	20	44.11
30	50.00	30.00	8.65	3.71	7.64	20	26.37

4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบทางเคมี และผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง

จากตารางที่ 4 และ ตารางที่ 5 พบว่าอัตราส่วนสารลดแรงตึงผิวส่งผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของเชื้อเพลิงผสม และส่งผลต่อคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผสม การใช้สารลดแรงตึงผิวเป็น Span 80 และ Tween 80 และใช้สารร่วมลดแรงตึงผิวเป็นเฮกเซน ช่วยให้เชื้อเพลิงผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน จากการศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผสม ได้แก่ ค่าความร้อน ค่าความหนาแน่น ค่าความหนืดเชิงจลน์ และจุดวาบไฟ พบว่าทั้งสองตัวอย่างจะมีค่าความหนืดใกล้เคียงกัน โดยตัวอย่างที่ 30 จะมีค่าความหนืดต่ำกว่าเล็กน้อย แต่ตัวอย่างที่ 29 จะมีค่าความร้อนที่สูงกว่าตัวอย่างที่ 30 เพราะตัวอย่างที่ 29 จะมีปริมาณของน้ำมันดีเซล B7 ผสมอยู่มากกว่าตัวอย่างที่ 30 จึงส่งผลตัวอย่างที่ 29 มีค่าความร้อนสูงกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ พบว่าตัวอย่างที่ 29 และตัวอย่างที่ 30 จะมีความหนืดต่ำกว่าน้ำมันน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ ส่วนค่าความร้อนจะสูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ เพราะตัวอย่างทั้งสองจะมีน้ำมันดีเซล B7 ผสมอยู่จึงทำให้ทั้งสองตัวอย่างมีค่าความร้อนสูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ และมีค่าความหนืดต่ำกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล B7 พบว่ามีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล B7 เพราะตัวอย่างทั้งสองมีน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีความหนืดสูงผสมอยู่ แต่มีค่าความร้อน ค่าความหนาแน่น และจุดวาบไฟใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล B7

ตารางที่ 4 ผลวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียด

เชื้อเพลิงผสมตัวอย่างที่	Carbon (%)	Hydrogen (%)	Oxygen (%)	Nitrogen (%)
ดีเซล B7	85.81	13.35	0.84	-
Bio-Oil	42.68	6.62	50.32	0.38
ตัวอย่างที่ 29	75.92	12.63	11.45	-
ตัวอย่างที่ 30	67.48	11.63	20.89	-

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง

สมบัติทางกายภาพ	หน่วย	Bio-Oil	ตัวอย่างที่ 29	ตัวอย่างที่ 30
1) ค่าความร้อน	MJ/Kg	16.73	44.14	33.33
2) ค่าความหนาแน่น	g/ml	1.091	0.820	0.990
3) ค่าความหนืดเชิงจลน์	cSt	184.23	51.18	46.19
4) จุดวาบไฟ	°C	-	66.00	66.00

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนสารลดแรงตึงผิวส่งผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของเชื้อเพลิงผสม และส่งผลต่อคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผสม การใช้ Span 80 และ Tween 80 เป็นสารลดแรงตึงผิวช่วยให้เชื้อเพลิงผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน การสารลดแรงตึงผิว 20%v/v นั้นเหมาะสมที่สุดที่จะเป็นตัวช่วยผสานให้น้ำมันดีเซล B7 และน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพเป็นเนื้อเดียวกัน และเป็นไมโครอิมัลชัน เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างน้ำมันดีเซล เชื้อเพลิงชีวภาพ และสารลดแรงตึงผิว ที่อัตราส่วนน้ำมันดีเซล B7 55%v/v ต่อน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ 25%v/v ต่อสารลดแรงตึงผิว 20%v/v และอัตราส่วนน้ำมันดีเซล B7 50%v/v ต่อน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ 30%v/v ต่อสารลดแรงตึงผิว 20%v/v เชื้อเพลิงผสมทั้งสองอัตราส่วนจะมีคุณภาพการผสมดีที่สุดและเป็นไมโครอิมัลชัน จากการศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผสม ได้แก่ ค่าความร้อน ค่าความหนาแน่น ค่าความหนืดเชิงจลน์ และจุดวาบไฟ พบว่าตัวอย่างเชื้อเพลิงผสมทั้งสองจะมีความหนืดต่ำกว่าน้ำมันน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ ส่วนค่าความร้อนจะสูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ เพราะตัวอย่างทั้งสองจะมีน้ำมันดีเซล B7 ผสมอยู่ จึงทำให้ทั้งสองตัวอย่างมีค่าความร้อนสูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ และมีค่าความหนืดต่ำกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล B7 พบว่ามีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล B7 เพราะตัวอย่างทั้งสองมีน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีความหนืดสูงผสมอยู่ แต่มีค่าความร้อน ค่าความหนาแน่น และจุดวาบไฟใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล B7

7. เอกสารอ้างอิง

การุญ ฟังสุวรรณรักษ์. (2562). **ผลกระทบของการเติมสารเติมแต่งในน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีต่อสมรรถนะ เครื่องยนต์ดีเซล**. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7, หาดกะรน, จังหวัดภูเก็ต.

เพ็ญพธู ศิริรัตนประเสริฐ. (2559). **เชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันปาล์มด้วยวิธีไมโครอิมัลชันโดยใช้**

สารลดแรงตึงผิวกลุ่มเอสเทอร์ชนิดไม่มีประจุ. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วราภรณ์ จรรยาประเสริฐ. (2555). **นาโนเทคโนโลยีในการนำส่งทางผิวหนัง** (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมชนสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด.

ศกลวรรณ เพิ่มบุญ. (2561). **การศึกษาเชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันรำข้าวและเอทานนอลด้วยวิธีไมโครอิมัลชันเพื่อใช้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด**. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

Arpornpong, N. (2011). **Alternative renewable biofuel from palm oil-diesel based reverse micelle microemulsion.** (Doctoral dissertation). Chulalongkorn University, Bangkok.

Chiaramonti, D., Bonini, M., Fratini, E., Tondi, G., Gartner, K., Bridgwater, A.V., Grimm, H.P., Soldaini, I., Webster, A., & Baglioni, P. (2003). Development of emulsions from biomass pyrolysis liquid and diesel and their use in engines. **Biomass and Bioenergy**, 25(1), 85 – 99.

Din, K.U., Sheikh, M.S. & Dar, A.A. (2009). Interaction of a cationic gemini surfactant with conventional surfactants in the mixed micelle and monolayer formation in aqueous medium. **Journal of Colloid and Interface Science**, 333(2), 601-605.

Do, L.D., Singh, V., Chen, L., Kibbey, T.C.G., Gollahalli, S.R. & Sabatini, D.A. (2011). Algae, canola, or palm oils-diesel microemulsion fuels: Phase behaviors, viscosity, and combustion properties. **International Journal of Green Energy**, 8(7), 748-767.

Jie, L., Yingying, Q., Xingzhong, Y., Lijian, L., Guangming, Z., Longbo, J., Jianguang, S., Yuan, L., Xiaowei, D., Zhaoxue, Y., & Xuemei, L. (2018). Span80/Tween80 stabilized bio-oil-in-diesel microemulsion: Formation and combustion. **Renewable Energy**, 126, 774-782.

Michio, L., Maria, S. & Hogan, E. (2003). Emulsification of Pyrolysis Derived Bio-oil in Diesel Fuel. **Biomass and Bioenergy**, 24(3), 221 – 232.

Treedet, W., & Suntivarakorn, R. (2012). A Comparison of Energy Conversion Between Pyrolysis and Gasification Process for Bio-Fuel Production from Sugarcane Trash. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**, 6(6), 622-626.

การออกแบบและพัฒนาเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส สำหรับกลุ่มผู้ผลิตมะขามจังหวัดเพชรบูรณ์

A DESIGN AND DEVELOPMENT OF A SEASONED SOUR TAMARIND CUBE FORMING MACHINE FOR TAMARIND PRODUCERS IN PHETCHABUN PROVINCE

ศักดิ์ศิริชัย ศรีสวัสดิ์*, บุญสิน นาดอนดู่
Saksirichai Srisawad*, Boonsin Nadondu
คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์ ประเทศไทย 67000
Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University,
Muang, Phetchabun, Thailand, 67000.
*Corresponding author e-mail: Seksunsek@pcru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 15 สิงหาคม 2566
วันที่แก้ไขบทความ 10 ธันวาคม 2566
วันที่ตอบรับบทความ 15 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เน้นการออกแบบและพัฒนาเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรสสำหรับกลุ่มผู้ผลิตมะขามในจังหวัดเพชรบูรณ์ ตัวเครื่องประกอบด้วยชุดด้ามขึ้นรูป ชุดสปริงดันด้ามขึ้นรูป และชุดฐานเครื่อง ขนาดเครื่องทั้งหมด คือ 200 x 305 x 386 มม. ผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องมีความพึงพอใจในออกแบบและพัฒนาเครื่อง โดยปริมาณการผลิตเครื่องที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานเร็วขึ้น 1.8 เท่า คิดเป็น 83.3% เมื่อเทียบกับเครื่องเดิม ขนาดก้อนมะขามหลังการขึ้นรูปเฉลี่ยเปลี่ยนไปคิดเป็นกว้างเพิ่มขึ้น 102.8 % ยาวลดลง 95.1 % และสูงเพิ่มขึ้น 102.8 % และแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปเฉลี่ยประมาณ 3.6 นิวตัน การพัฒนาเครื่องยังช่วยเพิ่มความสะดวกในกระบวนการบรรจุหีบห่อ โดยก้อนมะขามหลังการขึ้นรูปมีเหลี่ยมวัสดุที่เข้ารูปและไม่คลายตัว ทำให้การบรรจุเข้ากล่องเป็นไปอย่างสะดวกและสวยงาม

คำสำคัญ: การออกแบบและพัฒนา, เครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส, สมรรถนะการผลิต

Abstract

This research focused on the design and development of a seasoned sour tamarind cube forming machine for tamarind producers in Phetchabun Province. The machine consisted of a molding handle, a spring molding handle, and a base. The size of the machine size was 200 x 305 x 386 mm. The results showed that relevant experts were satisfied with the design and development of the machine. The production speed of the machine could be increased by 1.8 times or 83.3% compared with the original machine. The average size change of the tamarind cube after molding was 102.8%, the length was reduced by 95.1%, and the height increased by 102.8%. The average forming force was of about 3.6 N. The development of the machine also improved the convenience of the packaging process. The formed tamarind cube was square and not loosen; therefore, the packaging was convenient and beautiful.

Keywords: Design and development, Tamarind cube forming machine, Production performance

1. บทนำ

จังหวัดเพชรบูรณ์สามารถผลิตมะขามเปรี้ยวปี 2566 จำนวน 1,807.85 ตัน (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2566) มีกลุ่มวิสาหกิจชุมชนนำมะขามเปรี้ยวไปสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับจังหวัดและประเทศหลากหลายกลุ่ม วิสาหกิจชุมชนกลุ่มดวงทอง ตำบลห้วยโป่ง อำเภอหนองไผ่ จังหวัดเพชรบูรณ์ เป็นอีกหนึ่งกลุ่มที่จำหน่ายผลิตภัณฑ์จากมะขามเปรี้ยวได้พัฒนาผลิตภัณฑ์ส่งขายตามห้างสรรพสินค้าสร้างรายได้ให้กับกลุ่มจนกลายเป็นรายได้สำคัญ ผลิตภัณฑ์“มะขามเปรี้ยวอัดก้อน” และเคยได้รับรางวัลชนะเลิศปี 2559 จากสำนักงานพัฒนาชุมชนจังหวัดเพชรบูรณ์ และเป็นสินค้าหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ ระดับ 4 ดาว มียอดความต้องการสั่งซื้อภายในประเทศเฉลี่ยเดือนละ 10,000 กล่อง และยังเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง ในการลงพื้นที่ศึกษากระบวนห่อก้อนเนื้อมะขามนี้จะผ่านการอบไล่ความชื้นเนื้อมะขามจะแข็งและเหนียวเล็กน้อย ลักษณะก้อนเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 25.4 x 25.4 x 25.4 มิลลิเมตร 1 กล่อง บรรจุ 12 ก้อน น้ำหนักเฉลี่ย 120 กรัม/กล่อง โดยปกติจะห่อก้อนเนื้อมะขามประมาณ 120,000 ก้อน/เดือน ในกระบวนการนี้จะแยกออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกพับห่อก้อนเนื้อมะขามโดยใช้อลูมิเนียมฟอยล์ห่อกระดาษเคลือบ ในการพับห่อก้อนเนื้อมะขามวัสดุที่ใช้ห่อจะยังไม่เข้ารูปทรงจะเกิดการคายตัวฟูหลังการห่อตามรูปทรงก้อนมะขามที่เกิดจากกระบวนการตัดก้อนเนื้อมะขาม และขั้นตอนสองการขึ้นรูปก้อนเนื้อมะขามให้เข้ารูปทรงลูกบาศก์ โดย 2 ขั้นตอนนี้จ้างแรงงาน 10 คน โดยคิดก้อนละ 0.30 บาท แรงงานหนึ่งคนสามารถห่อได้ 1,500 ก้อน/วัน คิดเป็น 450 บาท/

คน ซึ่งมะขาม 1 ก้อน จะขึ้นรูปก้อนเนื้อมะขามจำนวน 2 ครั้ง ทุกก้อน (พรรณนิภา, การสื่อสารส่วนบุคคล, 22 สิงหาคม 2561) เพื่อให้สามารถเรียงบรรจุลงกล่องได้อย่างพอดี ด้วยอุปกรณ์ทำจากสเตนเลสแท่งและใช้มือกดลงบนพิมพ์กรอบสี่เหลี่ยมด้วยแรงงานคน เนื่องจากต้องใช้ออกแรงค่อนข้างมาก เมื่อทำงานเป็นเวลานานๆ จึงเกิดความเมื่อยล้า จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า (นันท์ปภัทร์ และคณะ, 2562) ได้พัฒนานวัตกรรมการผลิตปลาร้ามอญอัดก้อนกึ่งสำเร็จรูปโดยเครื่องอัดเป็นก้อนประสานด้วยกลีเซอรีนข้อเสียทำให้ค่าความแข็ง การเกาะรวมตัวกัน ค่าความเหนียว ค่าพลังงานที่ใช้ในการบดเคี้ยวเพิ่มสูงขึ้น (ประพันธ์พงษ์ และคณะ, 2565) ได้ศึกษาสมรรถนะเครื่องขึ้นรูปเตาซุปเปอร์อั้งโล่ประกอบด้วยแม่พิมพ์ตัวผู้ ตัวเมีย ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าและระบบนิวแมติกส์ในการอัดขึ้นรูป ข้อจำกัดคือการเพิ่มความดันลมส่งผลต่อปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นเฉลี่ย 13.35% (ฤทธิรงค์, 2562) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องกดแผ่นข้าวโป่ง โดยนำระบบนิวแมติกส์เข้ามาช่วยในการกดแผ่นข้าวโป่งและใช้ระบบพีแอลซีในการควบคุมการทำงาน (Daramna & Almasri, 2019) เครื่องทำน้ำตาลก้อนโดยการอัดน้ำตาลลงในแม่พิมพ์ลูกบาศก์ จากนั้นเป่าลมร้อนให้ก้อนน้ำตาลเพื่อทำให้น้ำระเหย การทำงานควบคุมโดยอุปกรณ์ PLC และระบบนิวเมติกไฟฟ้า (Anil *et al*., 2019) พัฒนาและประเมินเครื่องอัดชีวมวลแรงดันต่ำแบบมือซึ่งทำงานโดยใช้กลไกการกดสกรู (เอกรัฐ และยุทธพงษ์, 2559) ศึกษาและคิดค้นการทำอุปกรณ์ทำลูกปูนตามแนวปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นประเด็นปัญหาการไม่เข้ารูปทรงของก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรสหลังการห่อ สองปัญหาการลดรอบการขึ้นรูปก้อนเพื่อบรรจุ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการแก้ปัญหาโดยการออกแบบและพัฒนาเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส โดยใช้กลไกง่ายๆ ต้นทุนการผลิตไม่สูง สะดวกต่อการใช้งานและการซ่อมบำรุง สำหรับเพิ่มปริมาณการผลิต

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส สำหรับกลุ่มผู้ผลิตมะขามจังหวัดเพชรบูรณ์

2.2 เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส สำหรับกลุ่มผู้ผลิตมะขามจังหวัดเพชรบูรณ์

2.3 เพื่อประเมินความพึงพอใจผู้ใช้งานเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส สำหรับกลุ่มผู้ผลิตมะขามจังหวัดเพชรบูรณ์

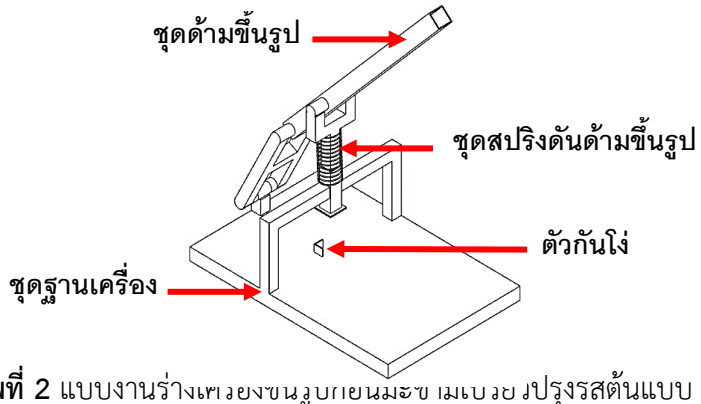
3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส สำหรับกลุ่มผู้ผลิตมะขามจังหวัดเพชรบูรณ์ มีขั้นตอนดังนี้

3.1.1 ลงพื้นจริงเพื่อเก็บข้อมูลปัญหาจริงกับกลุ่มผู้ผลิตมะขามจังหวัดเพชรบูรณ์ และใช้การสัมภาษณ์แบบเจาะลึก (In-depth interview) โดยผู้ให้ข้อมูลสำคัญ ได้แก่ ผู้เชี่ยวชาญที่มีส่วนเกี่ยวข้อง จำนวน 3 คน ได้แก่ ผู้เชี่ยวชาญด้านนวัตกรรมและเทคโนโลยี ด้านการขึ้นรูปก้อนมะขาม และด้านบรรจุภัณฑ์ เก็บข้อมูลด้วยแบบสัมภาษณ์ในการให้ข้อมูลประกอบการออกแบบและพัฒนา

ภาพที่ 1 เครื่องมืออัดขึ้นรูปก้อนมะขามของวิสาหกิจชุมชนดวงทอง

3.1.2 ออกแบบร่างเครื่องต้นแบบ โดยยึดหลักการใช้กลไกง่ายๆ ต้นทุนการผลิตไม่สูง สะดวกต่อการใช้งานและการซ่อมบำรุง ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แบบงานร่างเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรสต้นแบบ

3.1.3 ดำเนินการวิเคราะห์แรงเฉือนและโมเมนต์ดัดในคาน รวมถึงความเค้นสูงสุดในคานของเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรสต้นแบบ ได้ตามสมการที่ (1)

$$\sum F_y = 0$$
$$\sum F_x = 0 \qquad (1)$$
$$\sum M = 0$$

3.1.4 ดำเนินการสร้างเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรสต้นแบบ ทำจากสเตนเลส เบอร์ 304 มีมิติ กว้าง ยาว สูง = 200 X 305 X 386 มม. ดังภาพที่ 3

ภาพที่ 3 เครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรสต้นแบบ

3.1.5 ทดลองใช้ต้นแบบเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส สำหรับกลุ่มผู้ผลิตมะขามจังหวัดเพชรบูรณ์ ที่พัฒนาขึ้น โดยการทดลองกับผู้เชี่ยวชาญที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

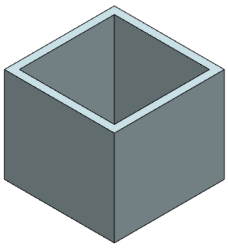
ภาพที่ 4 การทดลองใช้งาน

3.1.6 วิเคราะห์ข้อมูลด้านการออกแบบและพัฒนาเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส โดยใช้สถิติ ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สถิติที่ใช้ในการบรรยาย

3.2 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส สำหรับกลุ่มผู้ผลิตมะขามจังหวัดเพชรบูรณ์ โดยวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ คือ ก้อนมะขามเปรี้ยวห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ห่อกระดาษเคลือบขนาดน้ำหนักก้อนอยู่ระหว่าง 10-12 กรัม/ก้อน (ภาพที่ 5) อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ได้แก่ เครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรสต้นแบบ บล็อกสเตนเลสสำหรับขึ้นรูปก้อนมะขามปรุงรสขนาดช่องด้านใน 25.4 x 25.4 x 25.4 มม. (ภาพที่ 6) เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ค่าความละเอียด 0.05 มม. เครื่องวัดแรงดึงแรงกด (Force gauge data logger) รุ่น 475044-SD (ภาพที่ 7)

เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลค่าความละเอียด 0.2 กรัม กล้องถ่ายภาพ และนาฬิกาจับเวลา ทำการเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ ขนาดกว้าง ยาว สูง ของก้อนมะขามก่อนและหลังการขึ้นรูป แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปก้อน ลักษณะก้อนมะขามก่อนและหลังการขึ้นรูปก้อน และปริมาณการผลิต จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย

ภาพที่ 5 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 6 บล็อกสเตนเลสสำหรับขึ้นรูปก้อนมะขาม
ขนาดช่องด้านใน 25.4 x 25.4 x 25.4 มม.

ภาพที่ 7 เครื่องวัดแรงดึงแรงกด (Force gauge data logger)

3.3 การประเมินความพึงพอใจผู้ใช้งานเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส สำหรับกลุ่มผู้ผลิตมะขามจังหวัดเพชรบูรณ์ โดยกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยเลือกแบบเฉพาะเจาะจง คือ ผู้ใช้งานของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มดวงทอง ตำบลห้วยโป้ง อำเภอหนองไผ่ จังหวัดเพชรบูรณ์ จำนวน 10 คน

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยเป็นแบบสอบถามโดยดัชนีความสอดคล้องของข้อคำถาม (IOC) เท่ากับ 1 เก็บรวบรวมข้อมูลด้านการออกแบบและพัฒนา ด้านสมรรถนะการทำงาน และด้านความพึงพอใจผู้ใช้งาน การวิเคราะห์ข้อมูลใช้สถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสถิติเชิงบรรยาย โดยมีเกณฑ์คะแนน ดังนี้

4.21-5.00 หมายถึง ระดับความพึงพอใจ มากที่สุด

3.41-4.20 หมายถึง ระดับความพึงพอใจ มาก

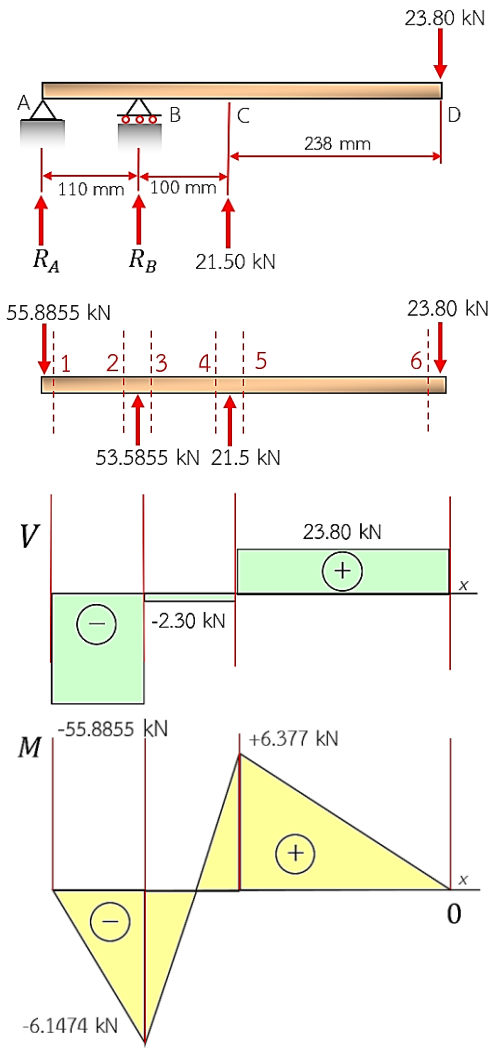
2.61-3.40 หมายถึง ระดับความพึงพอใจ ปานกลาง

1.81-2.60 หมายถึง ระดับความพึงพอใจ น้อย

1.00-1.80 หมายถึง ระดับความพึงพอใจ น้อยที่สุด

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้านการออกแบบและพัฒนาเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส โดยหาแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดในคาน รวมถึงความเค้นสูงสุดในคาน



วิธีทำ

หาแรงปฏิกิริยาที่ A เรียกว่า RA

$$\sum F_y = 0$$

$$\sum F_y = +R_A + R_B + 21.5\ kN - 23.8\ kN \quad (1)$$

ให้ B เป็นจุดหมุน (จุดหมุนเป็น 0)

$$0 = -(R_A \times 0.110) + (21.5 \times 0.100) - (23.8 \times 0.338)$$

$$0 = -(R_A \times 0.110) + (2.15) - (8.0444)$$

$$0 = -(R_A \times 0.110) - (5.8944)$$

$$R_A = -53.5855\ kN \uparrow$$

แทนค่าใน (1)

$$\sum F_y = -53.5855 + R_B + 21.5\ kN - 23.8\ kN$$

$$R_A = 55.8855\ kN \uparrow$$

หาแรงเฉือนในคาน $\sum F_y = 0$

$$-55.8855 - V_1 = 0 \qquad V_1 = -55.8855\ kN$$

$$-55.8855 - V_2 = 0 \quad V_2 = -55.8855\ kN$$
$$-55.8855 + 53.5855 - V_3 = 0 \quad V_3 = -2.30\ kN$$
$$-55.8855 + 53.5855 - V_4 = 0 \quad V_4 = -2.30\ kN$$
$$-55.8855 + 53.5855 + 21.5 - V_5 = 0 \quad V_5 = +23.80\ kN$$
$$-55.8855 + 53.5855 + 21.5 - V_6 = 0 \quad V_6 = +23.80\ kN$$

หาโมเมนต์ดัดในคาน B เป็นจุดหมุน

$$\sum M = 0$$

$$-(55.8855)(0) + M_1 = 0 \quad M_1 = 0\ kN.m$$
$$-(55.8855)(0.11) + M_2 = 0 \quad M_2 = -6.1474\ kN.m$$
$$-(55.8855)(0.11) + M_3 = 0 \quad M_3 = -6.1474\ kN.m$$
$$-(55.8855)(0.21) + (53.5855)(0.1) + M_4 = 0 \quad M_4 = +6.377\ kN.m$$
$$-(55.8855)(0.21) + (53.5855)(0.1) + M_5 = 0 \quad M_5 = 6.377\ kN.m$$
$$-(55.8855)(0.448) + (53.5855)(0.338) + (21.5)(0.238) + M_6 = 0$$

แรงเฉือนเกิดมากที่สุดบริเวณ BC $V_m = 55.8855\ kN$ #

โมเมนต์ดัดในคานเกิดมากที่สุดที่จุด B $M_m = \left| M_B \right| = +6.377\ kN.m$ #

4.2 ผลการวิจัยผู้เชี่ยวชาญส่วนเกี่ยวข้องมีความพึงพอใจภาพรวมค่าเฉลี่ย 3.56 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.27 อยู่ในระดับมาก ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปผลการออกแบบและพัฒนาเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส

ประเด็นการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	S.D.	สรุปผล
1. ความเหมาะสมในด้านการออกและพัฒนาชุดด้ามขึ้นรูปก้อนมะขาม	3.67	1.16	มาก
2. ความเหมาะสมในด้านการออกและพัฒนาชุดสปริงดันด้ามขึ้นรูปก้อนมะขาม	3.67	0.58	มาก
3. ความเหมาะสมในด้านการออกและพัฒนาชุดฐานเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขาม	3.33	2.08	ปานกลาง
รวมเฉลี่ย	**3.56**	**1.27**	**มาก**

4.2 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส ดังนี้

4.2.1 ขนาดกว้าง ยาว สูง ของก้อนมะขามก่อนและหลังการขึ้นรูปได้มาจากผลิตภัณฑ์ของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มดวงทอง ตำบลห้วยโป้ง อำเภอหนองไผ่ จังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งจากตารางที่ 2 ผลการทดสอบพบว่า ก่อนการขึ้นรูปก้อนมีขนาดกว้าง ยาว สูง เฉลี่ย 25, 26.7 และ 25 มม. ตามลำดับ ส่วนขนาดก้อนมะขามหลังขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ย 25.7, 25.4 และ 25.7 มม. ตามลำดับ โดยสมรรถนะทำงานขึ้นรูปก้อนมะขามมีขนาดคิดเป็นกว้างเพิ่มขึ้น 102.8 % ยาวลดลง 95.1 % และสูงเพิ่มขึ้น 102.8 %

ตารางที่ 2 ผลการหาขนาดกว้าง ยาว สูง ของก้อนมะขามก่อนและหลังการขึ้นรูป

ลำดับที่	ขนาดก้อนมะขามก่อนขึ้นรูป (มม.)			ขนาดก้อนมะขามหลังขึ้นรูป (มม.)		
	กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง
1	25	27	25	25.8	25.4	25.8
2	25	26	25	25.3	25.4	25.3
3	25	26	25	25.3	25.4	25.3
4	25	28	25	26.3	25.4	26.3
5	25	26	25	25.3	25.4	25.3
6	25	26	25	25.3	25.4	25.3
7	25	27	25	25.8	25.4	25.8
8	25	27	25	25.8	25.4	25.8
9	25	26	25	25.3	25.4	25.3
10	25	28	25	26.3	25.4	26.3
ค่าเฉลี่ย	**25**	**26.7**	**25**	**25.7**	**25.4**	**25.7**

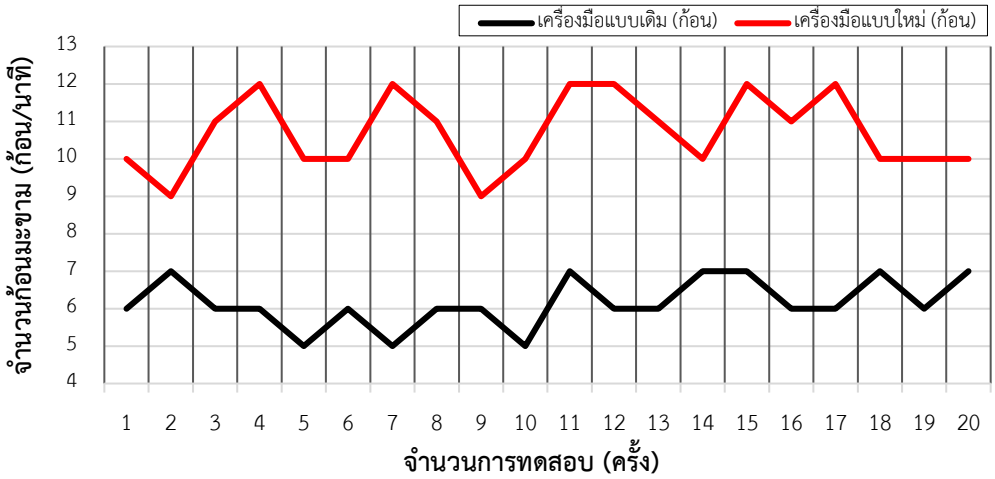
4.2.2 ผลการหาแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปก้อน ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดแรงดึงแรงกด (force gauge data logger) ของลักษณะก้อนมะขามหลังการขึ้นรูปก้อน จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบพบว่า แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปก้อน เฉลี่ย 3.6 นิวตัน ส่วนลักษณะก้อนมะขามก่อนและหลังการขึ้นรูปก้อน ปรากฏว่า ก้อนมะขามก่อนการขึ้นรูปเมื่อทำการห่อแล้วกระดาษจะคายตัวออกและลักษณะก้อนมะขามจะไม่เป็นรูปทรงทำให้เวลาบรรจุเข้ากล่องจะทำได้ยากลำบาก แต่มะขามหลังการขึ้นรูปแล้วจะเกิดการเข้ารูปมีเหลี่ยมมากกว่าเวลาบรรจุกล่องจะสะดวกและสวยงามกว่า

ตารางที่ 3 สรุปผลแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปก้อน และลักษณะก้อนมะขามก่อนและหลังการขึ้นรูปก้อน

ลักษณะก้อนมะขามก่อนขึ้นรูป	แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปก้อน (นิวตัน)	ลักษณะก้อนมะขามหลังขึ้นรูป
	3.6	

4.2.3 ผลการหาปริมาณการผลิต พบว่า ทำการทดสอบเวลาในการทำงาน 1 นาที เครื่องมือแบบใหม่สามารถขึ้นรูปก้อนมะขามเฉลี่ย 11 ก้อน/นาที ขณะที่เครื่องมือแบบเดิมสามารถขึ้นรูปก้อน

มะขามเฉลี่ย 6 ก้อน/นาที ซึ่งเครื่องที่ผู้วิจัยออกแบบและพัฒนาขึ้นมีสมรรถนะการทำงานเร็วกว่าคิดเป็น 1.8 เท่า คิดเป็น 83.3% ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การทดสอบหาปริมาณการผลิต

4.3 ผลการประเมินความพึงพอใจผู้ใช้งานเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส ในภาพรวมมีค่าเฉลี่ย 3.98 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.46 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก เมื่อวิเคราะห์เป็นรายด้าน พบว่า ด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด คือ ด้านความพึงพอใจผู้ใช้งานค่าเฉลี่ย 4.36 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.51 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด รองลงมา คือ ด้านสมรรถนะการทำงานค่าเฉลี่ย 4.28 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.39 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด และด้านที่มีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ ด้านการออกแบบและพัฒนาค่าเฉลี่ย 3.30 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.48ความพึงพอใจอยู่ในระดับปานกลาง เมื่อวิเคราะห์เป็นรายข้อพบว่าข้อที่ค่าเฉลี่ยสูงที่สุด ได้แก่ ขนาดกว้างยาวสูงของก้อนมะขามก่อนและหลังการขึ้นรูป ลักษณะก้อนมะขามก่อนและหลังการขึ้นรูปก้อน และปริมาณการผลิต ส่วนข้อที่มีค่าเฉลี่ยรองลงมา ได้แก่ ความสะดวกในการนำก้อนมะขามเข้า – ออก จากเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขาม ความปลอดภัยในการใช้งานเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขาม และความสะดวกในการทำความสะอาดเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขาม ส่วนข้อที่มีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุด ได้แก่ ความเหมาะสมในด้านการออกและพัฒนาชุดฐานเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขาม

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การออกแบบและพัฒนาเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรส สำหรับกลุ่มผู้ผลิตมะขามจังหวัดเพชรบูรณ์ ตัวเครื่องมีขนาด 200 x 305 x 386 มม. ประกอบด้วย ชุดด้ามขึ้นรูป ชุดสปริงดันด้ามขึ้นรูป และชุดฐานเครื่อง ผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนามีความพึงพอใจมาก

ด้านสมรรถนะการทำงาน ขนาดก้อนมะขามหลังการขึ้นรูปค่าเฉลี่ย 25.7, 25.4 และ 25.7 มม. แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปก้อนเฉลี่ย 3.6 นิวตัน ลักษณะก้อนมะขามก่อนและหลังการขึ้นรูปก้อนปรากฏว่าหลังการขึ้นรูปก้อนขามเกิดการเข้ารูปมีเหลี่ยมวัสดุที่ใช้ห่อไม่คลายตัวส่งผลให้เวลาบรรจุใส่กล่องทำได้สะดวกและสวยงาม ปริมาณการผลิตเครื่องที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานเร็วกว่าเดิม 1.8 เท่า คิดเป็น 83.3% โดยเครื่องที่พัฒนาขึ้นมาสามารถแก้ไขปัญหาการอัดขึ้นรูปก้อนเนื้อมะขามจากเดิม 2 ครั้ง เหลือเพียง 1 ครั้ง ส่วนผู้ใช้งานเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขามเปรี้ยวปรุงรสมีความคิดเห็นสอดคล้องกับผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวของกับการออกแบบและพัฒนา ประเด็นข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อ คือ ความเหมาะสมในด้านการออกและพัฒนาชุดฐานเครื่องขึ้นรูปก้อนมะขาม เนื่องจากฐานเครื่องมีขนาดเล็กทำงานจะเกิดการกระดก และควรศึกษาการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน) งบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ 2563 และขอขอบพระคุณวิสาหกิจชุมชนกลุ่มดวงทอง ตำบลห้วยโป้ง อำเภอหนองไผ่ จังหวัดเพชรบูรณ์ ที่ให้ข้อมูลประกอบการวิจัยและเป็นสถานที่วิจัยจนงานวิจัยครั้งนี้เสร็จด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2566). **ระบบสารสนเทศการผลิตทางด้านการเกษตร**. สืบค้นหาจาก https://production.doae.go.th/site/login.

นันท์ปภัทร์ ทองคำ, วัฒนี บุญวิทยา, ภาสุรี ฤทธิเลิศ, หรรษา เวียงวะลัย, อัณนภา สุขลิ้ม, และณัฐวุฒิ หัตถดล. (2562). การพัฒนานวัตกรรมการผลิตปลาร้ามอญอัดก้อนกึ่งสำเร็จรูป ชาวมอญบ้านศาลาแดงเหนือ อำเภอสามโคก จังหวัดปทุมธานี. **วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์**, 14(3), 12-23.

ประพันธ์พงษ์ สมศิลา, ธนกร หอมจำปา, เอกภูมิ บุญธรรม, กฤษฎา อ้นอ้าย, และอำไพศักดิ์ ทีบุญมา. (2565). การศึกษาสมรรถนะเครื่องขึ้นรูปเตาซุปเปอร์อั้งโล่. **วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม**, 4(2), 223-241.

ฤทธิรงค์ แจ้งอิ่ม. (2562). การออกแบบและสร้างเครื่องกดแผ่นข้าวโป่ง กรณีศึกษากลุ่มอาชีพบ้านห้วยยาง. **วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง**, 12(2), 49-61.

เอกรัฐ ธีรวนบดี และยุทธพงษ์ บุญยัง. (2559, สิงหาคม). ศึกษาและคิดค้นการทำอุปกรณ์ทำลูกปูนตามแนวปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ครั้งที่ 1 เรื่อง นวัตกรรมอาคาร (Building Innovation 2016: B-inno2016). โรงแรมไมด้าทวารวดีแกรนด์, นครปฐม.

Kumar, A.A., Jhansi, R., Vardhan, U.H., Gousia, S.M., Kumar, A.K., & Ramana, C. (2019). Development and Evaluation of Low Pressure Multi Briquetting Machine for Rural Areas. **Current Journal of Applied Science and Technology**, 34(1), 1-15. Doi: 10.9734/CJAST/2019/V34I130113

Daramna, I., & Almasri, M. (2019). **Sugar Cubes Making Machine**. (Report). Palestine Polytechnic University, Palestine.

ระบบลำเลียงและจัดเรียงชิ้นงานอัตโนมัติด้วยระบบ IOT

AUTOMATIC CONVEYING AND SORTING SYSTEM USING IOT

ภูมิพัฒน์ ก๋าคำ, เสกสรรค์ สุชัยพร*, ชัชวาล มงคล
Phumiphat Kakham, Seksan Suchaipron*, Chatchawarn Mongkon
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา ประเทศไทย 24000
Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, Muang, Chachoengsao, Thailand, 24000
*Corresponding author e-mail: seksan.suc@rru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 21 กุมภาพันธ์ 2567
วันที่แก้ไขบทความ 4 มีนาคม 2567
วันที่ตอบรับบทความ 4 มีนาคม 2567

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการผลิตอัตโนมัติมีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรม 4.0 ในด้านการเพิ่มผลิตภาพ ความยืดหยุ่น ความแม่นยำ และลดต้นทุนโดยเฉพาะกระบวนการทำงานซ้ำ เช่น การจัดเรียงสินค้า มีแนวโน้มที่จะนำแขนกลมาทำงานแทนพนักงาน ปัจจุบันยังมีการใช้ระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งระดับอุตสาหกรรมร่วมกับระบบอัตโนมัติ ซึ่งช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการตรวจสอบ ควบคุม และรวมรวมข้อมูลระบบการผลิต วัตถุประสงค์ของบทความนี้คือการบูรณาการระบบลำเลียงและจัดเรียงชิ้นงานอัตโนมัติที่ประกอบด้วยกลไกป้อนชิ้นงาน สายพานลำเลียง แขนกล ระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งระดับอุตสาหกรรม และพีแอลซี ซึ่งเป็นการผสมผสานใช้งานแขนกลและอุปกรณ์ควบคุมระดับอุตสาหกรรมกับกลไกป้อนชิ้นงานที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อาดุยโน่เป็นสมองกลฝังตัว ผลการทดสอบระบบประสานการทำงานระหว่างชุดกลไกป้อนชิ้นงานและสายพานลำเลียงกับแขนกลจัดเรียงชิ้นงานทรงกระบอกบนพาเลทจำนวน 6 ชิ้น วางเรียงกันจำนวน 3 แถว ผ่านการสั่งงานระบบผ่านสวิตช์ปุ่มกดและส่วนประสานงานผู้ใช้บนระบบบนคลาวด์สกาดา พบว่าระบบสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ด้วยรอบเวลาของกระบวนการเฉลี่ยเท่ากับ 116 วินาที และลดลงเหลือ 98 วินาที โดยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่มากที่สุดจากการวางชิ้นงานอยู่ที่ 0.1 มิลลิเมตร ทั้งในแนวแกนนอน (แกน x) และในแนวแกนตั้ง (แกน y) เมื่อปรับความเร็วของแขนกลจากร้อยละ 25 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 50

คำสำคัญ: ระบบอัตโนมัติ, ระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งระดับอุตสาหกรรม, แขนกล, การจัดวางบนพาเลท

Abstract

Automated manufacturing technology assumes a pivotal role within the framework of Industry 4.0, enhancing productivity, adaptability, precision, and cost-efficiency. Particularly notable is its application in streamlining repetitive tasks such as product sorting, where robotic arms increasingly substitute human labor. Simultaneously, the integration of industrial Internet of Things (IIoT) systems with automation enhances monitoring, control, and data aggregation capacities within production environments. This article aims to integrate an automated workpiece conveying and sorting system with a workpiece feeding mechanism, employing conveyor belts, robotic arms, IIoT systems, and Programmable Logic Controllers (PLCs). It integrates the utilization of the robot arm and industrial-grade control apparatus with a workpiece feeding mechanism driven by an embedded Arduino microcontroller. The evaluation of the synchronization system between the workpiece feeding mechanism, conveyor belt, and robot arm for organizing six cylindrical workpieces onto a pallet, positioned in three rows, was conducted by activating the system via a push-button switch and a cloud-based SCADA system. It was determined that the system functioned as intended, achieving an average process cycle time reduction from 116 seconds to 98 seconds, and the average maximum position error in the x and y axes when placing the object was 0.1 mm, with the robot arm speed increased from 25 percent to 50 percent.

Keywords: Automation, IIoT, Robot arm, Palletizing

1. บทนำ

นวัตกรรมระบบอัตโนมัติและหุ่นยนต์อุตสาหกรรมถูกพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มผลิตภาพ ความยืดหยุ่น ความแม่นยำ ลดต้นทุน และยังสามารถทำงานแทนมนุษย์รวมถึงสามารถทำงานในสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายได้เป็นอย่างดี (Kumar *et al.*, 2015) แขนกลหุ่นยนต์นั้นมีการใช้งานอย่างมากในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตและการประกอบชิ้นส่วน ช่วยเพิ่มกำลังการผลิต ลดกำลังแรงงาน และทำงานซ้ำๆ รวมถึงงานหยิบจับ (Pick and place) เพื่อลดอาการเมื่อยล้าของการทำงาน สามารถทำงานได้หลากหลายและแก้ไขการทำงานของหุ่นยนต์ได้เพื่อช่วยเหลือการทำงานในสภาพแวดล้อมต่างๆ ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตและประกอบมากมาย ได้มีการรวมการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์อุตสาหกรรมและไลน์การผลิตเพื่อช่วยลดภาระงานและเพิ่มประสิทธิภาพ

การผลิต โดยเฉพาะความสามารถในการตรวจสอบและสั่งงานผ่านระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Shukla & Karki, 2016; Kim *et al.*, 2014; Almurib *et al.*, 2012; Low *et al.*, 2019)

ระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งระดับอุตสาหกรรม (Industrial internet of thing หรือ IIoT) ถูกพัฒนาต่อยอดจากระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งซึ่งเสนอกรอบแนวคิดในการเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้าด้วยกันตั้งแต่ปลายศตวรรษที่ 20 โรงงานอุตสาหกรรมเริ่มใช้ระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับงานต่างๆ เช่น การตรวจสอบ การควบคุม และการรวบรวมข้อมูล ในช่วงปี ค.ศ. 1970-1980 ระบบ SCADA (Supervisory control and data acquisition) ถูกนำมาใช้ทำให้อุตสาหกรรมต่างๆ สามารถตรวจสอบและควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมจากระยะไกลได้ โดยมีความสามารถในการรวบรวมและควบคุมข้อมูลแบบเรียลไทม์ ซึ่งเป็นจุดเด่นของ IIoT ต่อมาพัฒนาการของเซนเซอร์อัจฉริยะ และเทคโนโลยีสารสนเทศ ก่อเกิดแนวคิดการปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งที่ 4 หรืออุตสาหกรรม 4.0 ในช่วงต้นปี 2010 โดยการบูรณาการ IoT การประมวลผลแบบคลาวด์ ปัญญาประดิษฐ์ และเทคโนโลยีดิจิทัลอื่นๆ เข้ากับกระบวนการทางอุตสาหกรรม อุตสาหกรรม 4.0 ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม อีกทั้งการควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ผ่านระบบ IoT ยังสามารถทำให้การทำงานเป็นไปอย่างราบลื่นและรวดเร็ว รวมถึงมุ่งหวังที่จะสร้าง "โรงงานอัจฉริยะ" ที่เพิ่มผลิตภาพ ความน่าเชื่อถือ และประสิทธิภาพความสามารถในการแข่งขันที่มุ่งเน้นในด้านต้นทุน (Ahmed *et al.*, 2023; Atashzar *et al.*, 2021)

การพัฒนาแพลตฟอร์มและมาตรฐาน IIoT (ปี 2010-ปัจจุบัน) มีความสำคัญอย่างยิ่งในการขับเคลื่อนการนำไปใช้และการทำงานร่วมกันในสภาพแวดล้อมทางอุตสาหกรรม บริษัทต่างๆ ได้พัฒนาแพลตฟอร์ม IIoT เฉพาะทางที่ปรับให้เหมาะกับความต้องการของอุตสาหกรรมต่างๆ โดยจัดหาเครื่องมือสำหรับการรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ และการเชื่อมต่อ ผ่านการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์หนึ่งไปยังหลากหลายอุปกรณ์สำหรับการอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ ที่สามารถต่อสัญญาณอินเทอร์เน็ตได้ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์หรือโทรศัพท์มือถือ IIoT มีผลกระทบเชิงเปลี่ยนแปลงต่อการดำเนินงานทางอุตสาหกรรม ช่วยให้สามารถบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ การติดตามทรัพย์สิน การจัดการพลังงาน การเพิ่มประสิทธิภาพห่วงโซ่อุปทานและติดตามการทำงานเพื่อตรวจสอบถึงระบบความปลอดภัยได้ตลอดเวลา เช่น ตรวจสอบการรั่วไหลของสารเคมี การตรวจติดตามและการควบคุมการทำงานเป็นกระบวนการสำคัญสำหรับโรงงานอัจฉริยะเพื่อเป็นการยืนยันว่าอุปกรณ์ยังคงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการเชื่อมต่อเครื่องจักร อุปกรณ์ และกระบวนการ IIoT ช่วยให้อุตสาหกรรมปรับปรุงประสิทธิภาพ ลดการหยุดทำงาน และเพิ่มผลกำไร (Suresh *et al.*, 2014; Yaseen *et al.*, 2017; Hanggara *et al.*, 2017; Carino *et al.*, 2016)

การเพิ่มผลิตภาพและลดต้นทุนในกระบวนการจัดเรียงสินค้าซึ่งเป็นกระบวนงานที่ทำซ้ำๆ โดยการแทนที่พนักงานด้วยหุ่นยนต์เป็นวิธีการที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Malaikaew & Jaojaruek, 2020;

Yang *et al.*, 2022; Chiba *et al.*, 2016) รวมไปถึงการนำระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งมาบูรณาการทำงานร่วมกับแขนกลหุ่นยนต์และระบบควบคุมการทำงาน (Controller) เป็นการลดเวลาการทำงาน ลดความคลาดเคลื่อนและความเมื่อยล้าจากการทำงานซ้ำๆ

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

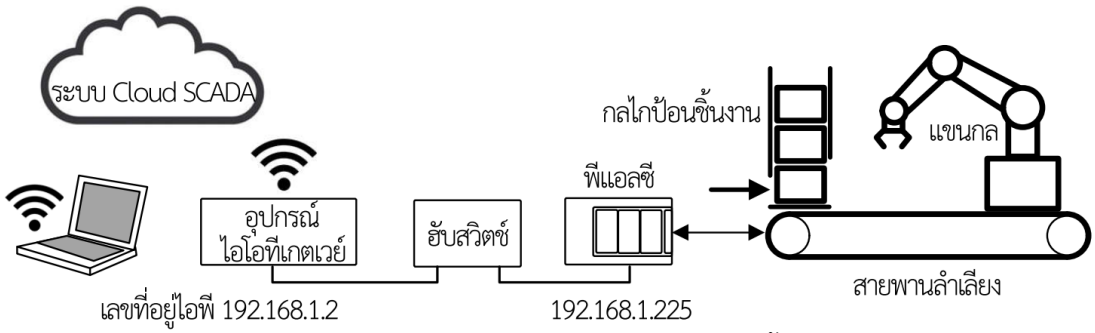
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ บูรณาการระบบลำเลียงและจัดเรียงชิ้นงาน ด้วยระบบกลไกการป้อนชิ้นงานอัตโนมัติ ร่วมกับแขนกลหุ่นยนต์ ระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งหรืออุปกรณ์ไอโอทีเกตเวย์ (IIoT) และเครื่องควบคุมเชิงตรรกะ (PLC)

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้แบ่งการควบคุมออกเป็น ควบคุมแขนกลหุ่นยนต์อุตสาหกรรมให้หยิบจับและวางวัตถุตามตำแหน่งที่กำหนด (Pick and place) โดยวัตถุมีรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร และการควบคุมการทำงานของสายพานลำเลียง (Conveyer belt) เพื่อลำเลียงวัตถุมายังตำแหน่งที่ให้แขนกลหุ่นยนต์หยิบจับ หุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Arm robot ABB IRB120 สั่งงานโดยใช้ PLC ยี่ห้อ Mitsubishi FX5U-64M ส่งคำสั่งไปยัง cloud โดย Wecon รุ่น V-Box H–WF

3.1 กระบวนการทำงานของระบบ

ระบบลำเลียงและจัดเรียงชิ้นงานอัตโนมัติ ประกอบด้วย พีแอลซีที่ทำหน้าที่ประสานการทำงานของกลไกป้อนชิ้นงาน สายพานลำเลียงและแขนกล โดยมีอุปกรณ์ไอโอทีเกตเวย์ทำหน้าที่ประสานงานกับผู้ใช้ระบบผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ชิ้นงานจะถูกป้อนไปยังสายพานลำเลียงด้วยกลไกป้อนชิ้นงานและแขนกลจัดเรียงชิ้นงานในตำแหน่งที่กำหนด การสื่อสารระหว่างพีแอลซีกับอุปกรณ์ไอโอทีเกตเวย์ทางพอร์ตอีเทอร์เน็ต (Ethernet) โดยกำหนดค่าไอพีของอุปกรณ์ให้อยู่ในวงแลน (Lan) เดียวกัน และใช้ฮับสวิตช์เป็นตัวเชื่อมสัญญาณ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ผังสื่อสารข้อมูลของระบบลำเลียงและจัดเรียงชิ้นงานอัตโนมัติ

3.2 แขนกล

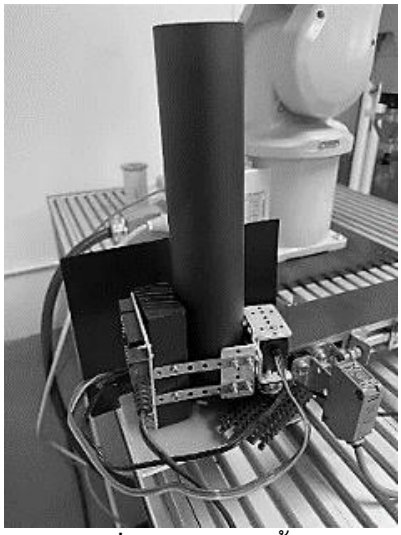
แขนกลแบบ 6 แกน พร้อมอุปกรณ์จับชิ้นงานเป็นแบบสุญญากาศถูกนำมาใช้บูรณาการระบบเพื่อจัดเรียงชิ้นงาน โปรแกรมการทำงานแขนกลด้วยการสอน (Teach) ผ่านแผงควบคุมการทำงาน (Flex pendant) ระบบสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของแขนกลมีแรงดันไฟฟ้า 0 โวลต์ และ 24 โวลต์ แทนสถานะบูลีนเท็จและจริงตามลำดับสำหรับเชื่อมโยงสัญญาณควบคุมกับพีแอลซี

แขนกลแกนที่ 1 ถึงแกนที่ 3 มีความเร็ว (Velocity) 250 องศาต่อวินาที แกนที่ 4 และแกนที่ 5 มีความเร็ว 320 องศาต่อวินาที และแกนที่ 6 มีความเร็ว 420 องศาต่อวินาที

3.3 กลไกป้อนชิ้นงานและสายพานลำเลียง

กลไกป้อนชิ้นงานมีลักษณะเป็นแมกกาซีนสำหรับใส่ชิ้นงานรูปทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ความสูง 25 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 2 ประกอบขึ้นจากท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์อาดุยโน่ ยูโน่ อาร์ 3 (Arduino Uno R3) เป็นสมองกลฝังตัวรับคำสั่งสถานะบูลีนจากพีแอลซี เพื่อควบคุมกลไกการป้อนชิ้นงานด้วยแรงทางกลจากมอเตอร์อาร์ซีเซอร์โว (RC servo) โดยมีเงื่อนไขการทำงานของใบกวาดชิ้นงาน คือ ดันชิ้นงานออกจากแมกกาซีน และกลับตำแหน่งเริ่มต้น เมื่อได้รับสถานะบูลีนเป็นจริงและเท็จ ตามลำดับ

สายพานลำเลียงมีความกว้าง 60 มิลลิเมตร ความยาว 600 มิลลิเมตร และความสูง 30 มิลลิเมตร ระนาบบนของสายพานลำเลียงอยู่สูงจากพื้นโต๊ะ 75 มิลลิเมตร ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ ระยะในการเคลื่อนที่ 2 เมตรต่อนาที



ภาพที่ 2 กลไกป้อนชิ้นงาน

3.4 โปรแกรมพีแอลซี

การลำเลียงและจัดเรียงชิ้นงานอัตโนมัติโดยใช้พีแอลซีเป็นตัวควบคุมหลัก โดยใช้อินพุตจำนวน 8 จุด คือ X0, X1, X5, X6, X7, X10, X11 และ X20 เอาต์พุตจำนวน 4 จุด คือ Y10, Y14, Y15 และ Y20 รีจิสเตอร์ข้อมูล (D10) จำนวน 1 ตัว รีเลย์พิเศษภายใน (SM400) จำนวน 1 ตัว และรีเลย์ภายใน จำนวน 3 ตัว คือ M1, M2 และ M3 ดังตารางที่ 1 โปรแกรมการทำงานของระบบแบ่งออกเป็น 2 โหมด คือ

โหมดแมนนวล (Manual) เป็นการเปิดและปิดการทำงานของกลไกป้อนชิ้นงาน และสายพานลำเลียงโดยไม่ใช้เซนเซอร์ ออกแบบไว้สำหรับทดสอบกลไกการทำงานของระบบเบื้องต้น

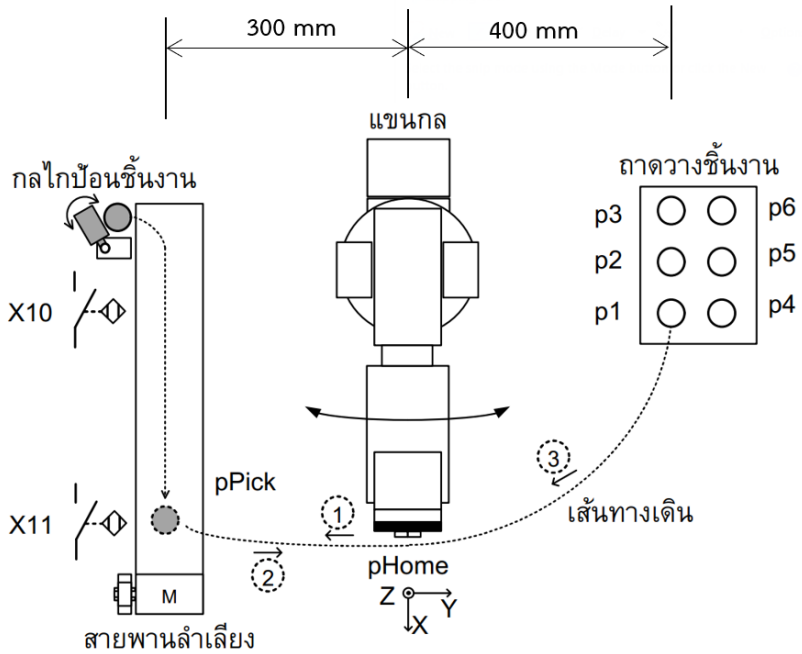
โหมดอัตโนมัติ (Auto) เริ่มทำงานเมื่อกดสวิตช์ X1 จะทำให้เอาต์พุตรีเลย์ Y10 ต่อวงจรสายพานลำเลียงให้ทำงาน และเอาต์พุตรีเลย์ Y20 ต่อวงจรไฟฟ้าให้ใบกวาดชิ้นงานของกลไกป้อนชิ้นงานดันชิ้นงานออก และเมื่อชิ้นงานผ่านสวิตช์แสง X10 แล้วใบกวาดชิ้นงานของกลไกป้อนชิ้นงานกลับตำแหน่งเริ่มต้น ถ้าชิ้นงานถูกลำเลียงวิ่งผ่านสวิตช์แสง X11 ตรวจจับได้แล้วสายพานลำเลียงจะหยุด เอาต์พุตรีเลย์ Y14 จะส่งสัญญาณเพื่อเริ่มการทำงานหุ่นยนต์ และเอาต์พุตรีเลย์ Y15 ส่งสัญญาณเคลียร์ค่ารีจิสเตอร์ (reg1) ในตัวควบคุมแขนกลที่ใช้นับจำนวนชิ้นงาน หุ่นยนต์จะจัดเรียงชิ้นงานจำนวน 6 ชิ้น ขณะที่วางแต่ละชิ้นเรียบร้อยแล้ว หุ่นยนต์จะส่งสัญญาณไปยังอินพุตรีเลย์ X20 เพื่อสั่งกลไกป้อนชิ้นงานชิ้นที่ 2 ถึงชิ้นที่ 6 เมื่อต้องการลำเลียงชิ้นงานชุดต่อไปให้กดสวิตช์ X1 เพื่อเริ่มการทำงานใหม่ และกดสวิตช์ X0 เพื่อหยุดการทำงานได้แต่จะต้องรีเซตระบบใหม่ เช่น นำชิ้นงานออกจากถาดวาง และสายพานลำเลียงทุกครั้ง

3.5 โปรแกรมแขนกล

แขนกลถูกโปรแกรมทำงานแบบหยิบและวาง (Pick and place) โดยจัดเรียงชิ้นงานบนถาดที่เตรียมไว้ แขนกลจะอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น (Home position) เมื่อได้รับสัญญาณที่เกิดจากสวิตช์แสง (X11) ตรวจจับชิ้นงานได้ อุปกรณ์จับชิ้นงานเป็นแบบสุญญากาศที่ปลายแขนกล ซึ่งจะเคลื่อนที่ตามเส้นทาง (1) เพื่อไปดูดจับชิ้นงานแล้วเคลื่อนกลับตามเส้นทาง (2) แล้วนำไปวางบนถาดแต่ละตำแหน่ง (p1 ถึง p6) แล้วเคลื่อนกลับตามเส้นทางเดิน (3) เพื่อมารอ ณ ตำแหน่งเริ่มต้น ดังภาพที่ 3 พิกัดตำแหน่งปลายอุปกรณ์จับชิ้นงานแบบสุญญากาศแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 อุปกรณ์พีแอลซีและรีจิสเตอร์สำหรับระบบลำเลียงและจัดเรียงชิ้นงานอัตโนมัติ

อุปกรณ์	ฟังก์ชันการทำงาน
X0	อินพุต: หยุดการทำงานอัตโนมัติ (Auto)
X1	อินพุต: เริ่มการทำงานอัตโนมัติ (Auto)
X5	อินพุต: ป้อนชิ้นงานโหมดแมนนวล (Manual)
X6	อินพุต: สั่งเคลื่อนสายพานลำเลียงโหมดแมนนวล (Manual)
X7	อินพุต: สวิตช์เลือกโหมดอัตโนมัติ/แมนนวล
X10	อินพุต: สวิตช์แสงตรวจจับชิ้นงานเข้า
X11	อินพุต: สวิตช์แสงตรวจนับจับชิ้นงานออก
X20	อินพุต: แขนกลสั่งป้อนชิ้นงานอัตโนมัติ (Auto)
Y10	เอาต์พุต: ควบคุมสายพานลำเลียง
Y14	เอาต์พุต: สั่งแขนกลจัดเรียงชิ้นงาน
Y15	เอาต์พุต: เคลียร์ค่ารีจิสเตอร์ reg1
	ที่ใช้นับจำนวนชิ้นงาน (ในโปรแกรมแขนกล)
Y20	เอาต์พุต: ควบคุมการป้อนชิ้นงาน
D10	เก็บข้อมูลจำนวนชิ้นงาน
SM400	แสดงสถานะการทำงานบน Cloud SCADA
M1	เก็บสถานะบูลีนของโหมดอัตโนมัติ/แมนนวล
M2	เริ่มการทำงานและป้อนชิ้นงานครั้งแรก
M3	แสดงสถานะการทำงานของแขนกล
	บน Cloud SCADA



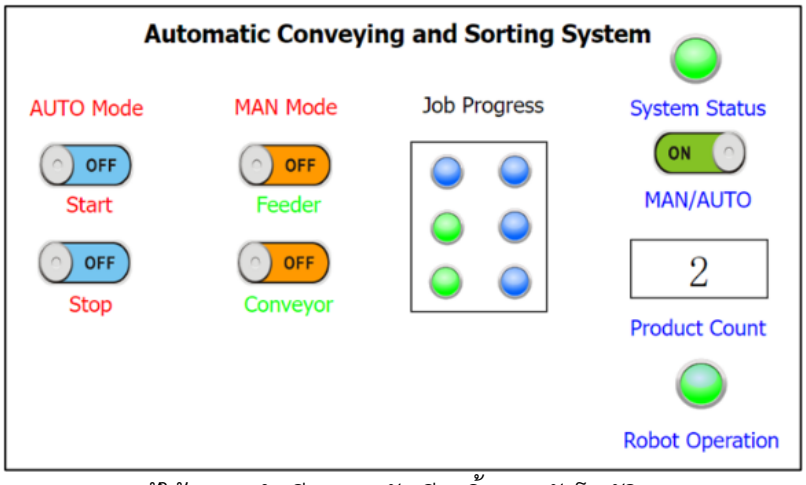
ภาพที่ 3 เส้นทางลำเลียงชิ้นงาน

ตารางที่ 2 พิกัดตำแหน่งปลายของอุปกรณ์จับชิ้นงานแบบสุญญากาศ

ตำแหน่ง	พิกัด [X,Y,Z]
pHome	[248.00, 0, 215.00]
pPick(up)	[214.82, -328.52, 215.00]
pPick(down)	[214.82, -328.52, 184.00]
p1(up)	[25.00, 389.00, 215.00]
p1(pick)	[25.00, 389.00, 131.00]
p2(up)	[-25.00, 389.00, 215.00]
p2(pick)	[-25.00, 389.00, 131.00]
p3(up)	[-75.00, 389.00, 215.00]
p3(pick)	[-75.00, 389.00, 131.00]
p4(up)	[25.00, 439.00, 215.00]
p4(pick)	[25.00, 439.00, 131.00]
p5(up)	[-25.00, 439.00, 215.00]
p5(pick)	[-25.00, 439.00, 131.00]
p6(up)	[-75.00, 439.00, 215.00]
p6(pick)	[-75.00, 439.00, 131.00]

3.6 ส่วนประสานงานผู้ใช้บนระบบ Cloud SCADA

ส่วนประสานงานผู้ใช้ระบบลำเลียงและจัดเรียงชิ้นงานอัตโนมัติบน Cloud SCADA แบ่งออกเป็น 4 คอลัมน์ตามลำดับ คือ ปุ่มสวิตช์ควบคุมโหมดอัตโนมัติ (Auto mode) ปุ่มสวิตช์ควบคุมโหมดแมนนวล (Manual mode) ส่วนแสดงสถานะของงานที่จัดเรียง (Job progress) และ ส่วนแสดงสถานะการทำงานของระบบ รายละเอียดการจัดวางส่วนประสานงานผู้ใช้แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ส่วนประสานงานผู้ใช้ระบบลำเลียงและจัดเรียงชิ้นงานอัตโนมัติบน Cloud SCADA

การเชื่อมโยงเพื่อประสานงานและข้อมูลระหว่างพีแอลซีกับส่วนประสานงานผู้ใช้บน Cloud SCADA แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อุปกรณ์พีแอลซีและรีจิสเตอร์กับส่วนประสานงานผู้ใช้บน Cloud SCADA

อุปกรณ์พีแอลซี	ส่วนประสานงานผู้ใช้บน Cloud SCADA
X0	Stop: หยุดการทำงาน (Auto)
X1	Start: เริ่มการทำงาน (Auto)
X5	Feeder: ป้อนชิ้นงาน (Manual)
X6	Conveyor: สั่งการทำงานสายพานลำเลียง (Manual)
X7	MAN/AUTO: สวิตช์เลือกโหมด Manual หรือ Auto
D10	Product Count: เก็บข้อมูลจำนวนชิ้นงาน
SM400	System Status: แสดงสถานะของระบบ
M3	Robot Operation: แสดงสถานะของแขนกล
HAX1-HAX6	Job Progress: แสดงสถานะชิ้นงานที่จัดเรียง

การแสดงสถานะของงานที่จัดเรียง (Job progress) บน Cloud SCADA ใช้รีจิสเตอร์ภายในอุปกรณ์ไอโอทีเกตเวย์ HAX1 ถึง HAX6 โดยมีการเพิ่ม กลุ่ม และ Tag จำนวน 6 Tag โดยเขียนชุดคำสั่ง Lua script เพื่อตรวจสอบจำนวนชิ้นงานในรีจิสเตอร์ข้อมูล D10 ในพีแอลซีที่มีค่า 1 ถึง 6 และกำหนดให้รีจิสเตอร์ภายในอุปกรณ์ไอโอทีเกตเวย์ HAX1 ถึง HAX6 มีสถานะบูลีนเป็นจริง ซึ่งจะเปลี่ยนสีของปุ่มบน Cloud SCADA จากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวสำหรับแสดงสถานะของงานที่จัดเรียงเรียบร้อยแล้ว

3.7 วิธีการทดสอบระบบ

การทดสอบระบบแบ่งเป็น 2 ด้าน คือ การทำงานของระบบตามเงื่อนไขหรือลำดับงานและการทดสอบหาความผิดพลาดของตำแหน่งรอจัดเรียงชิ้นงาน (pPick) บนสายพานลำเลียงชิ้นงาน ชิ้นงานทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร สูง 25 มิลลิเมตร แบ่งเป็น 2 สี คือ สีเหลือง และสีบรอนซ์ ซึ่งมีค่าสี RGB (240, 179, 0) และ (193, 191, 178) ตามลำดับ ทดสอบวางชิ้นงานจำนวน 6 ชิ้น โดยเทียบกับพิกัดตำแหน่งของแขนกลในแนวแกน x จำนวน 3 แถว และแนวแกน y จำนวน 2 แถว กำหนดช่องว่างระหว่างชิ้นงาน 10 มิลลิเมตร และทดสอบหารอบเวลาของกระบวนการจัดเรียง (Cycle time) และค่าความคลาดเคลื่อนจากการวางชิ้นงานด้วยความเร็วการทำงานของแขนกลร้อยละ 25 และร้อยละ 50 จากข้อจำกัดด้านการติดตั้งและการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ระบบลำเลียงและจัดเรียงชิ้นงานอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น สามารถสั่งงานแบบแมนนวลและอัตโนมัติด้วยสวิตช์ปุ่มกดและสั่งงานบนระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งของ V-net access ผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์ หรือสมาร์ทโฟนในระบบปฏิบัติการ IOS ผลการทดสอบพบว่าระบบลำเลียงและจัดเรียงชิ้นงานอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ กล่าวคือกลไกป้อนชิ้นงานสามารถปล่อยชิ้นงานครั้งละชิ้นเพื่อลำเลียงบนสายพานลำเลียง เมื่อถึงตำแหน่ง pPick แล้วแขนกลจับและจัดเรียงชิ้นงานในตำแหน่ง p1 ถึง p6 แล้วจึงหยุดรอที่ตำแหน่ง pHome ตำแหน่งการจัดเรียงดังภาพที่ 3

การบูรณาการระบบอัตโนมัติด้วยอุปกรณ์หลากหลายแพลทฟอร์ม ประกอบด้วยส่วนอุปกรณ์ (Hardware) และส่วนโปรแกรม (Software) สามารถประสานการทำงานผ่านสถานะบูลีนได้เป็นอย่างดี แม้ว่าพีแอลซี กลไกป้อนชิ้นงานที่อาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์อาดุยโน่ แขนกล และอุปกรณ์ไอโอทีเกตเวย์จะมีระบบปฏิบัติการ โปรแกรมและชุดคำสั่งที่มีความสัมพันธ์ (Syntax) ที่แตกต่างกัน

การทดสอบระยะความผิดพลาดของตำแหน่งรอจัดเรียงชิ้นงาน (pPick) บนสายพานลำเลียงชิ้นงานพบว่าสวิตช์แสงตรวจนับชิ้นงานขาออกสามารถตรวจจับชิ้นงานทั้งสองสีได้ เมื่อเปรียบเทียบความไวของการตรวจจับพบว่าสวิตช์แสงตรวจจับชิ้นงานสีเหลืองได้ก่อนชิ้นงานสีบรอนซ์เป็นระยะทางต่างกันเฉลี่ย 5.9 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์หยุดชิ้นงาน เพื่อคงตำแหน่งรอจัดเรียงชิ้นงานทั้งสองสีไว้ โดยใช้ตำแหน่งหยุดของชิ้นงานสีเหลืองเป็นหลัก คือ พิกัด [214.82, -328.52] เมื่อเทียบกับตำแหน่ง [X=0, Y=0] ของแขนกล ทำให้แขนกลสามารถเรียงชิ้นงานทั้ง 6 ชิ้นในพิกัดตำแหน่งที่ออกแบบโปรแกรมแขนกลไว้ ในส่วนของตำแหน่งการวางชิ้นงานได้ทำการจัดเรียงชิ้นงานที่ความเร็วของแขนกลที่ร้อยละ 25 และร้อยละ 50 จากจำนวนการทดสอบ 5 ครั้งพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่มากที่สุดจากการเปรียบเทียบความเร็วของแขนกลในการวางตำแหน่งชิ้นงานตามแนวแกน x อยู่ที่ 0.1 มิลลิเมตร ในการวางเรียงชิ้นงาน p6 และตามแนวแกน y อยู่ที่ 0.1 มิลลิเมตร ในการวางเรียงชิ้นงาน p5 ดังตารางที่ 4 โดยสาเหตุของความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากตำแหน่งการหยุดของชิ้นงานก่อนที่แขนกลหุ่นยนต์จะทำการหยิบจับ

รอบเวลาของกระบวนการจัดเรียงชิ้นงานทั้ง 6 ชิ้น เริ่มตั้งแต่กดปุ่มสั่งเริ่มการทำงาน ลำเลียงและจัดเรียงชิ้นงานครบทั้ง 6 ชิ้น จนกระทั่งแขนกลเคลื่อนเข้ามาอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น กำหนดให้ความเร็วการทำงานของแขนกลเป็นร้อยละ 25 และร้อยละ 50 จากจำนวนการทดสอบ 5 ครั้งได้เวลาเฉลี่ยเท่ากับ 116 วินาที และ 98 วินาที ตามลำดับ ซึ่งสามารถลดรอบเวลาของกระบวนการได้ 18 วินาที ดังตารางที่ 5

ในอนาคตคณะผู้วิจัยมีความสนใจศึกษา วิเคราะห์และดำเนินการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบตามหลักการของระบบการผลิตอัตโนมัติแบบลีน (Lean automation) หรือ ศึกษาการตรวจจับ

รูปทรงชิ้นงานสำหรับกระบวนการคัดแยกหรือจัดเรียงชิ้นงานให้ได้ตามเงื่อนไขหรือความต้องการที่มีต่อระบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบการตรวจสอบด้วยกล้อง (Vision system)

ตารางที่ 4 ตำแหน่งการวางชิ้นงานเฉลี่ยเมื่อปรับความเร็วของแขนกลที่ร้อยละ 25 และ ร้อยละ 50

ความเร็วแขนกล	ตำแหน่งเฉลี่ยในการวางชิ้นงานตามแนวแกน x และแกน y					
	p1 (x, y)	p2 (x, y)	p3 (x, y)	p4 (x, y)	p5 (x, y)	p6 (x, y)
25 %	(0, 0)	(-0.25, 49.4)	(-0.2, 99.2)	(49.4, 0)	(49.6, 49.7)	(49.6, 99.1)
50 %	(0, 0)	(-0.25, 49.4)	(-0.15, 99.2)	(49.4, 0)	(49.6, 49.6)	(49.5, 99.1)

ตารางที่ 5 รอบเวลาของกระบวนการจัดเรียง

ครั้งที่	เวลาของกระบวนการจัดเรียง (วินาที)	
	ความเร็วแขนกลร้อยละ 25	ความเร็วแขนกลร้อยละ 50
1	116.04	98.01
2	116.08	97.91
3	116.18	98.08
4	116.11	98.04
5	116.15	97.06
เวลาเฉลี่ย (วินาที)	116.11	98.02

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจากหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และมหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

6. เอกสารอ้างอิง

Ahmed, S.F., Alam, Md.S.B., Hoque, M., Lameesa, A., Afrin, S., Farah, T., Kabir, M., Shafiullah, G.M., & Muyeen, S.M. (2023). Industrial Internet of Things enabled technologies, challenges, and future directions. **Computers and Electrical Engineering**, 110, 108847.

Almurib, H.A., Al-Qrimli, H.F., & Kumar, N. (2012, January). **A review of application industrial robotic design**. In 2011 Ninth International Conference on ICT and Knowledge Engineering, Bangkok, Thailand.

Atashzar, S.F., Carriere, J., & Tavakoli, M. (2021). How can intelligent robots and smart mechatronic modules facilitate remote assessment, assistance, and rehabilitation for isolated adults with neuro-musculoskeletal conditions?. **Frontiers in Robotics and AI**, 8, 610529.

Carino, J.A., Delgado-Prieto, M., Zurita, D., Millan, M., Redondo, J.A. O., & Romero-Troncoso, R. (2016). Enhanced industrial machinery condition monitoring methodology based on novelty detection and multi-modal analysis. **IEEE access**, 4, 7594-7604.

Chiba, R., Arai, T., Ueyama, T., Ogata, T., & Ota, J. (2016). **Working Environment Design for Effective Palletizing with a 6-DOF Manipulator**. International Journal of Advance Robotic Systems. Doi: 10.5772/62345

Hanggara, P.O., Syai'in, M., Paradisa, P.F., Arifin, M.Z., Sarena, S.T., Syaiin, M., & Soeprijanto, A. (2017, October). **Prototype control and monitoring system safety device from leakage ammonia at marine loading arm with comparison of Neural Network (NN) and Extreme Learning Machine (ELM) method**. In 2017 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD), Yogyakarta, Indonesia.

Kim, S.H., Shin, Y.J., Kim, K.S., & Kim, S. (2014). Design and control of robot manipulator with a distributed actuation mechanism. **Mechatronics**, 24(8), 1223-1230.

Kumar, A., Mishra, A., Makula, P., Karan, K., & Mittal, V. K. (2015, May). **Smart robotic assistant**. In 2015 IEEE Region 10 Symposium, Ahmedabad, India.

Low, Z.H., Ishak, M.H.I., & Idris, N.H. (2019). Robotic Arm Control using Internet of Things (IoT). **ELEKTRIKA-Journal of Electrical Engineering**, 18(3-2), 51-55.

Malaikaew, A., & Jaojaruek, K. (2020). Palletizing Robot Application in the Corrugated Box Industry. **Applied Science and Engineering Progress**, 13(4), 346-353.

Shukla, A., & Karki, H. (2016). Application of robotics in onshore oil and gas industry - A review Part I. **Robotics and Autonomous Systems**, 75, 490-507.

Suresh, P., Daniel, J. V., Parthasarathy, V., & Aswathy, R. H. (2014, November). **A state-of-the-art review on the Internet of Things (IoT) history, technology and fields of deployment**. In 2014 International conference on science engineering and management research (ICSEMR), Chennai, India.

Yang, Y., Zhang, L., Qiang, L., Wang, J., Zhang, Y., & Yang, X. (2022, August). **Research on Palletizing Robot System of Multi-axis Synchronous Control Technology**. MATEC Web of Conferences 363, Wuhan, China. Doi: https://doi.org/10.1051/matecconf/202236301006.

Yaseen, M., Swathi, D., & Kumar, T. A. (2017, October). **IoT based condition monitoring of generators and predictive maintenance**. In 2017 2nd international conference on communication and electronics systems (ICCES), Coimbatore, India.

การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์ โดยการมีส่วนร่วมของชุมชนบ้านลำพุก จังหวัดสุรินทร์

A STUDY OF INCREASING THE EFFICIENCY OF SOLAR ENERGY USE THROUGH THE PARTICIPATION OF BAN LAMPHUK COMMUNITY, SURIN PROVINCE

ศิวพร แน่นหนา, ธาริณี มีเจริญ*, ศุภวิช นิยมพันธุ์, พงศ์ไกร วรรณตรง,
นิศานาถ แก้ววินัด, ชลิตา แก้วบุตรดี
Siwaporn Nannar, Tarinee Meecharoen*, Supawit Niyomphant,
Pongkrai Wannatrong, Nisanath Keawwinud, Chalita Keawbuddee
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อ.เมือง จ.สุรินทร์ ประเทศไทย 32000
Faculty of Industrial Technology, Surindra Rajabhat University, Muang, Surin, Thailand 32000
*Corresponding author e-mail: me.tarinee@gmail.com

วันที่เข้าระบบ 9 ตุลาคม 2566
วันที่แก้ไขบทความ 2 กุมภาพันธ์ 2567
วันที่ตอบรับบทความ 13 กุมภาพันธ์ 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างการจัดการความรู้ในการบริหารจัดการพลังงานทดแทนเพื่อลดค่าใช้จ่ายระบบพลังงานไฟฟ้าของชุมชนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์โดยการมีส่วนร่วมของชุมชน ผ่านกิจกรรมการวิเคราะห์ระบบพลังงานทดแทนปัจจุบันและความต้องการของชุมชน กิจกรรมถ่ายทอดความรู้ในการบริหารจัดการพลังงานทดแทนแก่ชุมชน และกิจกรรมการออกแบบการบำรุงรักษาทวีผลที่ทุกคนมีส่วนร่วมโดยใช้หลักการ Total productive maintenance (TPM) และจัดทำคู่มือการดูแลรักษาเชิงป้องกันที่ทุกคนมีส่วนร่วมเพื่อให้ชุมชนสามารถดำเนินการต่อด้วยตนเองได้และชุมชนสามารถใช้ประโยชน์จากโซล่าฟาร์มได้อย่างเต็มประสิทธิภาพในการลดรายจ่ายค่าไฟฟ้าของชุมชนในระยะยาวและสามารถเป็นต้นแบบให้กับชุมชนอื่น ๆ หรือเป็นแนวทางในการตัดสินใจเกี่ยวกับการสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนของชุมชนสำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้อีกด้วย

คำสำคัญ: การบำรุงรักษาทวีผล, การมีส่วนร่วมของชุมชน, พลังงานแสงอาทิตย์

Abstract

This research aimed at creating knowledge management in renewable energy management to reduce the cost of the community's electricity system and increase the efficiency of renewable energy use of solar light with the community participation through the following activities; analyzing current electricity system and community demands, providing knowledge on renewable energy, and designing the productive maintenance that everyone could participate using the total productive maintenance (TPM) principle. The guide of engaging preventive maintenance was created so that community could continue on its own and make full use solar farm to reduce the cost of the community's electricity in the long term. In addition, this could be a model for other communities or a guideline for decision making in renewable energy support for relevant work units as well.

Keywords: Productive maintenance, Community participation, Solar energy

1. บทนำ

พลังงานถือเป็นหนึ่งในปัจจัยพื้นฐานที่มนุษย์จำเป็นต้องดำรงชีวิต ตลอดจนเป็นกลไกที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศทั้งด้านเศรษฐกิจและสังคม เนื่องจากจำเป็นต้องใช้พลังงานในกระบวนการทางด้านอุตสาหกรรม คมนาคมขนส่ง ตลอดจนภาคเกษตรกรรมสมัยใหม่และอื่น ๆ (กระทรวงพลังงาน, 2564) ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีสภาพภูมิประเทศและสภาพภูมิอากาศที่เอื้ออำนวยทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานทางเลือกที่มีในประเทศ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ หรือพลังงานชีวมวล เป็นต้น ทั้งนี้เป็นทางเลือกที่จะทำให้ประเทศสามารถผลิตพลังงานใช้เองได้ โดยเฉพาะภายในชุมชนเป็นการผลิตพลังงานไว้ใช้เองจากทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่เพื่อลดค่าใช้จ่ายในครัวเรือนได้ และในส่วนของภาครัฐโดยกระทรวงพลังงานมีการสนับสนุนการใช้พลังงานทางเลือกในชุมชน เพื่อให้ชุมชนมีความรู้และสามารถใช้พลังงานทดแทนได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ (สุลีกร, 2562)

ชุมชนบ้านลำพุก หมู่ที่ 14 ตำบลตาเบา อำเภอปราสาท จังหวัดสุรินทร์ เป็นอีกหนึ่งพื้นที่ที่ได้รับการสนับสนุนจากหน่วยงานด้านพลังงานทดแทน เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ ดังแสดงในภาพที่ 1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปี (kWh/m^2-year) ที่จัดทำโดยมหาวิทยาลัยศิลปากรร่วมกับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2561) เพื่อให้ทราบถึงปริมาณความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ของแต่ละพื้นที่

ภาพที่ 1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปีของพื้นที่ชุมชน

ชุมชนบ้านลำพุก มีประชากร 896 คน รวมทั้งสิ้น 239 ครัวเรือน โดยประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ได้แก่ การทำนา ปลูกผัก และเลี้ยงสัตว์ ซึ่งในปี 2559 ชุมชนได้รับการสนับสนุนครุภัณฑ์โซล่าฟาร์มขนาดย่อม โดยติดตั้งแผงโซล่าเซลล์ไว้ในบริเวณหมู่บ้าน จำนวน 200 แผง เพื่อใช้ในการลดค่าใช้จ่ายในระบบไฟฟ้าของชุมชน ณ ศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียง ซึ่งชุมชนแห่งนี้ได้รับรางวัลพระราชทานจากสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ ให้เป็นหมู่บ้านเศรษฐกิจพอเพียงดีเด่น ในระดับอยู่เย็นเป็นสุข มีการน้อมนำเศรษฐกิจพอเพียงมาใช้จนเป็นศูนย์เรียนรู้ ธ.ก.ส. ที่หน่วยงานอื่นมาศึกษาดูงาน แต่อย่างไรก็ตามในการประชุมประชาคมของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมร่วมกับองค์การบริหารส่วนตำบลตาเบา ผู้นำ และแกนนำกลุ่มอาชีพ ภายใต้โครงการยุทธศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ เพื่อการพัฒนาท้องถิ่นประจำปีงบประมาณ 2566 ในวันที่ 16 ธันวาคม 2565 มีการระบุประเด็นปัญหาเรื่องการซ่อมบำรุงและการดูแลรักษาโซล่าฟาร์มในตำบล เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปโซล่าฟาร์มทรุดโทรมและเสื่อมโทรม แสดงดังภาพที่ 2 ทำให้ไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เต็มศักยภาพ การใช้งานจึงเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงกลางวันและมีการขัดข้องอยู่บ่อยครั้ง โดยปัจจุบันผู้นำชุมชนและช่างชุมชนดำเนินการแก้ไขเบื้องต้นโดยซ่อมบำรุงให้มีการใช้ไฟฟ้าจากโซล่าฟาร์มสลับกับไฟฟ้าจากฝ่ายผลิตส่วนภูมิภาคเพื่อให้เกิดการใช้งานอย่างต่อเนื่อง ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นคือชุมชนจำเป็นต้องรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าไฟฟ้าที่ใช้จากฝ่ายผลิต โดยเฉลี่ยประมาณ 3,000 บาทต่อเดือน จากการรับฟังความคิดเห็นของชุมชนและสำรวจข้อมูลเบื้องต้น คณะผู้วิจัยพบว่า ประชาชนในชุมชนมีความประสงค์จะใช้พลังงานทดแทนจากโซล่าฟาร์มเพื่อลดค่าใช้จ่ายแต่ยังขาดความรู้ในการดูแลรักษาและซ่อมบำรุง

ภาพที่ 2 โซล่าฟาร์มของชุมชนลำพุก หมู่ที่ 14 ตำบลตาเบา อำเภอปราสาท จังหวัดสุรินทร์

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นที่จะจัดการความรู้ของประชาชนและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในพื้นที่ในด้านการบริหารจัดการ การจัดสรรการใช้พลังงาน ตลอดจนการวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องมือและอุปกรณ์ระบบพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้หลักการ Total productive maintenance (TPM) หรือการบำรุงรักษาทวีผลที่ทุกคนมีส่วนร่วม ซึ่งแนวคิดนี้มีเป้าหมายหลักที่มีประโยชน์ คือ ความขัดข้องเป็นศูนย์ (Zero breakdown) อุบัติเหตุเป็นศูนย์ (Zero accident) ของเสียเป็นศูนย์ (Zero defect) และการลดการบำรุงรักษาที่ไม่จำเป็นหรือไม่ได้วางแผนไว้ล่วงหน้า (Nakajima, 1988) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการลดค่าใช้จ่ายโดยรวมทางด้านพลังงานไฟฟ้าของชุมชนลง และเพื่อให้ประชาชนในชุมชนมีส่วนร่วมและสามารถบริหารจัดการการพลังงานทดแทนอย่างยั่งยืนเพื่อลดค่าใช้จ่ายของระบบพลังงานไฟฟ้าชุมชนได้

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อสร้างการจัดการความรู้ในการบริหารจัดการพลังงานทดแทนเพื่อลดค่าใช้จ่ายระบบพลังงานไฟฟ้าของชุมชน

2.2. เพื่อวางแผนการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์ โดยการมีส่วนร่วมของชุมชน

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในการวิจัยเป็นประชาชน และบุคลากรของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในชุมชนบ้าน ลำพุก ตำบลตาเบา อำเภอปราสาท จังหวัดสุรินทร์ ในการศึกษาใช้การเลือกกลุ่มตัวอย่างในการบริหารจัดการพลังงานทดแทนสำหรับระบบพลังงานไฟฟ้าของชุมชน จำนวน 44 ราย ประกอบด้วย ผู้ใหญ่บ้าน 1 คน ตัวแทนคณะกรรมการหมู่บ้าน 6 คน ตัวแทนช่างชุมชน 1 คน ตัวแทนศูนย์สาธิตร้านค้าชุมชน 1 คน ตัวแทนกลุ่มโรงสีข้าวชุมชน 1 คน ตัวแทนประชาชนจากแต่ละคุ้ม 32 คน และตัวแทนกองช่างจากองค์การบริหารส่วนตำบล 2 คน

3.2 กระบวนการเลือกกลุ่มตัวอย่าง

ในการศึกษาใช้การเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจง (Purposive sampling) ผู้ให้ข้อมูลสำคัญ (Key informants) และผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย (Stakeholders) ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการพลังงานทดแทนสำหรับระบบพลังงานไฟฟ้าของชุมชนบ้านลำพุก ตำบลตาเบา อำเภอปราสาท จังหวัดสุรินทร์

3.3 ระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้

ในการศึกษานี้เป็นการวิจัยแบบผสม (Mixed methods) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการวิจัยแบบผสม (Mixed methods research) ในงานวิจัยนี้เป็นการใช้ทั้งการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลแบบเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) เช่น จำนวนแผงโซล่าเซลล์ ศักยภาพการทำงานของแผง ความต้องการใช้ไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า และการคำนวณความต้องการในการใช้แผงโซลาเซลล์ และการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) โดยเก็บรวมรวมจากวิธีการสนทนากลุ่ม (Focus group discussion) เพื่อวิเคราะห์ผลพร้อม ๆ กัน โดยการวิเคราะห์แบบการวิจัยแบบผสมจะใช้หลักการการผสมผสานการวิเคราะห์โดยอาจจะเกิดในช่วงที่มีการเก็บข้อมูล (Data collection) และ/หรือช่วงที่มีการวิเคราะห์ข้อมูล (Data analyses)

3.4 ขั้นตอนการวิจัย

1) ศึกษาสภาพการณ์ปัจจุบันของโซล่าฟาร์ม เช่น จำนวนแผงโซล่าเซลล์ ศักยภาพการทำงานของแผง และสภาพแวดล้อมในบริเวณที่ตั้งแผงโซล่าเซลล์ เป็นต้น

2) วิเคราะห์ระบบพลังงานทดแทนและความต้องการของชุมชน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ วิเคราะห์ระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงโซล่าเซลล์ที่มีอยู่ ลักษณะการใช้งาน การซ่อมบำรุงในปัจจุบัน และวิเคราะห์ความต้องการการใช้พลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์ในชุมชนกับส่วนสาธารณูปโภคอื่น ๆ ของชุมชน โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากจากวิธีการสนทนากลุ่มผ่านกิจกรรมการระดมสมอง และทำแผนผังแสดงเหตุและผล (Fishbone diagram) เพื่อค้นหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา

3) สร้างการจัดการความรู้ในการบริหารจัดการพลังงานทดแทนแก่ชุมชน (Knowledge management)

4) ออกแบบและวางแผนการบำรุงรักษาทวีผลที่ทุกคนมีส่วนร่วมโดยใช้หลักการ Total productive maintenance (TPM) และจัดทำคู่มือการดูแลและบำรุงรักษาทวีผลที่ทุกคนมีส่วนร่วม เพื่อให้ชุมชนสามารถดำเนินการต่อด้วยตนเองได้

5) การนำไปประยุกต์ใช้จริงและการมีส่วนร่วมของสมาชิกในชุมชน การติดตามการดำเนินการอย่างมีส่วนร่วมของสมาชิกในชุมชน ในการดูแลและบำรุงรักษาทวีผลโซล่าฟาร์มเพื่อการใช้งานที่เกิดประโยชน์สูงสุดและเป็นแนวทางลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานไฟฟ้าของชุมชน

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการสร้างการจัดการความรู้ในการบริหารจัดการพลังงานทดแทนเพื่อลดค่าใช้จ่ายระบบพลังงานไฟฟ้าของชุมชน

4.1.1 ผลการศึกษาสภาพการณ์ปัจจุบันของโซล่าฟาร์ม

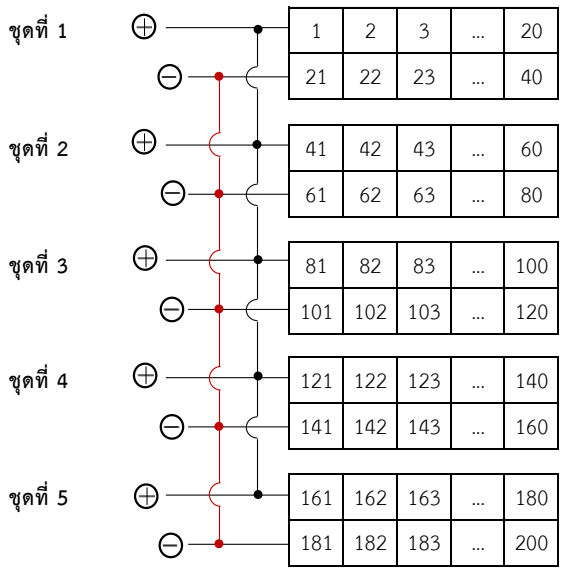
ชุมชนลำพุก หมู่ที่ 14 ตำบลตาเบา อำเภอปราสาท จังหวัดสุรินทร์ จากการสำรวจ โซล่าฟาร์มของ พบว่า โซล่าฟาร์มของชุมชนแห่งนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการของหน่วยงานภาครัฐเพื่อส่งเสริมระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ภายในศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงในชุมชนเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเริ่มการติดตั้งตั้งแต่ปี 2559 มีห้องควบคุม 1 ห้อง ที่มีอินเวอเตอร์ (Inverter) ตัวควบคุมชาร์จ (Charger) แบตเตอรี่ รวมถึงอุปกรณ์อื่น ๆ และในพื้นที่มีแผงโซล่าเซลล์จำนวนทั้งสิ้น 200 แผง จัดกลุ่มของแผงเป็น 5 ชุดย่อย ชุดละ 40 แผงที่เชื่อมต่อวงจรแบบอนุกรม และแต่ละชุดย่อยเชื่อมต่อกันแบบขนานดังภาพที่ 3 โดยแผงโซลาเซลล์ที่ถูกติดตั้งเป็นโมเดลรุ่น EE2250 โดยมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งทางโครงการที่เข้ามาสนับสนุนคาดว่าระบบโซล่าฟาร์มนี้จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้ารวมได้ 50 กิโลวัตต์ เพื่อใช้ในการลดค่าใช้จ่ายในระบบไฟฟ้าของชุมชน ณ ศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงของชุมชนที่ตั้งอยู่ ณ ศาลาประชาคมของหมู่บ้าน แต่ทั้งนี้หลังจากการติดตั้งเสร็จสิ้นแล้ว ระบบโซล่าฟาร์มก็ยังไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ตามที่คาดหวัง แม้จะมีการปรับปรุงแก้ไขจากผู้รับจ้างติดตั้ง จนสิ้นสุดสัญญาในปี 2560 ก็ยังไม่สามารถแก้ปัญหานี้ได้ทั้งหมด แต่ได้มีการส่งมอบครุภัณฑ์ระบบโซล่าฟาร์มให้ทางองค์การบริหารส่วนตำบลในพื้นที่เป็นผู้ดูแลต่อไปร่วมกับชุมชน

จนกระทั่งเวลาผ่านไปจนถึงปัจจุบัน แบตเตอรี่สำหรับจัดเก็บประจุ และอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ในห้องควบคุมเริ่มหมดอายุการใช้งาน ทำให้ชุมชนไม่สามารถใช้ประโยชน์พลังงานไฟฟ้าจากโซล่าฟาร์มได้เต็มที่ สภาพแวดล้อมรอบ ๆ แผงโซล่าเซลล์ในปัจจุบัน จึงมีวัชพืชจำนวนมากซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้มีการบดบังการรับแสงอาทิตย์ของแผงโซล่าเซลล์แสดงดังภาพที่ 2 จากการสำรวจศักยภาพการทำงาน การชำรุดของอุปกรณ์ และความสะอาดของทุกแผง พบว่า ทุกแผงยังมีความสามารถในการรับแสงและมี

แรงดันไฟฟ้าได้เฉลี่ย 32.42 โวลต์ (แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแผงเท่ากับ 37.9 โวลต์) และแผงส่วนใหญ่ไม่มีองค์ประกอบใดของแผงชำรุด มีเพียงจำนวน 1 แผงที่มีรอยแตกของแผ่นพลาสติกครอบหน้าแผงแต่ไม่ได้ส่งผลต่อความสามารถในการรับแสง ทั้งนี้ในปัจจุบันมีการใช้งานจริงจำนวน 6 แผง เนื่องจากทางผู้นำชุมชนและช่างชุมชนในพื้นที่พยายามใช้ประโยชน์จากแผงโซล่าเซลล์ที่มีโดยใช้เป็นระบบปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic water pumping system) โดยเชื่อมต่อสายส่งไฟฟ้าโดยตรงกับปั๊มสูบน้ำประปาของชุมชน และส่วนที่เหลือจำนวน 194 แผงไม่มีการใช้งาน แสดงดังภาพที่ 4 จากสภาพแวดล้อมของพื้นที่ที่มีสิ่งสกปรกและวัชพืชบดบังการรับแสงแดด ทางคณะผู้วิจัย และนักศึกษาของมหาวิทยาลัยจึงดำเนินการร่วมกับชุมชนในการปรับปรุงสภาพแวดล้อมโดยรอบให้เอื้อต่อการรับแสง กำหนดจุดสำหรับต่อท่อน้ำเพื่อใช้ในการทำความสะอาด และถ่ายทอดความรู้ในการทำความสะอาดแผงโซล่าเซลล์ด้วยตนเอง พร้อมทั้งติดป้ายระบุหมายเลขลำดับแผงเพื่อสะดวกต่อการตรวจสอบสภาพแผงและการแจ้งปัญหา

ตารางที่ 1 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงโซลาเซลล์

คุณลักษณะ	รายละเอียด
Maximum Power (Pmax)	250 W
Power tolerance	± 5%
Short-circuit current (Isc)	9.01 A
Open-circuit voltage (Voc)	37.9 V
Dimension	1,640 x 992 x 35 mm
Maximum System Voltage	1,000 Vdc



ภาพที่ 3 การเชื่อมต่อวงจรของแผงโซล่าเซลล์

ภาพที่ 4 ผลการสำรวจสถานสภาพปัจจุบันของแผงโซล่าเซลล์

ภาพที่ 5 การติดป้ายระบุหมายเลขลำดับแผงและตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าของแผงโซล่าเซลล์

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ระบบพลังงานทดแทนและความต้องการของชุมชน

1) ผลการวิเคราะห์ระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงโซล่าเซลล์ที่มีอยู่ ศึกษาจากการเก็บรวบรวมข้อมูลจากวิธีการสนทนากลุ่ม ในประเด็นลักษณะการใช้ประโยชน์ การดูแลรักษาและการซ่อมบำรุงในปัจจุบัน พบว่า มีการใช้งานแผงโซล่าเซลล์จำนวน 6 แผง ตามภาพที่ 3 โดยใช้ในการสูบน้ำจากสระหมู่บ้านในช่วงกลางวัน ส่วนช่วงกลางคืนสลับเป็นการใช้ไฟฟ้า ส่วนแผงโซล่าเซลล์ที่เหลือไม่มีการใช้ประโยชน์ใด ๆ ทั้งนี้สามารถคิดเป็นร้อยละการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรเพียงร้อยละ 3 เท่านั้น แผงโซล่าเซลล์ในชุมชนยังไม่มีการจัดการดูแลรักษาเนื่องจากสมาชิกในชุมชนไม่มีประสบการณ์และความรู้เรื่อง

การดูแลรักษา ในการซ่อมบำรุงมีช่างประจำหมู่บ้านและกองช่างจากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นเข้ามาดูแลเมื่อมีการชำรุดหรือใช้การไม่ได้

2) ผลการวิเคราะห์ความต้องการของชุมชนใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงโซล่าเซลล์ที่มีอยู่ คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการระดมสมองกับผู้ให้ข้อมูลที่เป็นผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย วิเคราะห์ความต้องการของชุมชน โดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผล (Fishbone diagram) จากปัญหาคือแผงโซล่าเซลล์ถูกใช้งานไม่เต็มประสิทธิภาพ โดยผลจากการระดมสมองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2 สามารถสรุปได้ว่าทุกสาเหตุที่เกิดขึ้นล้วนเป็นปัจจัยในการทำให้เกิดปัญหาแผงโซล่าเซลล์ถูกใช้งานไม่เต็มประสิทธิภาพ และสมาชิกในชุมชนให้ความเห็นตรงกันว่าควรแก้ปัญหาที่คนเป็นลำดับแรก เพื่อลดปัญหาในส่วนอื่น ๆ ลง

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปัญหา ระบุสาเหตุ และแนวทางการแก้ไข

ปัญหา : แผงโซล่าเซลล์ถูกใช้งานไม่เต็มประสิทธิภาพ		
สาเหตุ	**รายละเอียด**	**แนวทางการแก้ไข**
คน	- ขาดความรู้ ทักษะ และประสบการณ์ในการใช้งานแผงโซล่าเซลล์ - ขาดความรู้ในการคำนวณพลังงานทดแทนที่ได้จากแผงโซล่าเซลล์และนำไปใช้ในจุดต่างๆของชุมชน - ขาดความรู้ในการดูแลรักษาแผงโซล่าเซลล์	สมาชิกในชุมชนได้รับความรู้เกี่ยวกับส่วนประกอบ การใช้งาน การดูแลแลรักษาและการซ่อมแซมเบื้องต้นของแผลโซล่าเซลล์และสามารถดำเนินการต่อยอดในการใช้ประโยชน์จากแผงโซล่าเซลล์ที่เหลือได้
เครื่องจักร/อุปกรณ์	- ขาดแคลนเครื่องมือในการตรวจสอบการใช้งานของแผงโซล่าเซลล์	โครงการวิจัยได้มอบเครื่องมือวัดบางส่วนแก่ชุมชนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์และให้ข้อมูลเกี่ยวกับราคาของเครื่องมือต่าง ๆเป็นแนวทางในการตัดสินใจของชุมชน
วิธีการ	- ขาดการบริหารจัดการการใช้พลังงานทดแทน - ขาดการวางแผนในการดูแลรักษาและซ่อมแซม - ขาดการมีส่วนร่วมของชุมชนในการบริหารจัดการการใช้พลังงานทดแทน ดูแลรักษาและซ่อมแซม	- ชุมชนมีคู่มือในการตรวจสอบสภาพและดูแลรักษาแผงโซล่าเซลล์ - ชุมชนมีการวางแผนบริหารจัดการคนในการดูแลรักษาแผงโซล่าเซลล์โดยทุกคนมีส่วนร่วม - ชุมชนสามารถคำนวณและนำพลังงานไฟฟ้าจากแผงโซล่าเซลล์ไปใช้ประโยชน์ในส่วนอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
วัตถุดิบ	- มีวัสดุบางส่วนที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน มีสภาพใกล้ชำรุด	มีการเปลี่ยนวัสดุอุปกรณ์ตามอายุการใช้งาน
สภาพแวดล้อม	- สภาพแวดล้อมบริเวณโซล่าฟาร์ม มีวัชพืชเกิดขึ้นจำนวนมากเป็นสาเหตุให้บดบังการรับแสงอาทิตย์ของแผง	มีการกำจัดวัชพืชบริเวณโซล่าฟาร์มเป็นประจำ

3) ผลการสร้างการจัดการความรู้ในการบริหารจัดการพลังงานทดแทนแก่ชุมชน

ผลการวิเคราะห์การจัดการความรู้ในการบริหารจัดการพลังงานทดแทนตามกระบวนการ 7 ขั้นตอน (Du Plessis, 2007) แสดงผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์การจัดการความรู้

กระบวนการ	รายละเอียด
1. การบ่งชี้ความรู้	สมาชิกชุมชนส่วนใหญ่มีประสบการณ์การใช้แผงโซล่าเซลล์แต่เป็นขนาดเล็กที่ใช้ให้แสงสว่างภายนอกบ้านที่อยู่อาศัยหรือคอกสัตว์เลี้ยง แต่ถ้าเป็นแผงขนาดใหญ่ดังเช่นในโซล่าฟาร์มของชุมชนยังไม่มีความรู้ในการใช้งาน มีเพียงแค่ช่างชุมชนที่มีความรู้และทักษะเบื้องต้นในการใช้งานและซ่อมแซม หรือแม้แต่ตัวแทนจากกองช่างของ อบต. ในพื้นที่ก็มีความเชี่ยวชาญในระบบไฟฟ้าทั่วไปเท่านั้น ดังนั้นในการบ่งชี้ความรู้เพื่อให้ชุมชนสามารถบริหารจัดการพลังงานทดแทนของชุมชนเองได้ จึงเห็นควรว่าชุมชนควรมีความรู้เบื้องต้นในประเด็นเรื่องส่วนประกอบของแผงโซล่าเซลล์ ระบบการทำงาน การดูแลและบำรุงรักษา ตลอดจนการสังเกตและตรวจสอบศักยภาพในการทำงานของแผงโซล่าเซลล์ เป็นต้น
2. การสร้างและแสวงหาความรู้	วิธีการสร้างและแสวงหาความรู้แก่ชุมชน ได้แก่ การอบรมเชิงปฏิบัติการในการบริหารจัดการการพลังงานทดแทน ดังภาพที่ 6 การสืบค้นข้อมูลที่สนใจจากอินเตอร์เน็ต การประชุมหมู่บ้านเพื่อสร้างการรับรู้และสร้างความเข้าใจด้านการจัดการพลังงานทดแทนของชุมชน รวมถึงการสร้างจิตสำนึกในการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าแก่ชุมชน
3. การจัดความรู้ให้เป็นระบบ	การจัดตั้งคณะกรรมการการบริหารจัดการการพลังงานทดแทนของชุมชนเพื่อสร้างการมีส่วนร่วมโดยการกำหนดบทบาทและหน้าที่ และการจัดทำแผนการจัดสรรและการบำรุงรักษาพลังงานทดแทนของระบบพลังงานไฟฟ้าชุมชน
4. การประมวลและกลั่นกรองความรู้	การเก็บข้อมูลจากการสำรวจและวิเคราะห์ศักยภาพการทำงานภายในโซล่าฟาร์มของชุมชน วิเคราะห์ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในพื้นที่บริการสาธารณะประโยชน์ และการวิเคราะห์แนวทางการใช้ประโยชน์จากแผงในโซล่าฟาร์ม และถ่ายทอดองค์ความรู้ในการอบรมเชิงปฏิบัติการ
5. การเข้าถึงความรู้	การจัดทำคู่มือการบริหารจัดการการพลังงานทดแทนของชุมชนตามแนวคิดการบำรุงรักษาทวีผลที่ทุกคนมีส่วนร่วม โดยถ่ายทอดองค์ความรู้ผ่านการอบรมเชิงปฏิบัติการและการประชุมเชิงปฏิบัติการร่วมกับชุมชน หน่วยงาน และมหาวิทยาลัย
6. การแบ่งปันแลกเปลี่ยนความรู้	การอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อสร้างต้นแบบผู้มีความรู้และทักษะในการบริหารจัดการพลังงานทดแทนเบื้องต้นที่สามารถถ่ายทอดต่อให้แก่ผู้อื่นได้ โดยมีมหาวิทยาลัยเป็นที่ปรึกษา
7. การเรียนรู้	ชุมชนนำความรู้ไปใช้ในการบริหารจัดการการใช้พลังงานทดแทนของชุมชนด้วยตนเองหรือสามารถต่อยอดและประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันของตนเองหรือการทำเกษตรกรรมของครัวเรือนได้

ภาพที่ 6 การสร้างความรู้ในการบริหารจัดการพลังงานทดแทนแก่ชุมชน

4.2 ผลการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์ โดยการมีส่วนร่วมของชุมชน

4.2.1 ผลการออกแบบการบำรุงรักษาทวีผลที่ทุกคนมีส่วนร่วม จากการระดมสมองเพื่อหาสาเหตุของปัญหาและการจัดการความรู้นั้น คณะผู้วิจัยและสมาชิกชุมชนจึงร่วมกันออกแบบการบำรุงรักษาทวีผลที่ทุกคนมีส่วนร่วมโดยจัดทำเป็น “คู่มือการใช้งานและบริหารจัดการพลังงานทดแทนของระบบพลังงานไฟฟ้าชุมชนอย่างมีส่วนร่วม” ซึ่งประกอบไปด้วย 7 ส่วนหัวข้อ ได้แก่ (1) บทนำ (2) ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแผงโซล่าเซลล์ (3) การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive maintenance : PM) (4) การใช้เครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ (5) การดูแลรักษาและทำความสะอาดแผงโซล่าเซลล์ (6) ปริมาณกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์/เครื่องใช้ไฟฟ้าในพื้นที่บริการสาธารณะประโยชน์ของชุมชน และ (7) แผนการจัดสรรพลังงานทดแทนของระบบพลังงานไฟฟ้าชุมชน

จากการวิเคราะห์ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงโซล่าเซลล์ทดแทนการใช้ไฟฟ้าสมาชิกในชุมชนต้องการให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงโซล่าเซลล์ภายในชุมชน จำนวน 5 จุดที่เป็นพื้นที่บริการสาธารณะประโยชน์ของชุมชนที่อยู่ใกล้โซล่าฟาร์ม โดยคณะผู้วิจัยได้อบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อถ่ายทอดความรู้เบื้องต้นในการคำนวณการใช้ไฟฟ้า และกำหนดจำนวนแผงที่ต้องใช้จากการวางแผนจัดสรรพลังงาน แสดงแผนการใช้ประโยชน์จากแผงโซล่าเซลล์ที่มีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้แผงให้เกิดประโยชน์สูงสุดดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แผนการใช้ประโยชน์จากแผงโซล่าเซลล์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้แผง

พื้นที่บริการสาธารณะประโยชน์ของชุมชน	ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม (kW)	จำนวนแผงโซล่าเซลล์ที่ใช้ (แผง)	ประสิทธิภาพจากการใช้ประโยชน์แผง (ร้อยละ)
1. ประปาหมู่บ้าน	9.56	34	17
2. ศูนย์สาธิตการตลาด	2.51	12	6
3. ศาลาประชาคมหมู่บ้าน	2.99	10	5
4. โรงสีข้าวชุมชน	7.72	28	14
5. โรงคัดแยกเมล็ดพันธุ์ข้าว	11.84	42	21
รวม	34.62	126	63

จากตารางที่ 3 ในการวิเคราะห์ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในพื้นที่บริการสาธารณะประโยชน์ของชุมชนที่เป็นพื้นที่ส่วนกลางนั้น สมาชิกในชุมชนเห็นควรว่าหากต่อยอดการใช้ประโยชน์จากแผงโซล่าเซลล์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้แผงที่มีอยู่ในการลดค่าใช้จ่ายระบบพลังงานไฟฟ้าของชุมชนนั้น หากมีการดำเนินการปรับปรุงระบบเพื่อเชื่อมต่อทั้ง 5 พื้นที่ที่คัดเลือก คาดว่าจะมีจำนวนการใช้งานแผงทั้งสิ้น 126 แผง คิดประสิทธิภาพจากการใช้ประโยชน์แผงโซล่าเซลล์ ร้อยละ 63 โดยส่วนแผงในส่วนที่เหลืออีก 74 แผง นอกจากนี้คณะผู้วิจัยใช้วิธีการวิเคราะห์ปัจจัย (Factor rating method) เพื่อให้ผู้มีส่วนร่วมในการบริหารจัดการพลังงานทดแทนประเมินปัจจัยเพื่อเรียงลำดับความสำคัญของพื้นที่บริการสาธารณะประโยชน์ของชุมชน ซึ่งวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ปัจจัยหลัก คือ 1) การบริการชุมชน 2) ช่วงเวลาของการใช้ประโยชน์ และ 3) งบประมาณในการดำเนินการ โดยกำหนดให้ทุกปัจจัยมีน้ำหนักความสำคัญเท่ากัน และค่าการให้คะแนนอยู่ระหว่าง 0 ถึง 10 คะแนน ซึ่งการเรียงลำดับความสำคัญของพื้นที่จะพิจารณาจากคะแนนรวมของทุกปัจจัย หากคะแนนรวมมีค่าสูงจะตีความได้ว่าพื้นที่นั้นมีความสำคัญที่เห็นควรในการดำเนินการก่อน แสดงผลการประเมินได้ดังนี้

ตารางที่ 4 ผลการประเมินเรียงลำดับความสำคัญของพื้นที่บริการสาธารณะประโยชน์ของชุมชน

พื้นที่บริการสาธารณะประโยชน์ของชุมชน	ปัจจัยที่ 1 การบริการชุมชน	ปัจจัยที่ 2 ช่วงเวลา	ปัจจัยที่ 3 งบประมาณ	คะแนนรวม	ลำดับ
1. ประปาหมู่บ้าน	10	10	7	27	1
2. ศูนย์สาธิตการตลาด	8	9	9	26	2
3. ศาลาประชาคมหมู่บ้าน	9	8	10	27	1
4. โรงสีข้าวชุมชน	7	7	8	22	3
5. โรงคัดแยกเมล็ดพันธุ์ข้าว	7	6	6	19	4

จากตารางที่ 4 หากมีงบประมาณในการดำเนินการในการพัฒนา คาดว่าจะเริ่มดำเนินการปรับปรุงระบบการเชื่อมต่อเพื่อใช้ประโยชน์จากแผงในจุดที่ 1 ประปาหมู่บ้านเป็นจุดแรก เนื่องจากระบบน้ำเป็นสาธารณูปโภคพื้นฐานที่จำเป็นในการดำรงชีวิตและการประกอบอาชีพ ตามด้วยจุดที่ 3 ศาลาประชาคมหมู่บ้าน จุดที่ 2 ศูนย์สาธิตการตลาด จุดที่ 4 โรงสีข้าวชุมชน และจุดที่ 5 โรงคัดแยกเมล็ดพันธุ์ข้าว ตามลำดับ ทั้งนี้อีก 74 แผงที่เหลือ หากเป็นไปได้ทางชุมชนวางแผนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในระบบแสงสว่างตามถนนภายในชุมชน

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยและสมาชิกในชุมชนได้ร่วมกันออกแบบโครงสร้างและหน้าที่ของผู้มีส่วนร่วมในการบริหารจัดการการใช้พลังงานทดแทนของระบบพลังงานไฟฟ้าชุมชนแสดงดังภาพที่ 6 เพื่อให้สมาชิกในชุมชนทราบบทบาทหน้าที่ของผู้ดูแลรักษาโซล่าฟาร์ม โดยเริ่มจากผู้รับผิดชอบโซล่าฟาร์มในพื้นที่คือองค์การบริหารส่วนตำบล มีหน้าที่อำนวยความสะดวกและให้คำปรึกษาในการปฏิบัติงาน การใช้งานและการซ่อมแซมโซล่าฟาร์ม ผู้ใหญ่บ้านมีหน้าที่อำนวยความสะดวก ควบคุม กำกับดูแลในการปฏิบัติงาน รับฟังข้อคิดเห็นและปัญหา ประสานงานในการติดต่อกับส่วนงานที่เกี่ยวข้อง สนับสนุนส่งเสริมและสร้างการมีส่วนร่วมของชุมชน คณะกรรมการหมู่บ้านมีหน้าที่ ช่วยเหลือ แนะนำ ให้คำปรึกษาแก่ผู้ใหญ่บ้าน บูรณาการจัดทำแผนพัฒนาชุมชนและทำงานร่วมกับทุกองค์กร ปฏิบัติหน้าที่อื่น ๆ ตามที่ได้รับมอบหมาย ตลอดจนสมาชิกในชุมชนที่มีหน้าที่ตรวจสอบสภาพแผงโซล่าเซลล์ อินเวอเตอร์ และตัวควบคุมชาร์จ สายไฟ อุปกรณ์เชื่อมต่อและแบตเตอร์รี่ ทำความสะอาดแผงโซล่าเซลล์ และบริเวณที่ติดตั้ง และปฏิบัติหน้าที่อื่นตามที่ได้รับมอบหมายร่วมกับช่างชุมชนและกองช่างจากองค์การบริหารส่วนตำบลเพื่อดูแลรักษาโซล่าฟาร์ม

ภาพที่ 6 โครงสร้างและหน้าที่ของผู้มีส่วนร่วมในการบริหารจัดการการใช้พลังงานทดแทนของระบบพลังงานไฟฟ้าชุมชน

อีกทั้งยังมีการออกแบบแผนการบำรุงรักษาพลังงานทดแทนของระบบพลังงานไฟฟ้าชุมชนตามหลักการของการบำรุงรักษาทวีผลที่ทุกคนมีส่วนร่วม (TPM) ที่ประกอบด้วยเสาหลักทั้งหมด 8 เสา (Ireland and Dale, 2001) ซึ่งในงานวิจัยนี้นำมาปรับใช้ด้วยกัน 4 เสา ได้แก่ (1) การปรับปรุงเฉพาะเรื่อง (Specific improvement) (2) การบำรุงรักษาด้วยตนเอง (Autonomous maintenance) (3) การบำรุงรักษาตามแบบแผน (Planned maintenance) และ (4) การศึกษาและฝึกอบรม (Education/Training) เพื่อเป็นแนวทางให้สมาชิกในชุมชนใช้ในการตรวจสอบภาพการใช้งานและการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของแผงโซล่าเซลล์ แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

- เสาที่ 1 การปรับปรุงเฉพาะเรื่อง ใช้หลักการ Kaizen โดยการติดป้ายระบุหมายเลขลำดับแผงและกำหนดโมดูลแผงเพื่อสะดวกต่อการตรวจสอบสภาพแผงและการแจ้งปัญหา ติดตั้งระบบน้ำเพื่อเพิ่มความสะดวกในการทำความสะอาดแผง และจัดทำโครงสร้างผู้มีส่วนร่วมในการบริหารจัดการการใช้พลังงานทดแทนของระบบพลังงานไฟฟ้าชุมชนเพื่อสร้างการรับรู้และแนวทางในการดำเนินงานร่วมกัน

- เสาที่ 2 การบำรุงรักษาด้วยตนเอง โดยการจัดสรรสมาชิกในการดูแลและตรวจสอบการใช้งานตามใบตรวจเช็ค (Check sheet) เพื่อติดตามปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นกับแผงโซล่าเซลล์ตามแผนการบำรุงรักษาพลังงานทดแทนของระบบพลังงานไฟฟ้าชุมชนที่มีอยู่ในคู่มือฯ ตลอดจนมีการทำ 5ส ในบริเวณโซล่าฟาร์มเพื่อดูแลสภาพแวดล้อมโดยรอบ

- เสาที่ 3 การบำรุงรักษาตามแบบแผน โดยกำหนดแผนการตรวจสอบและบำรุงรักษาแผงเชิงป้องกันทุก ๆ 1 เดือน และแผนการทำความสะอาดแผงในโซล่าฟาร์มทุก ๆ 3 เดือน

- เสาที่ 4 การศึกษาและฝึกอบรม โดยจัดทำคู่มือฯ เพื่อให้สมาชิกชุมชนเข้าถึงความรู้ในการใช้งานและดูแลรักษาโซล่าฟาร์ม ชี้แจงและให้ความรู้กับสมาชิกชุมชนเพื่อขยายองค์ความรู้ให้กับคนในชุมชนได้มากขึ้น

4.2.2 ผลการนำไปประยุกต์ใช้จริงและการมีส่วนร่วมของสมาชิกในชุมชน การติดตามการดำเนินการอย่างมีส่วนร่วมของสมาชิกในชุมชน ในการดูแลและบำรุงรักษาทวีผลโซล่าฟาร์มเพื่อการใช้งานที่เกิดประโยชน์สูงสุดและลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานไฟฟ้าของชุมชน เนื่องจากระยะเวลาในการดำเนินโครงการค่อนข้างมีจำกัด การติดตามการดำเนินการอย่างมีส่วนร่วมของสมาชิกในชุมชนฯ จึงดำเนินการหลังโครงการเสร็จสิ้นโดยมีการสอบถามจากผู้นำชุมชนในการนำความรู้ไปประยุกต์ใช้จริงและการมีส่วนร่วมของสมาชิกในชุมชน พบว่า 1) สมาชิกในชุมชนมีความรู้ในการทำงาน การใช้งานและการดูแลรักษาแผงโซล่าเซลล์มากขึ้น ซึ่งจากเดิมมีคนหลักในการดูแลเพียง 2 คน คือช่างชุมชนในหมู่บ้าน แต่ปัจจุบันมีต้นแบบที่เป็นแกนนำที่มีความรู้และทักษะเบื้องต้นในการจัดการระบบพลังงานทดแทน 2) ชุมชนมีการจัดสรรสมาชิกในการตรวจสอบและบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ตลอดจนมีการดูแลสภาพแวดล้อมโดยรอบทุก ๆ เดือนหลังจากประชุมหมู่บ้าน และทำความสะอาดแผงทุก ๆ 3 เดือน

3) ชุมชนมีการประชุมหารือในการวางแผนใช้พลังงานจากแผงโซล่าเซลล์ตามจุดต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ โดยอาจร่วมมือกับองค์การบริหารส่วนตำบลในการดำเนินการหรือหน่วยงานอื่น ๆ ที่มีส่วนช่วยในการพัฒนา

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากการวิเคราะห์สภาพการณ์ปัจจุบันของระบบพลังงานทดแทนและความต้องการของชุมชนบ้านลำพุก ตำบลตาเบา อำเภอปราสาท เพื่อหาแนวทางในการบริหารจัดการพลังงานทดแทนที่ได้รับการสนับสนุนจากหน่วยงานภาครัฐให้เต็มประสิทธิภาพในการลดรายจ่ายค่าไฟฟ้าของชุมชนนั้น ผลการวิเคราะห์ พบว่า ปัจจุบันการใช้ประโยชน์ของแผงในโซล่าฟาร์มมีเพียงร้อยละ 3 เท่านั้น และไม่มีการจัดการและดูแลรักษาแผงเท่าที่ควรนัก เนื่องจากสมาชิกในชุมชนไม่มีประสบการณ์และความรู้เกี่ยวกับแผงโซล่าเซลล์ จึงเล็งเห็นว่าควรแก้ปัญหาที่คนเป็นลำดับแรก ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของสุลีกร (2562) ที่กล่าวว่าชาวบ้านยังไม่มีความรู้มากพอในเรื่องการใช้และจัดการพลังงานชุมชนอย่างยั่งยืน สิ่งสำคัญคือการให้ความรู้และสร้างความเข้าใจให้ชุมชนในการบริหารจัดการพลังงานชุมชน เพราะจะช่วยให้การดำเนินการต่าง ๆ เป็นไปอย่างมีระบบ และเมื่อดำเนินการจัดการความรู้และอบรมเชิงปฏิบัติการผ่านกิจกรรมถ่ายทอดความรู้ในการบริหารจัดการพลังงานทดแทนแก่ชุมชนเพื่อเพิ่มความรู้และทักษะให้กับสมาชิกในชุมชนในการตรวจสอบสภาพและดูแลรักษาแผงโซล่าเซลล์ด้วยตนเองได้ และดำเนินกิจกรรมการออกแบบการบำรุงรักษาทวีผลที่ทุกคนมีส่วนร่วมโดยใช้หลักการ Total productive maintenance (TPM) โดยจัดทำคู่มือการดูแลและบำรุงรักษาทวีผลที่ทุกคนมีส่วนร่วมในการบำรุงรักษาแผงโซล่าเซลล์เชิงป้องกันเพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์และลดงบประมาณในการซ่อมแซม (สกลเกียรติ, 2564) วางแผนการจัดสรรพลังงานจากการใช้ประโยชน์จากแผงโซล่าเซลล์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้แผงที่มีอยู่ และกำหนดโครงสร้างและหน้าที่ของผู้มีส่วนร่วมในการบริหารจัดการการใช้พลังงานทดแทนของระบบพลังงานไฟฟ้าชุมชนเพื่อให้ชุมชนสามารถดำเนินการต่อด้วยตนเองได้ ซึ่งชุมชนได้เล็งเห็นประโยชน์จากผลการวิจัยและนำไปดำเนินการเพื่อประโยชน์ของชุมชน ทั้งนี้ในอนาคตหากชุมชนบ้านลำพุกสามารถใช้ประโยชน์จากโซล่าฟาร์มได้อย่างเต็มประสิทธิภาพในพื้นที่บริการสาธารณะประโยชน์ของชุมชนทั้ง 5 จุดที่อยู่ใกล้โซล่าฟาร์ม จะสามารถใช้ประโยชน์จากแผงโซล่าเซลล์ที่มีได้ทั้งสิ้นร้อยละ 63 ซึ่งส่งผลต่อการลดรายจ่ายค่าไฟฟ้าของชุมชนระยะยาวและสามารถเป็นต้นแบบให้กับชุมชนอื่น ๆ หรือเป็นแนวทางในการตัดสินใจเกี่ยวกับการสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนของชุมชนสำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้อีกด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากโครงการยุทธศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์เพื่อการพัฒนาท้องถิ่น ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

7. เอกสารอ้างอิง

กระทรวงพลังงาน. (2564). **แผนพลังงานแห่งชาติ**. ค้นจาก https://www.eppo.go.th/epposite/index.php/th/petroleum/oil/link-doeb/item/17093-nep

มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2561). **รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการพัฒนาปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย**. มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.

สกลเกียรติ กวีพิชชาพัชร. (2564). **รายงานการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงงระบบปรับอากาศอาคาร 50 ปี วิศวะรวมใจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น**. กองบริหารงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

สุลีกร สุปัน. (2562). การจัดการพลังงานชุมชนอย่างยั่งยืน: กรณีศึกษาชุมชนนาเหลือง อำเภอเวียงสา จังหวัดน่าน. **วารสารพัฒนาสังคมและยุทธศาสตร์การบริหาร**. 21(2), 45–63. ค้นจาก http://so04.tci-thaijo.org/index.php/jsd/article/view/165389

Du Plessis, M. (2007). The role of knowledge management in innovation. **Journal of Knowledge Management**, 11(4), 20–29. doi.org/10.1016/j.jik.2017.07.003

Ireland, F., & Dale, B.G. (2001), A study of total productive maintenance implementation. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 7(3), 183-192. Doi: 10.1108/13552510110404495

Nakajima, S. (1988). **Introduction to Total Productive Maintenance (TPM).** Productivity Press, Portland, OR.

การลดต้นทุนพลังงานในกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่นด้วยระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์

REDUCING ENERGY COSTS IN THE GREEN CAVIAR SORTING PROCESS WITH HYBRID SOLAR INVERTER SYSTEM

กมลวรรณ วงศ์วุฒิ, ดวงกมล อังอำนวยศิริ*
Kamolwan Wongwut, Daungkamol Angamnuaysiri*
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี อ.เมือง จ.เพชรบุรี ประเทศไทย 76000
Faculty of Engineering and Industrial Technology, Phetchaburi Rajabhat University, Muang, Phetchaburi, Thailand, 76000
*Corresponding author e-mail: daungkamol.fame@gmail.com

วันที่เข้าระบบ 24 มีนาคม 2566
วันที่แก้ไขบทความ 12 มีนาคม 2567
วันที่ตอบรับบทความ 12 มีนาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีโอทูบับเบิ้ลของระบบการเติมอากาศหมุนเวียนออกซิเจนในน้ำ ใช้เป็นแนวทางสำหรับการลดต้นทุนพลังงานในกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่น ทำการเปรียบเทียบต้นทุนพลังงานระหว่างระบบที่ไม่ใช้พลังงานทางเลือกกับระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2565 จนถึงเดือนมกราคม 2566 ซึ่งภาระโหลดทางไฟฟ้า ที่ใช้ในกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่น จะมีอยู่ 2 ส่วน คือ 1) ใช้กับโหลดขนาด 1.5 kW และ 2) ใช้กับโหลดขนาด 1.1 kW ซึ่งโหลดแต่ละส่วนจะใช้งานต่อเนื่องกัน 24 ชั่วโมง และสลับกันทำงานวันเว้นวัน จากการทดสอบการวัดปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์ พบว่า เดือนสิงหาคม สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 278 kWh คิดเป็น 24.82% ของพลังงานที่ใช้, เดือนกันยายน สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 283 kWh คิดเป็น 25.27% ของพลังงานที่ใช้, เดือนตุลาคม สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 276 kWh คิดเป็น 24.64% ของพลังงานที่ใช้, เดือนพฤศจิกายน สามารถผลิตพลังงาน ไฟฟ้าได้เท่ากับ 274 kWh คิดเป็น 32.62% ของพลังงานที่ใช้, เดือนธันวาคม สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า ได้เท่ากับ 305 kWh คิดเป็น 36.31% ของพลังงานที่ใช้ และเดือนมกราคม สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 293 kWh คิดเป็น 34.88% ของพลังงานที่ใช้ จากการเปรียบเทียบต้นทุนพลังงานไฟฟ้าของระบบการเติมอากาศในกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่นหลังการติดตั้งระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์ กรณีใช้กับโหลดขนาด 1.5 kW พบว่า เกิดการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน เฉลี่ยเท่ากับ 25.74% และกรณีใช้กับโหลดขนาด 1.1 kW พบว่า เกิดการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน เฉลี่ยเท่ากับ 36.11%

คำสำคัญ: เทคโนโลยีโอทูบับเบิ้ล, พลังงานทดแทน, สาหร่ายพวงองุ่น, ไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์

Abstract

This research has the purpose of applying the technology of electricity generated from solar energy to cooperate with the O2 bubble technology of the water oxygen circulating aeration system as a guideline for reducing energy costs in sorting green caviar seaweed and comparing energy costs between non-alternative and hybrid solar inverter systems. Data was collected from August 2022 to January 2023. The electrical load used in sorting green caviar seaweed consisted of two parts: 1) a load of 1.5 kW, and 2) a load of 1.1 kW. Each part of the load was continuously used for 24 hours, and it took turns working every other day. The results of testing the electrical energy quantity produced by the hybrid solar inverter system showed the production quantities of the energy used as follows: it produced electrical energy equal to 278 kWh in August, accounting for 24.82%, and 283 kWh in September, accounting for 25.27%. 276 kWh, accounting for 24.64% in October; 274 kWh, accounting for 32.62% in September; 305 kWh, accounting for 36.31% in December; and in January 293 kWh, accounting for 34.88%. When comparing the cost of the aeration system's electrical energy in sorting Green Caviar seaweed after installing the hybrid solar inverter system with a load size of 1.5 kW, average cost savings in energy expenses equaled 25.74%, while with a load size of 1.1 kW, it was 36.11%.

Keywords: O_2 bubble technology, Renewable energy, Green caviar seaweed, Hybrid solar inverter

1. บทนำ

ปัจจุบันสาหร่ายทะเลหลายชนิดมีความสำคัญทั้งทางด้านเศรษฐกิจและระบบนิเวศวิทยา สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น เป็นอาหาร เป็นปุ๋ย ใช้เลี้ยงสัตว์ สกัดเป็นสารทำวุ้นใช้ได้ทั้งในภาคอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม และเครื่องสำอาง ตลอดจนเคมีภัณฑ์ในวงการแพทย์และการเกษตร นอกจากนี้ ชาวบ้านในบริเวณพื้นที่ชายฝั่งทะเลภาคใต้ของประเทศไทยก็นิยมบริโภคสาหร่ายพวงองุ่นมาเป็นเวลานาน ต่อมาพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี ในการดูแลของศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่งเพชรบุรี ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี มีการพัฒนาเทคนิคการเพาะเลี้ยงและการขยายผลการเพาะเลี้ยง จากฟาร์มทะเลตัวอย่างของสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์

พระบรมราชินีนาถ พระบรมราชชนนีพันปีหลวง ให้เกษตรกรในพื้นที่ได้ทดลองปลูกสาหร่ายพวงองุ่นมาอย่างต่อเนื่อง ด้วยลักษณะทางกายภาพและสภาพพื้นที่บริเวณตำบลแหลมผักเบี้ยซึ่งอยู่ติดทะเล จึงเหมาะแก่การเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงองุ่น จนในปัจจุบันสามารถเพาะเลี้ยงให้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทำให้การขยายผลเชิงพาณิชย์นำไปสู่การสร้างอาชีพและสร้างรายได้ที่มั่นคง (มนทกานติ ท้ามดิ้น, ม.ป.ป.)

การสร้างระบบการเติมอากาศหมุนเวียนออกซิเจนในน้ำหลังการเก็บเกี่ยวสาหร่ายพวงองุ่นขึ้นมาจากบ่อเลี้ยง นับเป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่งในการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่น เพื่อการจัดจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ สาหร่ายต้องได้รับปริมาณออกซิเจนในน้ำที่เพียงพอและต่อเนื่องกันอย่างสม่ำเสมอตลอด 24 ชั่วโมง เพื่อกระตุ้นให้สาหร่ายฟื้นตัวจากกระบวนการเก็บเกี่ยว ทำให้เกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงองุ่นมีต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานค่อนข้างสูง จากการศึกษาข้อมูลพบว่า การนำพลังงานทางเลือกมาประยุกต์ใช้ในระบบการเติมอากาศหมุนเวียนออกซิเจนในน้ำ มีหลากหลายแบบ (ชัยยงค์ และคณะ, 2563; ธวัชชัย, 2565; ภารดร และคณะ, 2020) ไม่ว่าจะเป็นการสร้างชุดกังหันน้ำเติมอากาศโดยใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งนำแผงโซลาร์เซลล์มาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ชาร์จแบตเตอรี่ และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877 ควบคุมระบบการดึงพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้สูงสุด (ธวัชชัย และคณะ, 2556) รวมทั้งการพัฒนาระบบควบคุมเครื่องเติมอากาศแบบอัตโนมัติในบ่อเลี้ยงปลานิล วิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงาน กรณีศึกษาการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าพื้นฐานร่วมกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบเติมอากาศ สามารถลดการใช้พลังงานของระบบเติมอากาศในช่วงเวลากลางวันได้เฉลี่ย 38.98 % และช่วงเวลากลางคืนได้เฉลี่ย 18.93% (ศิริวรรณ และคณะ, 2561) ต่อมามีการทดลองใช้เครื่องเติมอากาศในน้ำด้วยกังหันพลังงานแสงอาทิตย์ในบ่อเลี้ยงกุ้ง ใช้แผงชนิดโพลีคริสตัลไลน์ ขนาด 330 W ต่อเข้ากับโซลาร์ชาร์จเจอร์ เพื่อทำหน้าที่ในการควบคุมการชาร์จพลังงานลงในแบตเตอรี่ ผลการทดลองพบว่า ช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้จริง สามารถประจุกำลังไฟฟ้าได้เฉลี่ย 187.46 W และประจุพลังงานได้สูงสุด 202.50 W (พัชรินทร์ และคณะ, 2022) นอกจากนี้ ยังมีการนำเทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้กับการเติมออกซิเจนในบ่อน้ำ จะเห็นว่า พลังงานแสงอาทิตย์เปลี่ยนรูปมาเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนกังหันน้ำให้เพียงพอต่อการใช้งานได้ อีกทั้งช่วยให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำเพิ่มขึ้น โดยไม่มีต้นทุนพลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้า (กัลยา และคณะ, 2565) สรุปได้ว่า ระบบที่มีการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบไฟฟ้าพื้นฐาน สามารถลดภาระค่าไฟฟ้าของเกษตรกรได้ (อัครินทร์ และคณะ, 2019)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีโอทูบับเบิ้ลของระบบการเติมอากาศหมุนเวียนออกซิเจนในน้ำ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการลดต้นทุนพลังงานในกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่น โดยระบบที่จะพัฒนาขึ้นมีหลักการทำงาน คือ นำสายยางเติมอากาศโอทูบับเบิ้ลที่ดัดแปลงเป็นรูปวงกลมมี

เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 20 เซนติเมตร ต่อเข้ากับมอเตอร์ปั๊มลม ทำให้อากาศวิ่งผ่านรูพรุนเล็ก ๆ รอบสาย เกิดฟองอากาศที่ออกมาจากตัวสายยางจะละเอียดมีอนุภาคเล็ก และค่อยๆ ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ซึ่งฟองอากาศที่ละเอียดมีอนุภาคเล็กนั้น จะสามารถซอกซอนทำความสะอาดตามซอกสาหร่ายทำให้สิ่งปนเปื้อนหลุดออกมา ช่วยในการกระจายออกซิเจนในน้ำและทำให้อุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วถึงกัน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มพื้นที่การแลกเปลี่ยนออกซิเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้น ทำการเปรียบเทียบต้นทุนพลังงานในกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่น ระหว่างระบบที่ไม่ใช้พลังงานทางเลือกกับระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งการพัฒนาระบบดังกล่าว จะเป็นการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานให้กับเกษตรกร สร้างโอกาสทางการแข่งขัน สร้างนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่และลดความเหลื่อมล้ำ เกษตรกรสามารถนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยและเหมาะสมมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการเกษตรสมัยใหม่ได้ เน้นการพึ่งพาตนเอง อีกทั้งยังเป็นแนวทางการร่วมกันพัฒนาเป็นศูนย์การเรียนรู้ในชุมชนที่มีการใช้เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนในกิจกรรมทางการเกษตรเพื่อความยั่งยืนต่อไป

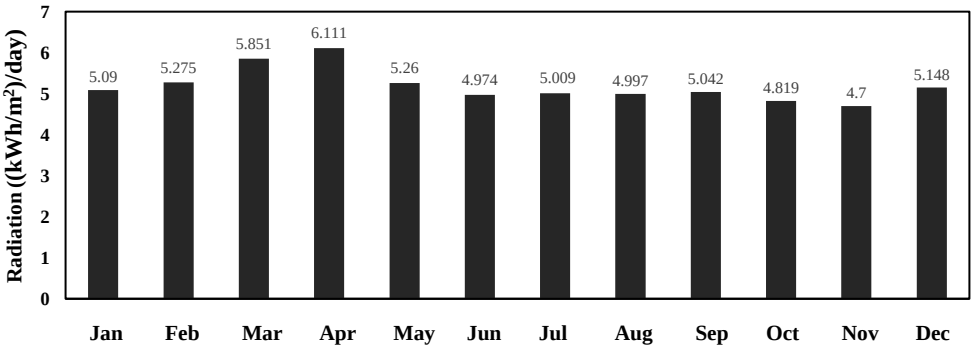
2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อนำเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีโอทูบับเบิ้ลของระบบการเติมอากาศหมุนเวียนออกซิเจนในน้ำ ใช้เป็นแนวทางสำหรับการลดต้นทุนพลังงานในกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่น

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ข้อมูลสำหรับการวิจัย

3.1.1 พื้นที่ที่ใช้สำหรับการวิจัย คือ พื้นที่การเพาะเลี้ยงสาหร่ายพวงองุ่น ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี พิกัดทางภูมิศาสตร์ 13 องศา 1.6 ลิปดาเหนือ และลองติจูด 100 องศา 4.7 ลิปดาตะวันออก อ้างอิงข้อมูลค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ของแต่ละเดือนในปี พ.ศ. 2565 มาจาก Solar Global Horizontal Irradiance (GHI) แสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งมีปริมาณรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ที่ 5.19 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ตารางเมตร/วัน



ภาพที่ 1 ข้อมูลปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นที่สำหรับการวิจัย

3.1.2 ภาระโหลดทางไฟฟ้า ที่ใช้ในกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่น จะมีอยู่ 2 ส่วน คือ 1) โหลดขนาด 1.5 kW (2 hp) ซึ่งเป็นโหลดมอเตอร์ single phase 1.5 kW/10.4 A/220 V/2 hp /50 Hz ใช้งานต่อเนื่องกัน 24 ชั่วโมง พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละวัน เท่ากับ 37 kWh/day และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละเดือน เท่ากับ 1,120 kWh/month และ 2) โหลดขนาด 1.1 kW (1.5 hp) ซึ่งเป็นโหลดมอเตอร์ single phase 1.1 kW/7.8 A/220 V/1.5 hp/50 Hz ใช้งานต่อเนื่องกัน 24 ชั่วโมง พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละวัน เท่ากับ 28 kWh/day และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละเดือน เท่ากับ 840 kWh/month ซึ่งโหลดทั้งสองส่วนดังกล่าวข้างต้นนี้ จะถูกสลับกันใช้งาน หมายความว่า โหลดแต่ละส่วนจะใช้งานต่อเนื่องกัน 24 ชั่วโมง และสลับกันทำงานวันเว้นวัน ยกตัวอย่างเช่น วันที่ 1 โหลดขนาด 1.5 kW ใช้งานต่อเนื่องกัน 24 ชั่วโมง, วันที่ 2 โหลดขนาด 1.1 kW ใช้งานต่อเนื่องกัน 24 ชั่วโมง

3.1.3 แผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในการทดลอง มีจำนวน 4 แผง รุ่น TSM-300PC14 กำลังไฟฟ้าสูงสุด 300 W แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 36.9 V กระแสไฟฟ้าสูงสุด 8.13 A แสดงข้อมูลจำเพาะ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลจำเพาะของแผงโซลาร์เซลล์

Model : TSM-300PC14	
Maximum Power (P_{max})	300W
Maximum Power Voltage (V_{mp})	36.9V
Maximum Power Current (I_{mp})	8.13A
Open Circuit Voltage (V_{oc})	45.3V
Short Circuit Current (I_{sc})	8.60A
Maximum System Voltage	DC1000V
Maximum Series Fuse	15A
Module Application	Class A

ที่มา: Changzhou Trina Solar Energy Co.,Ltd. (www.trinasolar.com)

3.1.4 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง Max. power 3.5 kW แสดงคุณลักษณะดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงคุณลักษณะของไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์

Efficiency	Maximum efficiency 98.50%
PV input	Recommended max. PV power 3,500 Wp/1 String Max. input voltage 420V Operating voltage range 80V - 420V Start-up voltage 80V Max. short-circuit current per string 10A
AC input	Voltage range 170V - 240V Frequency 50 Hz
AC output	Output: Single phase Rated output power 3,500 W Max. apparent power 4,000 VA Rated output voltage 220 V ±5% Rated AC grid frequency 50 Hz Max. output current 16 A

3.2 การสร้างเครื่องมือในการวิจัย

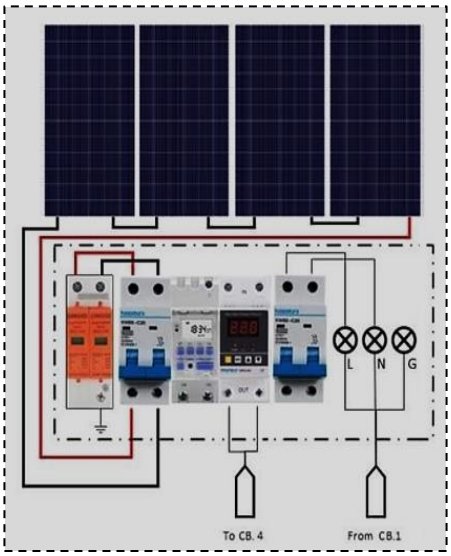
การพัฒนานวัตกรรมด้านพลังงานทดแทนสำหรับกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่น เพื่อช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายพลังงานของระบบการเติมอากาศหมุนเวียนออกซิเจนในน้ำ มีแนวคิดนำนวัตกรรมสายยางเติมอากาศโอทูบับเบิ้ล มาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งระบบที่พัฒนาขึ้นมีหลักการทำงาน คือ เมื่อนำสายยางเติมอากาศโอทูบับเบิ้ลต่อเข้ากับมอเตอร์ปั๊มลม ทำให้อากาศวิ่งผ่านรูพรุนเล็ก ๆ ฟองอากาศที่ออกมาจากตัวสายยางจะละเอียดมีอนุภาคเล็ก และค่อยๆ ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ แสดงดังภาพที่ 2 ซึ่งฟองอากาศที่ละเอียดมีอนุภาคเล็กนั้น จะสามารถซอกซอนทำความสะอาดตามซอกสาหร่ายทำให้สิ่งปนเปื้อนหลุดออกมา ช่วยในการกระจายออกซิเจนในน้ำและทำให้อุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วถึงกัน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มพื้นที่การแลกเปลี่ยนออกซิเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากภาพที่ 3 แสดงไดอะแกรมการทำงานของการต่อวงจรระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์ทางด้าน DC input และ AC output และภาพที่ 4 แสดงไดอะแกรมการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่น ควบคุมการจ่าย

พลังงานไฟฟ้าไปยังโหลดด้วยระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์ รองรับการใช้งานสำหรับแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า โดยไม่ต้องใช้แบตเตอรี่ต่อเข้าระบบ ในช่วงเวลากลางวัน ระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับระบบการเติมอากาศ หากกำลังผลิตไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด ระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ดึงกระแสไฟฟ้าจากโครงข่ายไฟฟ้ามา เพื่อให้พลังงานไฟฟ้ารวมที่ออกจากระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์เพียงพอที่จะทำให้ระบบการเติมอากาศหมุนเวียนออกซิเจนในน้ำ ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

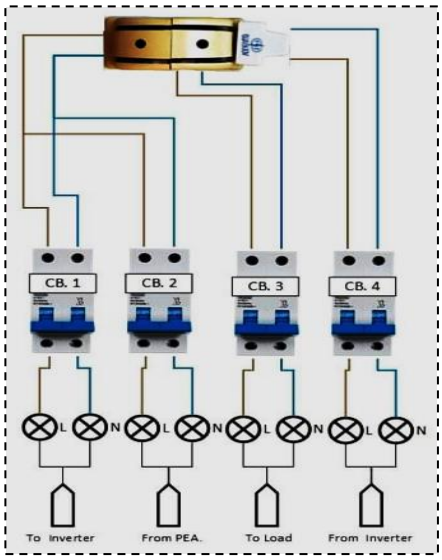
(ก) ลักษณะฟองอากาศ

(ข) สายยางเติมอากาศโอทูบับเบิ้ล

ภาพที่ 2 เทคโนโลยีการเติมอากาศแบบโอทูบับเบิ้ลในกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่น

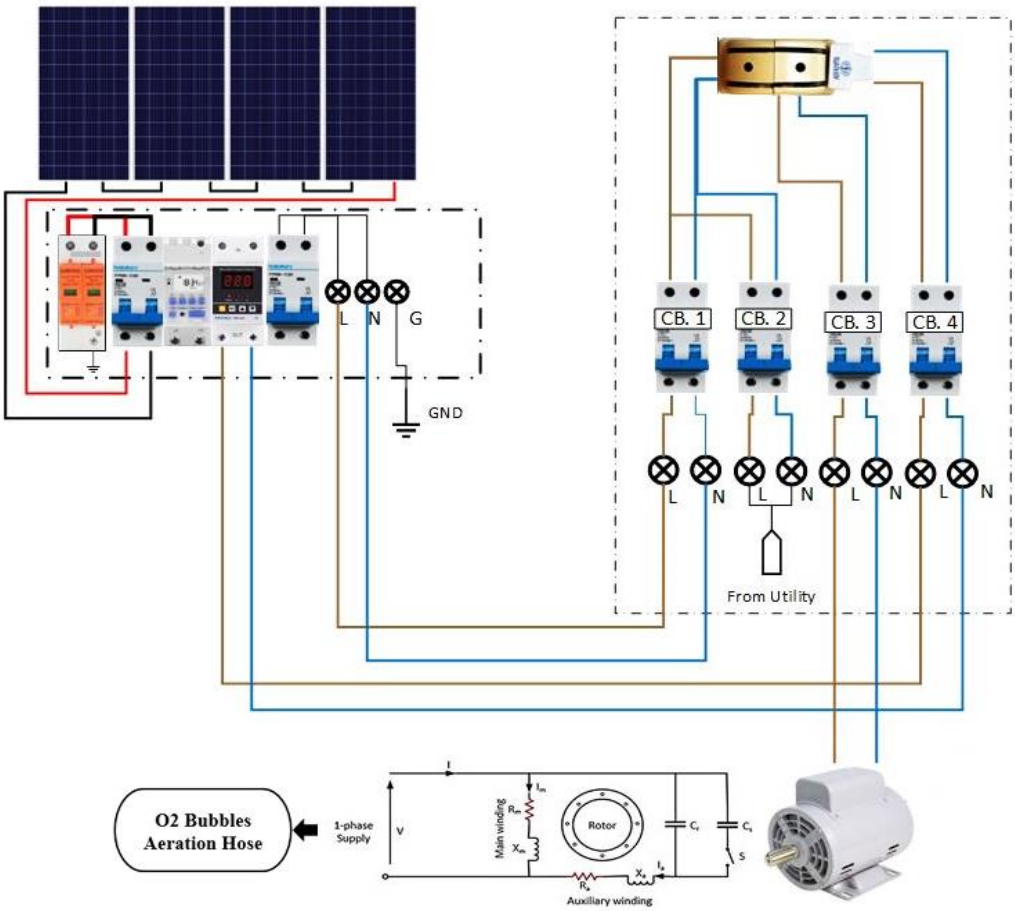


(ก) ด้าน DC input



(ข) ด้าน AC uutput

ภาพที่ 3 ไดอะแกรมการต่อวงจรระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 4 ไดอะแกรมการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์
สำหรับกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่น

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ไปวิเคราะห์ค่าพลังงานไฟฟ้า ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าจากโครงข่ายไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าจากระบบโซลาร์เซลล์ อีกทั้งมีการประมาณการค่าไฟฟ้าของแต่ละเดือน ประกอบไปด้วย ค่าไฟฟ้าฐาน ค่าไฟฟ้าผันแปร และค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม ดังสมการต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 ค่าไฟฟ้าฐาน เป็นค่าการใช้ไฟฟ้า ซึ่งจะคิดจากต้นทุนในการผลิตไฟฟ้า โดยวิธีการคำนวณก็จะแบ่งตามประเภทผู้ใช้งาน คิดค่าบริการเท่ากับ 38.22 Baht ซึ่งสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้จากสมการที่ (1) และ (2)

ค่าพลังงานไฟฟ้า = จำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ x อัตราค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (1)

ค่าไฟฟ้าฐาน = ค่าพลังงานไฟฟ้า + ค่าบริการ (2)

ส่วนที่ 2 ค่าไฟฟ้าผันแปร หรือค่า Ft เป็นค่าไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนเพิ่มขึ้นหรือลดลง ตามการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงและค่าซื้อไฟฟ้า ที่อยู่นอกเหนือการควบคุมของการไฟฟ้า ซึ่งสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้จากสมการที่ (3)

$$\text{ค่าไฟฟ้าผันแปร} = \text{จำนวนพลังงานไฟฟ้า} \times \text{ค่า Ft} \quad (3)$$

ส่วนที่ 3 ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม นอกจากค่าไฟฟ้าฐาน และค่า Ft แล้ว ผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องชำระภาษีมูลค่าเพิ่ม (Vat 7%) รวมกับค่าไฟฟ้าฐาน และค่า Ft ด้วย ซึ่งสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้จากสมการที่ (4) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้จากสมการที่ (4)

$$\text{ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม} = (\text{ค่าไฟฟ้าฐาน} + \text{ค่า Ft}) \times 0.07 \quad (4)$$

ดังนั้น เงินค่าไฟฟ้าทั้งหมด มาจากผลรวมของค่าไฟฟ้าฐาน จากสมการที่ (1) ค่าไฟฟ้าผันแปร จากสมการที่ (3) และค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม จากสมการที่ (4) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้จากสมการที่ (5)

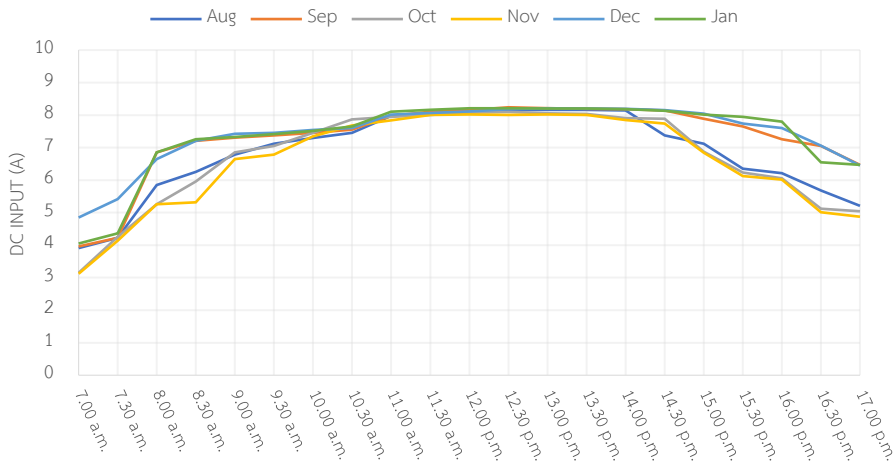
$$\text{เงินค่าไฟฟ้าทั้งหมด} = \text{ค่าไฟฟ้าฐาน} + \text{ค่าไฟฟ้าผันแปร} + \text{ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม} \quad (5)$$

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การศึกษาแนวทางการลดต้นทุนพลังงานของระบบการเติมอากาศหมุนเวียนออกซิเจนในน้ำในกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่น มีผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

4.1 ทดสอบการประจุพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์

จากภาพที่ 5 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตหรือกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์ตั้งแต่เวลา 7.00 น. ถึง 17.00 น. เก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2565 จนถึงเดือนมกราคม 2566 พบว่า เดือนสิงหาคม มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 8.16 A เดือนกันยายน มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 8.24 A เดือนตุลาคม มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 8.10 A เดือนพฤศจิกายน มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 8.02 A เดือนธันวาคม มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 8.21 A และเดือนมกราคม มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 8.21 A เช่นกัน

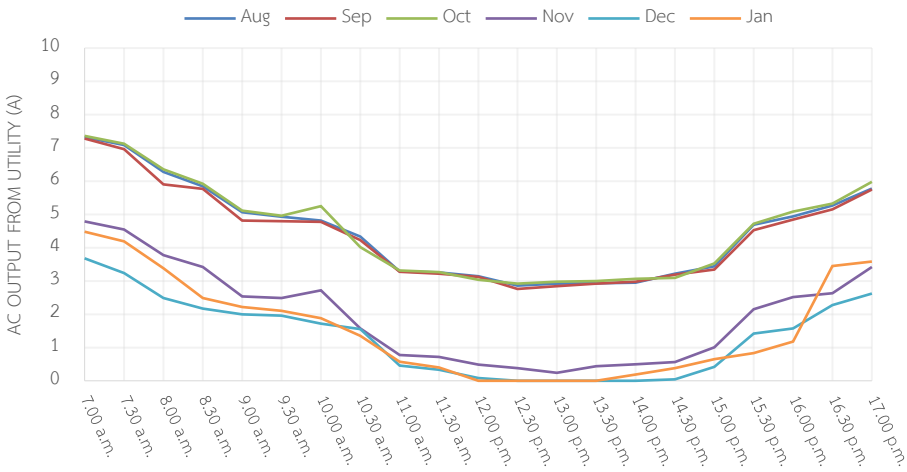


ภาพที่ 5 ค่ากระแสไฟฟ้าทางด้าน DC input

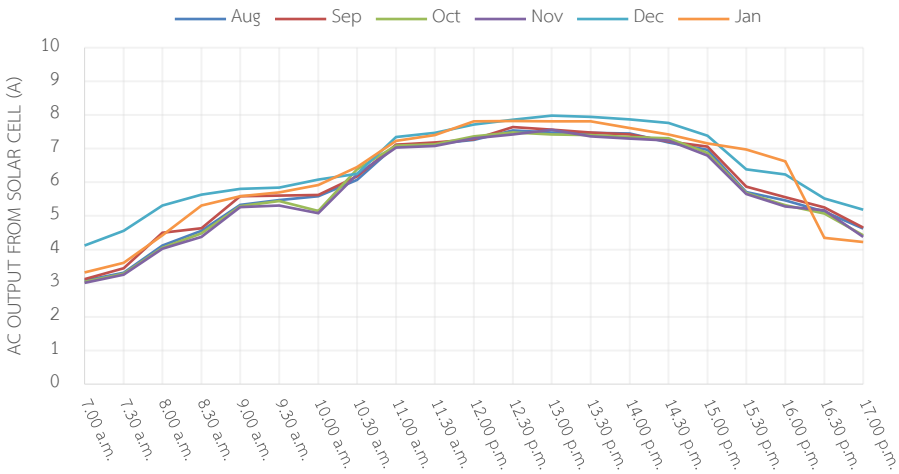
4.2 ทดสอบการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าของระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์

ค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต บันทึกข้อมูลจากระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ตั้งแต่เวลา 7.00 a.m. - 17.00 p.m. การเก็บข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา คือ 1) กรณีทดสอบกับโหลดขนาด 1.5 kW (2 hp) เก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2565 ถึงตุลาคม 2565 และ 2) กรณีทดสอบกับโหลดขนาด 1.1 kW (1.5 hp) เก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2565 ถึงมกราคม 2566 จากภาพที่ 6 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตจากโครงข่ายไฟฟ้า พบว่า กรณีทดสอบกับโหลดขนาด 1.5 kW (2 hp) พบว่า ช่วงเวลาที่โหลดกินกระแสจากโครงข่ายไฟฟ้ามากที่สุด คือ เวลา 7.00 a.m. - 7.30 a.m. และช่วงเวลาที่โหลดกินกระแสจากโครงข่ายไฟฟ้าน้อยที่สุด คือ เวลา 12.30 p.m. - 13.00 p.m. และกรณีทดสอบกับโหลดขนาด 1.1 kW (1.5 hp) พบว่า ช่วงเวลาที่โหลดกินกระแสจากโครงข่ายไฟฟ้ามากที่สุด คือ เวลา 7.00 a.m. - 7.30 a.m. และช่วงเวลาที่โหลดกินกระแสจากโครงข่ายไฟฟ้าน้อยที่สุด คือ เวลา 12.00 p.m. - 14.00 p.m.

ในทางตรงกันข้าม จากภาพที่ 7 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตจากแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีทดสอบกับโหลดขนาด 1.5 kW (2 hp) พบว่า ช่วงเวลาที่โหลดกินกระแสจากแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์มากที่สุด คือ เวลา 12.00 p.m. - 14.00 p.m. และช่วงเวลาที่โหลดกินกระแสจากแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์น้อยที่สุด คือ เวลา 7.00 a.m. – 7.30 a.m. และกรณีทดสอบกับโหลดขนาด 1.1 kW (1.5 hp) พบว่า ช่วงเวลาที่โหลดกินกระแสจากแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์มากที่สุด คือ เวลา 12.00 p.m. - 14.00 p.m. และช่วงเวลาที่โหลดกินกระแสจากแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์น้อยที่สุด คือ เวลา 7.00 a.m. – 7.30 a.m.

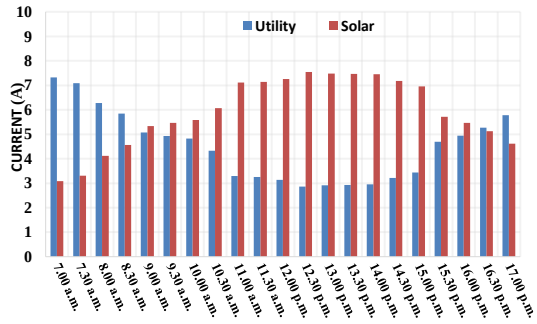


ภาพที่ 6 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตจากโครงข่ายไฟฟ้า

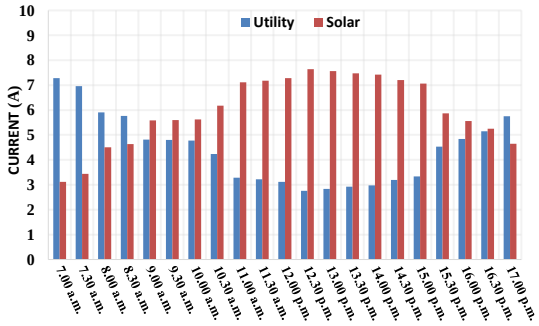


ภาพที่ 7 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตจากแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์

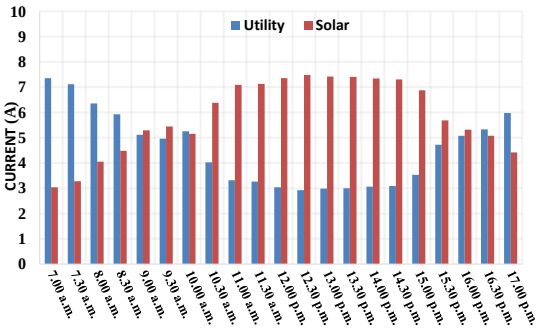
หากเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างที่ได้จากโครงข่ายไฟฟ้ากับแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์ของเดือนสิงหาคม 2565 จนถึงเดือนมกราคม 2566 ดังภาพที่ 8 จะเห็นว่า ถ้าสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์ได้มาก จะทำให้โหลดดึงพลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้ามาใช้น้อย ส่งผลให้เกิดการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน นั่นเอง



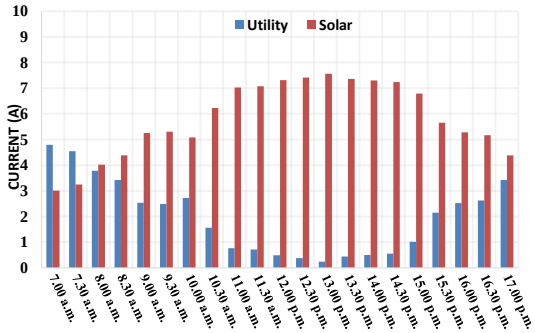
(ก) เดือนสิงหาคม



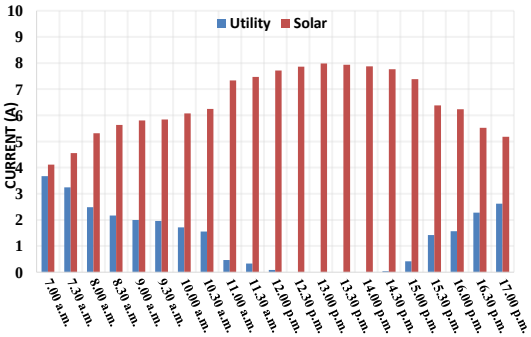
(ข) เดือนกันยายน



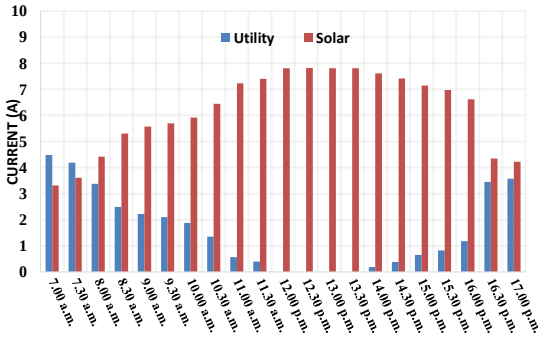
(ค) เดือนตุลาคม



(ง) เดือนพฤศจิกายน



(จ) เดือนธันวาคม



(ฉ) เดือนมกราคม

ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากโครงข่ายไฟฟ้ากับแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์

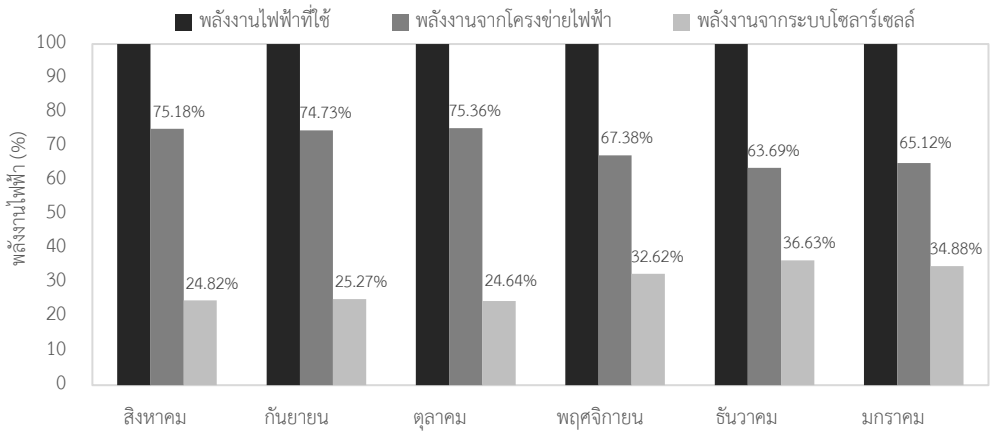
4.3 ทดสอบการวัดปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์

การทดสอบการวัดปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์ จากตารางที่ 3 พบว่า เดือนสิงหาคม สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 278 kWh คิดเป็น 24.82% ของพลังงานที่ใช้, เดือนกันยายน สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 283 kWh คิดเป็น 25.27% ของพลังงานที่ใช้, เดือนตุลาคม สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 276 kWh คิดเป็น 24.64% ของพลังงานที่ใช้, เดือนพฤศจิกายน สามารถผลิตพลังงาน ไฟฟ้าได้เท่ากับ 274 kWh คิดเป็น 32.62% ของพลังงาน

ที่ใช้, เดือนธันวาคม สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า ได้เท่ากับ 305 kWh คิดเป็น 36.31% ของพลังงานที่ใช้ และเดือนมกราคม สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 293 kWh คิดเป็น 34.88% ของพลังงานที่ใช้ แสดงดังภาพที่ 9

ตารางที่ 3 ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละเดือน

พลังงานไฟฟ้า (kWh)	**โหลดขนาด 1.5 kW (2 hp)**			**โหลดขนาด 1.1 kW (1.5 hp)**		
	สิงหาคม	**กันยายน**	**ตุลาคม**	**พฤศจิกายน**	**ธันวาคม**	**มกราคม**
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	1,120 (100%)	1,120 (100%)	1,120 (100%)	840 (100%)	840 (100%)	840 (100%)
พลังงานไฟฟ้าจากโครงข่ายไฟฟ้า	842 (75.18%)	837 (74.73%)	844 (75.36%)	566 (67.38%)	535 (63.69%)	547 (65.12%)
พลังงานไฟฟ้าจากระบบโซลาร์เซลล์	278 (24.82%)	283 (25.27%)	276 (24.64%)	274 (32.62%)	305 (36.31%)	293 (34.88%)



ภาพที่ 9 เปอร์เซ็นต์การเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยของแต่ละเดือน

4.4 วิเคราะห์ต้นทุนพลังงานไฟฟ้า

จากการเปรียบเทียบต้นทุนการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบการเติมอากาศ หลังการติดตั้งระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์ กรณีใช้กับโหลดขนาด 1.5 kW (2 hp) จากตารางที่ 4 พบว่า เดือนสิงหาคม ประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ 25.70% คิดเป็นเงิน 1,385.96 Baht เดือนกันยายน ประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ 26.08% คิดเป็นเงิน 1,621.85 Baht และเดือนตุลาคม ประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ 25.44% คิดเป็นเงิน 1,581.74 Baht ส่วนกรณีใช้กับโหลดขนาด 1.1 kW (1.5 hp) พบว่า เดือนพฤศจิกายน ประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้

34.04% คิดเป็นเงิน 1,570.28 Baht เดือนธันวาคม ประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ 37.89% คิดเป็นเงิน 1,747.93 Baht และเดือนมกราคม ประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ 36.40% คิดเป็นเงิน 1,679.16 Baht

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบต้นทุนการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบการเติมอากาศ

ประมาณการค่าไฟฟ้า (Baht)	โหลดขนาด 1.5 kW (2 hp)			โหลดขนาด 1.1 kW (1.5 hp)		
	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม
ค่าไฟฟ้าก่อนการติดตั้งระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์	5,394.91 (100%)	6,217.74 (100%)	6,217.74 (100%)	4,613.08 (100%)	4,613.08 (100%)	4,613.08 (100%)
ค่าไฟฟ้าหลังการติดตั้งระบบไฮบริดโซลาร์อินเวอร์เตอร์	4,005.95 (74.30%)	4,595.89 (73.92%)	4,636.00 (74.56%)	3,042.80 (65.96%)	2,865.15 (62.11%)	2,933.92 (63.60%)
ส่วนต่างค่าไฟฟ้าก่อนและหลัง การติดตั้งระบบ	1,385.96 (25.70%)	1,621.85 (26.08%)	1,581.74 (25.44%)	1,570.28 (34.04%)	1,747.93 (37.89%)	1,679.16 (36.40%)
ประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน (%)	25.70%	26.08%	25.44%	34.04%	37.89%	36.40%
ค่าเฉลี่ย	**25.74%**			**36.11%**		

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีโอทูบับเบิ้ลของระบบการเติมอากาศหมุนเวียนออกซิเจนในน้ำ ใช้เป็นแนวทางสำหรับการลดต้นทุนพลังงานในกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่น จากผลเปรียบเทียบการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของระบบการเติมอากาศในกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่น กรณีใช้กับโหลดขนาด 1.5 kW (2 hp) สรุปได้ว่า เกิดการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน เฉลี่ยเท่ากับ 25.74% และกรณีใช้กับโหลดขนาด 1.1 kW (1.5 hp) เกิดการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเฉลี่ยเท่ากับ 36.11% ดังนั้น หากต้องการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานให้มากกว่าค่าเฉลี่ยข้างต้น สามารถติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์เพิ่มเข้าไปในระบบได้ แต่จำนวนแผงที่นำมาต่ออนุกรมกันแล้วต้องมีค่าแรงดันอินพุตไม่เกิน 420 VDC ทั้งนี้การติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมและเป็นไปตามมาตรฐานการติดตั้ง จึงจะทำให้การบริหารจัดการต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเกิดการประหยัดและคุ้มค่ามากที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) งบประมาณกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปี พ.ศ. 2565 ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง การพัฒนานวัตกรรมต้นแบบด้านพลังงานทดแทนสำหรับกระบวนการคัดแยกสาหร่ายพวงองุ่นเพื่อจัดจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

7. เอกสารอ้างอิง

กัลยา ธนาสินธ์, อมรรัตน์ คำบุญ, ณัฐดนัย สิงห์คลีวรรณ, และสายัณ พุทธลา. (2565). กังหันน้ำเติมออกซิเจนพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับบ่อน้ำ. **วารสารวิชาการเทพสตรี I-TECH**, 17(2), 95-105.

ชัยยงค์ เสริมผล, จิระเดช สังคะโห, และพลวัฒน์ ศรีโยหะ. (2563). การพัฒนากังหันน้ำเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมผ่านสัญญาณไร้สาย. **วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 14(2), 173-189.

ธวัชชัย ทองเหลี่ยม, วิโรจน์ บัวงาม, หฤทัย ดิ้นสกุล และบรรเจิด เจริญพันธ์. (2556, ธันวาคม). **สร้างระบบขับกังหันน้ำชัยพัฒนาโดยใช้พลังงานแบบผสมผสานและการตรวจวัดออกซิเจนในน้ำ**. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36 (EECON-36), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธวัชชัย สอนสนาม, ประสิทธิ์ ภูสมมา, ประยุทธ นิสภกุล และชาลี อินทรชัย. (2022). เครื่องเติมอากาศในน้ำชนิดกังหันพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์. **Journal of Science Engineering and Technology Rajabhat Maha Sarakham University**, 1(3), 57-66.

พัชรินทร์ อินทมาส, อดิศร ไกรนรา, ทิฆัมพร เขมวงศ์ และพรหมพักตร์ บุญรักษา. (2022). การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศในน้ำด้วยกังหันพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมผ่านโทรศัพท์มือถือ. **Rattanakosin Journal of Science and Technology: RJST 2022**, 4(1), 43-53.

มนทกานติ ท้ามติ้น. (ม.ป.ป.). **การเลี้ยงสาหร่ายพวงองุ่นเชิงพาณิชย์**. เอกสารนำเสนอในนิทรรศการ. ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งเพชรบุรี กรมประมง.

ภารดร ทองเสน และยอดชาย เตียเปิ้น. (2020). เครื่องเติมอากาศใบพัดพลังงานแสงอาทิตย์. **Journal of Science and Technology**, 3(1), 35-44.

ศิริวรรณ ทำนุ, ชวโรจน์ ใจสิน, ธงชัย มณีชูเกตุ และนรินทร์ ปิ่นแก้ว. (2561, เมษายน). **การพัฒนาระบบควบคุมเครื่องเติมอากาศแบบอัตโนมัติในบ่อเลี้ยงปลานิล**. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19, ประจวบคีรีขันธ์.

อัครินทร์ อินทนิเวศน์, สุลักษณา มงคล, และสราวุธ พลวงษ์ศรี. (2019). การศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับระบบเติมอากาศของบ่อเลี้ยงปลา กรณีศึกษา: หมู่บ้านทุ่งยาว. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**, 26(3), 25-35.

การออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์ จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด

MULTIPURPOSE FURNITURE DESIGN FROM LEFTOVER CAR PARTS FOR RESIDENTIAL AREAS, LIMITED SPACE

ณัฐธิดา จงรักษ์*, จักรพันธ์ จันทร์ไพโรจน์, ทัตพงศ์ คาดสันเทียะ
Nattida Jongrak, Jadkapan Chanpairod, Thatphong Khansanthia
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000
Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000
*Corresponding author e-mail: nattida.j@psru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 6 ธันวาคม 2566
วันที่แก้ไขบทความ 27 กุมภาพันธ์ 2567
วันที่ตอบรับบทความ 13 มีนาคม 2567

บทคัดย่อ

การออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด มีวัตถุประสงค์คือ 1) เพื่อออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด และ 2) เพื่อประเมินความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมายสำหรับการออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด เป็นแนวทางในการออกแบบเฟอร์นิเจอร์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้และตอบสนองให้ผู้ใช้มีสะดวกสบาย ประหยัดพื้นที่การใช้งานมากขึ้น ก่อนการออกแบบผู้วิจัยได้สอบถามกลุ่มเป้าหมายเพื่อให้ทราบถึงความต้องการการใช้งานของเฟอร์นิเจอร์ในพื้นที่จำกัด ซึ่ง 5 ลำดับแรกที่กลุ่มเป้าหมายต้องการให้เฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์มีการใช้งานประกอบด้วย โต๊ะทำงาน ชั้นวางของ โต๊ะเครื่องแป้ง โต๊ะทานข้าว และโต๊ะรีดผ้า จากนั้นจึงทำการออกแบบร่างผลิตภัณฑ์โดยมีแนวความคิดในการออกแบบมาจากรถแคมเปอร์แวน (Campervan) 3 รูปแบบคือ แบบ A รถฟิบวีลเทรลเลอร์ (Fifth – wheel trailer) แบบ B รถเทียร์ดรอปเทรลเลอร์ (Teardrop trailer) และแบบ C รถคลาสซีมอเตอร์โฮม (Class C motorhome) นำไปให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่านประเมินเพื่อคัดเลือกรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ผลการประเมินด้านการออกแบบมีความคิดเห็นตรงกันคือ รูปแบบ A ซึ่งมีค่าเฉลี่ยสุงที่สุด คือ $\bar{x}$ = 2.86 ค่า S.D. 0.57 ผู้วิจัยได้นำรูปแบบผลิตภัณฑ์ A ไปผลิตจริงเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบ จากนั้นจึงนำไปประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคโดยใช้แบบสอบถามแบบเจาะจง พบว่า ด้านหน้าที่ประโยชน์ใช้สอย ด้านความสวยงาม ด้านความแข็งแรง และด้านวัสดุ มีค่าเฉลี่ยเท่ากันคือ อยู่ที่ระดับมาก สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลการประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคและผู้เกี่ยวข้องการออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด อยู่ในระดับมาก

คำสำคัญ: เฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์, อะไหล่รถยนต์, ที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด

Abstract

The objectives of this study are to: 1) design multipurpose furniture from leftover car parts for residences with limited space; 2) evaluate the satisfaction of the target group for the mentioned design and use it as a guideline for designing furniture from waste car parts and providing users with comfort and more space preserved for work. Before designing, the researchers first inquired about the target group's needs for furniture in a limited space. The first five multipurpose pieces of furniture that the target group requested included tableaus, shelves, dressing tables, dining tables, and ironing boards. Next, the researchers designed product sketches with the concept of three types of campervans: type A: a fifth-wheel trailer; type B: a compact car teardrop trailer; and type C: a class C motorhome. The results of the design assessed by experts were of the same opinion and revealed that type A had the highest mean, $\bar{x}$ = 2.86, S.D. 0.57. The researcher then took type A to build the prototype product and assessed consumer satisfaction using a purposive questionnaire. The results found that the mean values of function, usability, beauty, strength, and materials were equivalent at a high level. The summarized analysis results of the satisfaction assessment of consumers and those involved in the design of multipurpose furniture from leftover car parts for residences with limited spaces were at a high level.

Keywords: Multipurpose furniture, Spare auto parts, Limited space housing

1. บทนำ

จากข้อมูลการศึกษา พบว่าในไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมาจำนวนผู้คนที่ย้ายจากชนบทมาอาศัยอยู่ในเมืองได้มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นและมีแนวโน้มว่าในอีก 30 ปีข้างหน้าจะมีประชากรที่ย้ายเข้าอยู่ในเมืองมากขึ้นถึงร้อยละ 68 แม้ว่าเมืองจะถูกบีบให้ขยายตัวด้วยจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น แต่หลายเมืองทั่วโลกก็อาจไม่ได้มีพื้นที่เพียงพอสำหรับประชากรทุกคนด้วยพื้นที่ที่มีอยู่จำกัดและประชากรที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้การขยายตัวแนวราบเป็นไปได้ยาก จากผลกระทบของสภาพแวดล้อมไม่ว่าจะเป็นภาวะโลกร้อนและการที่ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น ตลอดจนปัจจัยเชิงเศรษฐกิจอย่างเรื่องราคาที่ดินที่พุ่งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การขยายตัวแนวตั้ง (Vertical living) จึงเป็นกลายเป็นทางออกสำหรับการอยู่อาศัยในปัจจุบันและอนาคต ความต้องการเฟอร์นิเจอร์ที่จำเป็นยังคงมีอยู่แต่อาจจะเปลี่ยนแปลงรูปแบบไป

เช่น เฟอร์นิเจอร์ชนิดที่ถอดประกอบได้ (Knock down) ซึ่งเฟอร์นิเจอร์หรือเครื่องเรือน คือสิ่งที่มนุษย์คิดค้นประดิษฐ์ขึ้น เพื่ออำนวยความสะดวกสำหรับกิจกรรมต่างๆ ภายในบ้าน ที่ทำงาน หรือที่สาธารณะ กิจกรรมดังกล่าว ประกอบด้วย การนอน การนั่ง รับประทานอาหาร ทำงาน ฯลฯ เครื่องเรือนถูกออกแบบสำหรับคนเดียวหรือกลุ่มคน ทำด้วยวัสดุ หลายชนิดแตกต่างกัน เช่น ไม้ โลหะ พลาสติก ฯลฯ เครื่องเรือนจัดว่าเป็นส่วนเชื่อมระหว่างผู้อยู่อาศัยกับตัวบ้าน หรือมนุษย์กับสถาปัตยกรรม (วัฒนะ, 2537) วัสดุอะไหล่รถยนต์ที่เหลือใช้นับเป็นปัญหาขยะอย่างหนึ่งที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุอะไหล่เหลือใช้หมายถึง ชิ้นส่วนที่ไม่ได้ใช้งาน เสื่อมสภาพหรือชิ้นส่วนต่างๆ ที่ถูกเปลี่ยนออก ไม่เป็นที่ต้องการซึ่งถูกทิ้งออกไปสู่สถานที่ทิ้งขยะสาธารณะโดยผ่านการคัดแยกและการจัดการอย่างถูกวิธี ชิ้นส่วนรถยนต์ดังกล่าวประกอบด้วยวัสดุหลายชนิดทั้งที่เป็นโลหะและไม่เป็นโลหะ เช่น โลหะเหล็ก โซ่ เพลา เป็นต้น

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำอะไหล่รถยนต์เหลือใช้นำมาประยุกต์ออกแบบเป็นผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด สร้างความน่าสนใจตอบสนองความต้องการของกลุ่มเป้าหมาย รวมถึงช่วยลดปัญหาขยะ อีกทั้งยังเป็นแนวทางให้แก่ผู้ที่สนใจการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่คล้ายคลึงกัน

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด

2.2 เพื่อประเมินความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมายสำหรับการออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด

3. วิธีดำเนินการวิจัย

เพื่อให้การศึกษาวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยมีวิธีดำเนินการศึกษาวิจัยดังนี้

3.1 ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบผลิตภัณฑ์ โดยกำหนดแนวความคิดในการออกแบบจากการรูปแบบของรถแคมเปอร์แวน (Campervan) มีรายละเอียดขั้นตอนดังนี้

(1) ศึกษาค้นคว้าจากตำรา เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบ

(2) เก็บข้อมูลก่อนการออกแบบด้านการใช้งาน

(3) ทำการออกแบบภาพร่างผลิตภัณฑ์ตามพื้นฐานข้อมูลที่ได้ศึกษาจำนวน 3 รูปแบบ

(4) นำแบบผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบจำนวน 3 รูปแบบ สอบถามผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ 5 ท่าน ตามกรอบแนวคิดของการวิจัยของ อุดมศักดิ์ (2550) คือ ด้านประโยชน์ใช้สอย ด้านความสวยงาม ด้านความแข็งแรง และด้านวัสดุ

(5) สรุปแบบจากผู้เชี่ยวชาญ นำแบบไปปรับปรุงและพัฒนา เพื่อทำการผลิตรูปแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด

3.2 ขั้นตอนที่ 2 การประเมินความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมายสำหรับการออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้นำผลิตภัณฑ์ไปสอบถามกลุ่มเป้าหมายจำนวน 50 คน ตามกรอบแนวคิดของการวิจัย จากนั้นจึงสรุปข้อมูลที่ได้มาจากการตอบแบบสอบถามประกอบภาพถ่ายมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

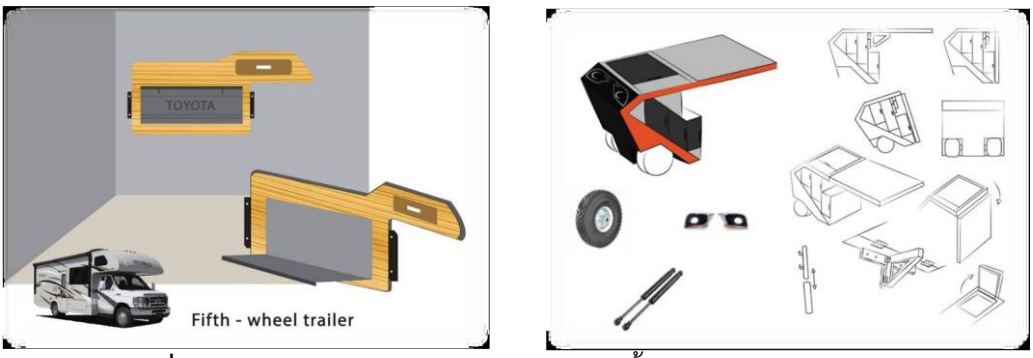
4. ผลการวิจัย

4.1 การวิจัยในขั้นตอนที่ 1 ได้ผลการวิจัยดังนี้

(1) การเก็บข้อมูลก่อนการออกแบบ ผู้วิจัยได้ทำการสอบถามกลุ่มเป้าหมายจำนวน 50 ท่าน ซึ่งเป็นผู้ที่อยู่อาศัยในพื้นที่จำกัด เช่น หอหัก อพาร์ทเม้นท์ เพื่อสอบถามด้านความต้องการใช้งานผลิตภัณฑ์จากจำนวนทั้งหมด 8 การใช้งานคือ ชั้นวางของ โต๊ะทานข้าว โต๊ะทำงาน โต๊ะรีดผ้า โต๊ะเครื่องแป้ง ตู้เสื้อผ้า โต๊ะนั่งเล่น และซิงค์ล้างจาน สรุปความต้องการมากที่สุด 5 ลำดับแรกคือ โต๊ะทำงาน ชั้นวางของ โต๊ะเครื่องแป้ง โต๊ะทานข้าว และโต๊ะรีดผ้า ผู้วิจัยจึงได้นำไปออกแบบในขั้นตอนต่อไป

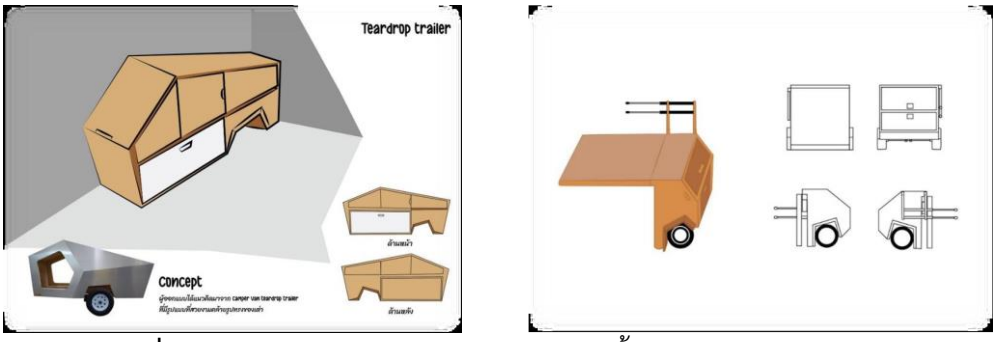
(2) การออกแบบร่างผลิตภัณฑ์ ผู้วิจัยได้แรงบันดาลใจในการออกแบบมาจากรูปทรงของรถแคมเปอร์แวน (Campervan) เป็นรถที่ดัดแปลงมาจากรถตู้แวน มีการปรับยกหลังคาให้สูง เป็นรถที่มีสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ทั้งเตียงนอน ห้องน้ำ ห้องครัว ห้องทานข้าว สามารถขับไปไหนมาไหนได้สะดวก โดยแบ่งเป็น 3 รูปแบบคือ แบบ A รถฟิบวีลเทรลเลอร์ (Fifth – wheel trailer) แบบ B รถเทียร์ดรอปเทรลเลอร์ (Teardrop trailer) และแบบ C รถคลาสซีมอเตอร์โฮม (Class C motorhome) ใช้เทคนิคการลดทอนรายละเอียดในการออกแบบมีรายละเอียดดังนี้

(2.1) แบบร่างผลิตภัณฑ์รูปแบบ A มีแนวความคิดมาจากรถฟิบวีลเทรลเลอร์ (Fifth – wheel trailer) ที่มีลักษณะเด่นคือ พื้นที่กว้าง



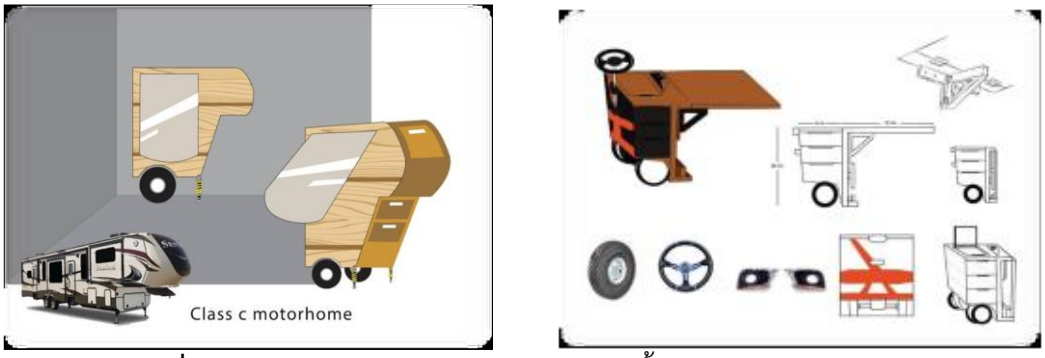
ภาพที่ 1 แบบร่างผลิตภัณฑ์รูปแบบ A แบบร่างขั้นต้น และการพัฒนาแบบ

(2.2) แบบร่างผลิตภัณฑ์รูปแบบ B มีแนวความคิดมาจากรถเทียร์ดรอปเทรลเลอร์ (Teardrop trailer) ที่มีลักษณะรูปทรงหยดน้ำและทันสมัย



ภาพที่ 2 แบบร่างผลิตภัณฑ์รูปแบบ B แบบร่างขั้นต้น และการพัฒนาแบบ

(2.3) แบบร่างผลิตภัณฑ์รูปแบบ C มีแนวความคิดมาจากรถคลาสซีมอเตอร์โฮม (Class C motorhome) ที่มีลักษณะความยาวและสูง



ภาพที่ 3 แบบร่างผลิตภัณฑ์รูปแบบ C แบบร่างขั้นต้น และการพัฒนาแบบ

(3) การสอบถามผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ ผู้วิจัยได้นำแบบร่างจำนวน 3 รูปแบบ สอบถามผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ 5 ท่าน เพื่อประเมินว่ารูปแบบใดมีความเหมาะสมกับการนำไปผลิต พบว่ารูปแบบ A มีค่าเฉลี่ยมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด คือ $\bar{x}$ = 2.86 ค่า SD= 0.57 อยู่ในระดับมาก สมควรที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์จริง มีรายละเอียดดังนี้

(3.1) ด้านประโยชน์การใช้สอย รูปแบบ A มีค่าเฉลี่ยที่ 3.3 อยู่ในระดับ ปานกลาง รูปแบบ B ค่าเฉลี่ยที่ 3.2 อยู่ในระดับ ปานกลาง รูปแบบ C ค่าเฉลี่ยที่ 3.5) อยู่ในระดับ มาก

(3.2) ความสวยงาม รูปแบบ A มีค่าเฉลี่ยที่ 3.6 อยู่ในระดับ ปานกลาง รูปแบบ B มีค่าเฉลี่ยที่ 3.6 อยู่ในระดับ ปานกลาง รูปแบบ C มีค่าเฉลี่ยที่ 3.0 อยู่ในระดับ ปานกลาง

(3.3) ด้านความแข็งแรง รูปแบบ A มีค่าเฉลี่ยที่ 3.83 อยู่ในระดับ มาก รูปแบบ B มีค่าเฉลี่ยที่ 3.73 อยู่ในระดับ มาก รูปแบบ C มีค่าเฉลี่ยที่ 3.4 อยู่ในระดับ อยู่ในระดับ ปานกลาง

(3.4) ด้านวัสดุ รูปแบบ A มีค่าเฉลี่ยที่ 2.86 อยุ่ในระดับ ปานกลาง รูปแบบ B มีค่าเฉลี่ยที่ 2.76 อยู่ในระดับ ปานกลาง รูปแบบ C มีค่าเฉลี่ยที่ 2.66 อยู่ในระดับ ปานกลาง

ภาพที่ 4 ผลิตภัณฑ์รูปแบบ A เมื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์จริง

ภาพที่ 5 ผลิตภัณฑ์รูปแบบ A เมื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์จริง

4.2 การวิจัยในขั้นตอนที่ 2 มีผลการวิจัยดังนี้

ผู้วิจัยได้ทำการผลิตต้นแบบผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด นำไปสอบถามกลุ่มเป้าหมายจำนวน 50 คน เพื่อวิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้บริโภคที่สนใจผลิตภัณฑ์ ได้ผลสรุปดังนี้

(1) ด้านประโยชน์ใช้สอย มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก คือ สามารถตอบสนองความต้องการของกลุ่มเป้าหมายมีค่าเฉลี่ยคือ 4.6 เหมาะสมกับการใช้งานภายในบ้านและมีการใช้งานที่หลากหลายมีค่าเฉลี่ยคือ 4.4 และขนาดมีความเหมาะสมกับการใช้งานมีค่าเฉลี่ยคือ 4.5

(2) ด้านความสวยงาม มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก คือ มีความสวยงามแปลกใหม่สะดุดตามีค่าเฉลี่ย 4.7 รูปแบบโดยรวมมีความน่าสนใจแก่ผู้พบเห็นมีค่าเฉลี่ย 4.6 และมีสีสันสวยงามเหมาะสมมีค่าเฉลี่ย 4.3

(3) ด้านความแข็งแรง มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก คือ โครงสร้างมีความแข็งแรงต่อการใช้งานของผู้บริโภคมีค่าเฉลี่ย 4.8 วัสดุที่ใช้มีความคงทนและแข็งแรงต่อการใช้งานของผู้บริโภคมีค่าเฉลี่ย 4.5 และผลิตภัณฑ์สามารถรับน้ำหนักได้ดีขณะที่มีการใช้งานมีค่าเฉลี่ย 4.2

(4) ด้านวัสดุ มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก คือ อะไหล่รถยนต์นำมาใช้มีความเหมาะสมมีค่าเฉลี่ยคือ 4.5 มีการนำวัสดุชิ้นส่วนที่เหลือใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดมีค่าเฉลี่ย 4.5 และวัสดุที่ใช้มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานมีค่าเฉลี่ยคือ 4.3

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด มีวัตถุประสงค์คือ 1) เพื่อออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด และ 2) เพื่อประเมินความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมายสำหรับการออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ และสำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัดให้ผู้ใช้ได้มีความสบาย และประหยัดพื้นที่มากขึ้น จากการทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์นั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะเฉพาะอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ที่จะนำมาใช้ให้เหมาะสมและต้องคำนึงถึงประโยชน์ผู้ใช้สอยพื้นที่จำกัดนั้นเป็นปัจจัยขั้นพื้นฐานในการนำมาพิจารณา ผู้วิจัยแบ่งขั้นตอนการวิจัยออกเป็น 2 ขั้นตอนเพื่อตรงกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย มีรายละเอียดของขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 แบ่งเป็น 1) ผู้วิจัยลงพื้นที่เพื่อสำรวจพื้นที่จำกัดและเก็บข้อมูลก่อนการวิจัย 2) ศึกษาข้อมูลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3) กำหนดแนวความคิดในการออกแบบ 4) ทำการออกแบบร่าง 5) พัฒนาแบบร่างจำนวน 3 แบบ 6) นำแบบร่างจำนวน 3 แบบไปสอบถามผู้เชี่ยวชาญด้านออกแบบเพื่อคัดเลือกเพียงรูปแบบ

เดียว 7) ปรังปรุงและพัฒนาแบบร่างที่ได้รับการคัดเลือกจากผู้เชี่ยวชาญ 8) ทำผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ส่วนขั้นตอนที่ 2 แบ่งเป็น 1) การทำแบบสอบถาม 2) นำผลิตภัณฑ์ไปสอบถามความพึงพอใจของผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า จากแนวความคิดของการออกแบบคือ แรงบันดาลใจในการออกแบบมาจากรูปทรงของรถ Campervan ผู้วิจัยได้ออกแบบร่างจำนวน 3 แบบ และนำไปประเมินเพื่อคัดเลือกรูปแบบที่ดีที่สุดจากผู้เชี่ยวชาญได้รูปแบบที่มีแนวคิดจากรถยนต์ Fifth – wheel Trailer มีความเหมาะสมที่จะทำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ซึ่งมีผลประเมินด้านประโยชน์ใช้สอย ความสวยงาม ด้านความแข็งแรง และวัสดุ อยู่ในระดับมากที่สุดและมาก สำหรับผลการประเมินความพึงพอใจของกลุ่มผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ จากการสอบถามความพึงพอใจผลิตภัณฑ์จำนวน 50 คนพบว่า การออกแบบเฟอร์นิเจอร์อเนกประสงค์จากอะไหล่รถยนต์เหลือใช้ สำหรับที่พักอาศัยพื้นที่จำกัด เป็นผลงานที่ได้ระดับความพึงพอใจจากกลุ่มเป้าหมายในระดับมากคือ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.49 สามารถอภิปรายผลได้ตามหลักเกณฑ์ดังนี้ ด้านประโยชน์ใช้สอย ผู้วิจัยได้ออกแบบผลิตภัณฑ์โดยจัดพื้นที่ใช้สอยน้อยที่สุดแต่มีการใช้งานที่หลากหลาย โดยใช้ลักษณะของการใช้งานเฟอร์นิเจอร์ชนิดอื่นๆ โดยปรับเปลี่ยนและเพิ่มการใช้งานให้สะดวกสาบยมากขึ้น เช่น ชั้นวางของ ช่องเก็บของ โต๊ะกินข้าว โต๊ะทำงาน และเคลื่อนที่ได้เหมาะสมกับที่พักอาศัยน้อย เช่น บ้านพัก ทาวน์เฮ้าส์ และคอนโด สอดคล้องกับ อุดมศักดิ์ (2550) ที่กล่าวว่า รูปร่างและขนาดเหมาะกับการใช้งาน ขนาด ความสูงกว้าง ยาว และขีดจำกัดของประกอบการออกแบบ เช่น การหยิบใช้คล่อง ทำให้ทราบว่าผลิตภัณฑ์สามารถตอบโจทย์ของกลุ่มเป้าหมายและเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ด้านความสวยงาม ผู้วิจัยได้ออกแบบโดยพัฒนาจากรูปแบบเดิมทั้ง ด้านสี รูปทรง วัสดุ ให้สวยงาม จากเดิมที่เป็นรูปแบบไม่สมบูรณ์ ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบโดยใช้ลักษณะของรถ Campervan BRS off-road sherpa camper trailer นำมาปรับเปลี่ยนรูปทรงและโทนสีให้มีความสวยงามและทันสมัย ส่วนด้านความแข็งแรงด้านความแข็งแรง ผู้วิจัยได้ออกแบบให้มีความแข็งแรง ความทนทาน ใช้วัสดุที่เหมาะสมกับการใช้งานพร้อมให้ใช้งานได้จริงในด้านต่างๆ เช่น การเก็บ น้ำหนัก การเคลื่อนที่ และความคงทนต่อการใช้งาน เพื่อให้ผู้ใช้งานได้ใช้งานอย่างเหมาะสม ซึ่งตรงกับแนวคิดของ สถาพร (2540) ที่กล่าวว่า รูปทรงสีสันต้องสวยงาม เป็นการสนองความต้องการของผู้ใช้ทางด้าน จิตใจ ทางความรู้สึก ฉะนั้นต้องสร้างรูปทรงเฟอร์นิเจอร์ให้มีความสวยงาม การตกแต่งสีผิวให้มีลวดลายสีสันจึงจะเป็นที่ต้องการของผู้ใช้ จึงผลิตขึ้นจริง และสุดท้ายด้านวัสดุ มีการใช้วัสดุที่มีความปลอดภัย ความทนทาน โครงสร้างแข็งแรง เหมาะสมกับการใช้งานโดยมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ต่างกัน ผู้วัยได้ออกแบบโดยเลือกใช้วัสดุที่สามารถปรับเปลี่ยนรูปทรงได้ตามต้องการ เช่น ไม้และโลหะ เพื่อให้ผู้ใช้งานได้มีความปลอดภัยกับผลิตภัณฑ์สอดคล้องกับ วรรณีภัค (2549) ได้กล่าวไว้ว่า การออกแบบเฟอร์นิเจอร์จะต้องมีหลักการออกแบบที่สัมพันธ์กับการออกแบบเฟอร์นิเจอร์ เพื่อสะดวกต่อการใช้งานการใช้วัสดุที่เหมาะสม โครงสร้างแข็งแรงทนทาน ใช้

เทคนิคการผลิตที่สอดคล้องกับผู้ใช้ มีราคาและคุณภาพที่สมดุล เพื่อให้เกิดประโยชน์ใช้สอยได้ครบถ้วนและลดต้นทุนการผลิตให้ได้มากที่สุด

6. เอกสารอ้างอิง

วรรณี สหสมโชค. (2549). **ออกแบบเฟอร์นิเจอร์**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

วัฒนะ จูฑะวิภาต. (2537). **ศิลปะและการออกแบบตกแต่งภายใน**. กรุงเทพฯ: อักษรกราฟฟิก

สถาพร ดีบุญมี ณ ชุมแพ. (2550). **การศึกษาการออกแบบผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์

อุดมศักดิ์ สารีบุตร. (2550). **ออกแบบเฟอร์นิเจอร์**. กรุงเทพฯ**:** โอเดียนสโตร์

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการอบแห้งขมิ้นชันโดยใช้เทคนิคสุญญากาศ

EFFECT OF TEMPERATURE ON TURMERIC DRYING USING VACUUM TECHNIQUE

วีรนุช บูรณะ[1*], เอกภูมิ บุญธรรม[2], วิริยา นิตย์ธีรานนท์[3],
จิรวัฒน์ สิตรานนท์[1], กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์[1]
Weeranuch Boorana[1*], Eakpoom Boonthum[2], Viriya Nitteranon[3],
Jirawat Sitranon[1], Kittisak Witinantakit[1]
[1]สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ประเทศไทย 20110
[2]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000
[3]คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ประเทศไทย 20110
[1]School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,
Sriracha, Chonburi, Thailand, 20110
[2]Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000
[3]Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,
Sriracha, Chonburi, Thailand, 20110
*Corresponding author e-mail: weeranuch.boo@rmutto.ac.th

วันที่เข้าระบบ 26 พฤศจิกายน 2566
วันที่แก้ไขบทความ 22 มีนาคม 2567
วันที่ตอบรับบทความ 27 มีนาคม 2567

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันและคุณภาพของขมิ้นชันหลังการอบแห้ง โดยอบแห้งขมิ้นชันด้วยเทคนิคผสมผสานอินฟราเรดร่วมกับสุญญากาศที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa และอุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลต่อการลดความชื้นของขมิ้นชัน ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง โดยการอบแห้งขมิ้นชันที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 627.2% d.b. จนมีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 11.80 %d.b. ที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C จะใช้เวลาอบแห้งน้อยที่สุด 180 min และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด 1.7 MJ/g $_{\text{water evaporated}}$ สำหรับด้านคุณภาพพบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นขมิ้นชันจะมีค่าความสว่างและสีแดงเพิ่มขึ้น แต่สีเหลืองมีค่าลดลง และที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมน้อยที่สุด ส่วนปริมาณน้ำอิสระมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทุกการทดลอง นอกจากนี้ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C ขมิ้นชันมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด (IC_{50}=0.82 mg/ml) และปริมาณฟีนอลิกรวมทั้งหมดสูงสุด 155.83 mgGAE/g

คำสำคัญ: การอบแห้ง, ขมิ้นชัน, สุญญากาศ, อุณหภูมิ

Abstract

The objective of this research is to study the drying kinetics and qualities of dried turmeric. Turmeric was dried by combining infrared and vacuum at an absolute pressure of 10 kPa and at temperatures of 40, 50, 60, and 70 °C, respectively. Turmeric had an initial moisture content of 627.2 %d.b. and a final moisture content of 11.80 %d.b. The increase in the drying temperature resulted in a decrease in drying time and specific energy consumption. At a drying temperature of 70 °C, the shortest drying time was 180 minutes, and the lowest specific energy consumption was 1.7 MJ/g water evaporated. In terms of qualities, increasing the drying temperature resulted in the lightness and redness increasing while the yellowness decreased. At a drying temperature of 50 °C, the entire color difference was minimal. However, the water activity was within the standard criteria in all experiments. Moreover, at a drying temperature of 60 °C, dried turmeric had the highest antioxidant (IC_{50}=0.82 mg/mL) and the highest total phenolic content of 155.83 mg GAE/g.

Keywords: Drying, Turmeric, Vacuum, Temperature

1.บทนำ

ขมิ้นหรือขมิ้นชัน มีชื่อสามัญ Turmeric ชื่อวิทยาศาสตร์ Curcuma longa linn. จัดอยู่ในวงศ์ขิง Zingiberaceae ขมิ้นชันมีประโยชน์ต่อสุขภาพมาก ส่วนใหญ่ปลูกในเขตร้อนและภูมิภาคกึ่งเขตร้อนของโลก (สำนักงานเกษตรและสหกรณ์ จังหวัดสุรินทร์, 2563) ขมิ้นชันถือเป็น 1 ในพืชสมุนไพรเศษฐกิจของประเทศไทยที่มีความนิยมทั้งในและต่างประเทศ ในแถบเอเชียใต้และตะวันออกเฉียงใต้ เช่น เนปาล อินเดีย บังคลาเทศ ศรีลังกา และอินโดนีเซีย ส่วนใหญ่ใช้เป็นยารักษาโรคและใช้ในการประกอบอาหารตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน (ชัชวาล, 2558) ขมิ้นชันมีคุณสมบัติที่ทางการแพทย์ใช้ในการรักษาโรค เช่น โรคกระเพาะอาหาร สมานแผลต่างๆ และยังช่วยให้ร่างกายมีความแข็งแรงมีภูมิต้านทานโรคไม่ให้ร่างกายเจ็บป่วยได้ง่าย และยังใช้เป็นสารแต่งสี สารปรุงแต่งรส และสารกันบูดในอุตสาหกรรมอาหาร นอกจากนี้ยังพบว่าขมิ้นชันมีฤทธิ์ต่อเชื้อไวรัสไข้หวัดใหญ่สายพันธุ์เอ ในการป้องกันไม่ให้เชื้อเข้าเซลล์ ยับยั้งการแบ่งตัวของเชื้อไวรัส และช่วยยับยั้งการหลั่งสารอักเสบ ในส่วนของการศึกษาในหนูทดลองพบว่าขมิ้นชันช่วยลดการอักเสบของปอดที่ติดเชื้อไวรัสไข้หวัดใหญ่สายพันธุ์เอ และช่วยเพิ่มภูมิคุ้มกัน ทั้งนี้จากการจำลองภาพสามมิติในคอมพิวเตอร์ พบว่าสารสำคัญของขมิ้นชัน และ Dimethoxy curcumin สามารถแย่งจับกับตำแหน่งของไวรัสที่จะเข้าสู่เซลล์ปอด และตำแหน่งที่มีผลยับยั้งการแบ่งตัวของไวรัสได้ (สุภาภรณ์ และคณะ, 2563)

ขมิ้นชันมีอายุในการปลูก 9-12 เดือน จึงจะทำการเก็บเกี่ยวนำมาแปรรูปเพื่อเก็บรักษาคุณภาพไว้ให้ใช้ได้นาน ด้วยกระบวนการต่างๆ ดังนี้ เช่น การทำแห้ง การสกัดเอาสารสกัด และการกลั่นน้ำมันหอมระเหย โดยการทำแห้งนั้นทำได้หลายวิธีการ เช่น การตากแดดธรรมชาติ การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับอินฟาเรด และการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมอินฟาเรด เป็นต้น (ปาริชาติ และคณะ, 2564)

ข้อดีของการอบด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมอินฟราเรดสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งให้สั้นลง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งต่ำกว่าการอบแห้งด้วยวิธีอื่นๆ และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสีที่คงความสดได้มากที่สุด และนอกจากนี้การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วและแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอทำให้ได้อัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นเพราะว่ารังสีอินฟราเรดสามารถทะลุทะลวงเข้าไปยังภายในเนื้อของวัสดุ ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำและแพร่ออกไปยังผิวของวัสดุได้ง่ายและผิวของวัสดุยังคงสภาพเดิม (วรวุฒิ และกิตติศักดิ์, 2563) และ ณัฐพล (2560) ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมอินฟราเรด พบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและกำลังของอินฟราเรด โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิและกำลังอินฟราเรดสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น

จากข้อได้เปรียบที่กล่าวมานี้จึงมีแนวคิดที่จะอบแห้งขมิ้นชันด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมอินฟราเรด เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งขมิ้นและสมบัติของขมิ้นชันหลังอบแห้งซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ของขมิ้นให้ตรงตามความต้องการของผู้บริโภค

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

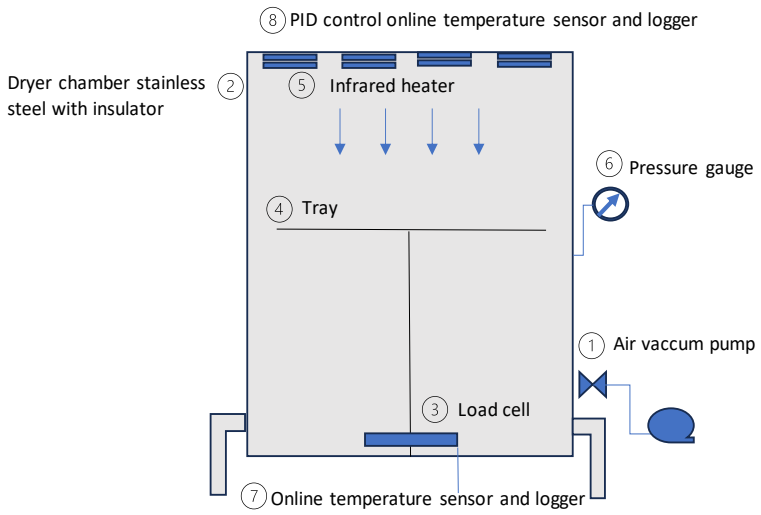
2.1 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งขมิ้นชันด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

2.2 เพื่อศึกษาคุณภาพของขมิ้นชันหลังการอบแห้ง ได้แก่ สี ปริมาณน้ำอิสระ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารฟีนอลิกรวม

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

วัสดุทดลองคือขมิ้นชันพันธุ์ด้วง อายุเก็บเกี่ยว 9-15 เดือน จากแหล่งเพาะปลูกโซนภาคเหนือ ทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa และอุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานหรือวิธีการทดลองดังนี้

3.1 เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด



ภาพที่ 1 ไดอะแกรมเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดระดับห้องปฏิบัติการ ดังภาพที่ 1 มีรายละเอียดดังนี้

1. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ยี่ห้อ Busch รุ่น PB 0008 B ขนาดมอเตอร์ 0.35 kW ทำความดันสุญญากาศสัมบูรณ์ได้ถึง 0.2 kPa

2. ตู้อบแห้งสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm และความสูง 60 cm

3. อุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนัก (Load cell) ขนาด 5 kg ความละเอียดของค่าแรงดันเอาต์พุต 1 mV/V ค่าความแม่นยำ Overall precision ร้อยละ 0.02 ของค่าเต็มสเกล

4. ตะแกรงรองวางวัสดุ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 cm

5. หลอดอินฟราเรด ยี่ห้อ Infrapara รุ่น A-1-220 ขนาด 250 W จำนวน 4 หลอด

6. มาตรวัดความดันสุญญากาศแบบ digital ยี่ห้อ Panasonic รุ่น DP-100 อ่านค่าได้ละเอียด -100 kPa ถึง 100 kPa

7. เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ Graphtec midi logger รุ่น GL200 ค่าความแม่นยำร้อยละ ±0.01 ของค่าเต็มสเกล

8. อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ความละเอียด ±0.01 °C ต่อกับสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ช่วงวัดอุณหภูมิ -200 °C ถึง 1250 °C ค่าความผิดพลาด -0.05 °C ถึง 0.04 °C

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 นำขมิ้นชันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 mm ล้างทำความสะอาดและแช่ในคลอรีนความเข้มข้น 5 ppm เป็นเวลา 10 min เพื่อฆ่าเชื้อโรคและยับยั้งการเกิดเชื้อรา พักไว้ให้แห้งประมาณ 15-20 min

3.2.2 หั่นขมิ้นชันตามขวางความหนาประมาณ 5 mm แล้วนำมาวางเรียงบนตะแกรงกลมไม่ให้ชิ้นขมิ้นซ้อนกัน ให้ขมิ้นชันมีน้ำหนักประมาณ 200 g

3.2.3 นำถาดที่วางขมิ้นชันเข้าเครื่องอบสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดและอุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C ที่ความดันสมบูรณ์ 10 kPa คงที่ จากนั้นทำการบันทึกน้ำหนักของขมิ้นชัน ทุกๆ 15 min โดยใช้ Load cell ในการบันทึกค่า เมื่อได้ความชื้นสุดท้ายตามที่กำหนด ก็ปิดเครื่องอบแห้งแล้วบันทึกน้ำหนักหลังการอบแห้ง ทำซ้ำในแต่ละเงื่อนไข 3 ซ้ำ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.3 ความชื้นของขมิ้นชัน หาได้โดยนำขมิ้นชันไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 hr (AOAC, 2000) เพื่อหาน้ำหนักแห้งของขมิ้นชันแล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณความชื้น ดังสมการที่ (1)

$$M_d = \frac{w - d}{d} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.)

w คือ น้ำหนักของขมิ้นชันสด (g)

d คือ น้ำหนักขมิ้นชันแห้ง (g)

อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่อหน่วยเวลา ซึ่งคำนวนได้จากสมการที่ (2) (Su *et al.*, 2020)

$$DR = \frac{M_t - M_{t+1}}{\Delta t} \qquad (2)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง ($g_{water}/g_{dry\ solids}$ min)

M_t คือ ปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆ (g_{water}/g_{dry})

Δt คือ ความแตกต่างของระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (min)

3.4 การทดสอบคุณภาพด้านสี ทดสอบสีแบบ L* a* b* โดยใช้แสง Day light ที่ 6,500 K ในการวัดสี ด้วยเครื่องมือวัดสี Portable colorimeter รุ่น NH300 ยี่ห้อ 3 nh จำนวน 3 ซ้ำ แล้วนำสีผลิตภัณฑ์ก่อนการอบแห้งและหลังจากอบแห้งมาเปรียบเทียบกัน เพื่อดูว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งที่สภาวะใดมีค่า ΔE น้อยที่สุด ซึ่งจะถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสีใกล้เคียงกับขมิ้นชันก่อนอบแห้งมากที่สุด ดังสมการที่ (3)

$$\Delta E = [(L^*_1-L^*_2)^2 + (a^*_1-a^*_2)^2 + (b^*_1-b^*_2)^2]^{1/2} \quad (3)$$

เมื่อ ΔE คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม

L^*_1, L^*_2 คือ ค่าความสว่างของขมิ้นชันก่อนอบและหลังอบแห้ง

a^*_1, a^*_2 คือ ค่าความเป็นสีแดง หรือเขียว ของขมิ้นชันก่อนอบและหลังอบแห้ง

b^*_1, b^*_2 คือ ค่าความเป็นสีเหลือง หรือน้ำเงิน ของขมิ้นชันก่อนอบและหลังอบแห้ง

3.5 ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) คือ อัตราส่วนระหว่างความดันไอของน้ำในวัสดุต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ หากมีมากจะทำให้จุลินทรีย์สามารถเจริญได้ในวัสดุนั้น ๆ การลดปริมาณน้ำอิสระให้มีค่าน้อยกว่า 0.6 จะช่วยยืดอายุการเก็บของวัสดุได้ สามารถวัดปริมาณน้ำอิสระได้โดยใช้เครื่อง Pre aqua lab water activity analyzer ทำการวัดโดยหั่นวัสดุเป็นชิ้นเล็กๆ เอาเข้าเครื่อง รอจนแสดงค่าปริมาณน้ำอิสระแล้วบันทึกผลการทดลอง โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.6 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$SEC=3.6\left(\frac{E_{infrared}+E_{vacuum}}{m_w}\right) \quad (4)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/g)

$E_{infrared}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับหลอดอินฟราเรด (kWh)

E_{vacuum} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศ (kWh)

m_W คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อวัสดุ (g)

3.7 สารสกัดของขมิ้นชัน โดยนำขมิ้นชันมาบดเป็นผงด้วยเครื่องปั่นแล้วกรองด้วยตะแกรงละเอียด จะได้ขมิ้นชันบดผงแล้วจึงนำไปชั่งให้ได้น้ำหนัก 5 g ใส่ในหลอดทดลอง เติมตัวทำละลายเอทานอล 10 ml นำไปแช่ในอ่างส่งคลื่นความถี่สูงด้วยความถี่ 40% เป็นเวลา 15 min จากนั้นทิ้งไว้ 24 hr แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงโดยเครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็วสูง 10,000 rpm เป็นเวลา 10 min ที่อุณหภูมิ 25 °C (วัชรนนท์ และคณะ, 2563)

3.8 สารต้านอนุมูลอิสระ (Sonkaew *et al*., 2012) การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วย DPPH assay DPPH หรือ 1,1-dipheny-2-picrylhydrazyl มีสภาวะเป็นอนุมูลอิสระ (DPPH) ที่มีความคงตัวโดยสภาพธรรมชาติ เมื่อ DPPH อยู่ในรูปสารละลายใน absolute ethanol จะมีสีม่วง และเมื่อทำปฏิกิริยากับสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจะทำให้สีม่วงของสารละลาย DPPH จางลงจนเป็นสีเหลืองอ่อนและไม่ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm จากนั้นบ่มตัวอย่างที่ต้องการทดสอบที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 1 mg/ml ละลายในสารละลาย DPPH ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 30 min วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ทำการทดลอง 3 ซ้ำ เพื่อนำไปคำนวณความเข้มข้นที่ยับยั้งสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH ที่ 50% (IC_{50}) โดยเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การยับยั้งจากสารละลายมาตรฐานแกลลิก และหาค่า IC_{50} ซึ่งค่า IC_{50} มาจากคำว่า 50% Inhibition of DPPH คือ ค่าความเข้มข้นที่สารนั้นมีประสิทธิภาพในการยับยั้งอนุมูลอิสระที่ 50% ดังสมการที่ (5) (แพรวพรรณ และคณะ, 2564) ถ้า IC_{50} มีค่าน้อยแสดงว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูง แต่ถ้า IC_{50} มีค่ามากแสดงว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระต่ำ

$$\% \text{ Inhibition of DPPH} = (1-(A_{simple}/A_{control})) \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ % inhibition of DPPH คือ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (%)

A_{simple} คือ ค่าการดูดกลืนแสงสารละลายตัวอย่าง

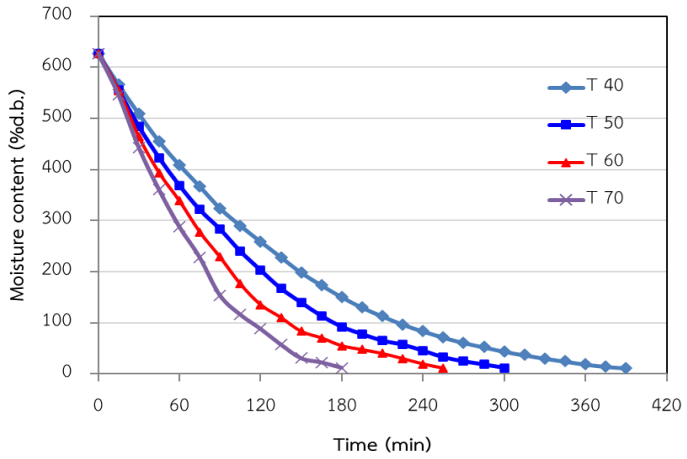
$A_{control}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH

3.9 การหาปริมาณฟีนอลิกรวม (Total phenolic content) (Vieira &, Lemos-Senna, 2020) ด้วยวิธี Folin-Ciocalten colormetric โดยใช้กรดแกลลิกเป็นมาตรฐาน ใช้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 760 nm นำไปสร้างกราฟมาตรฐานที่ความเข้มข้น 0.025 0.05 0.1 และ 0.2 mg/l ตามลำดับ แล้วนำไปหาปริมาณฟีนอลิกรวมในสารสกัดของขมิ้นชันที่อุณหภูมิต่างๆ (แพรวพรรณ และคณะ, 2564)

4. ผลการวิจัย

4.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

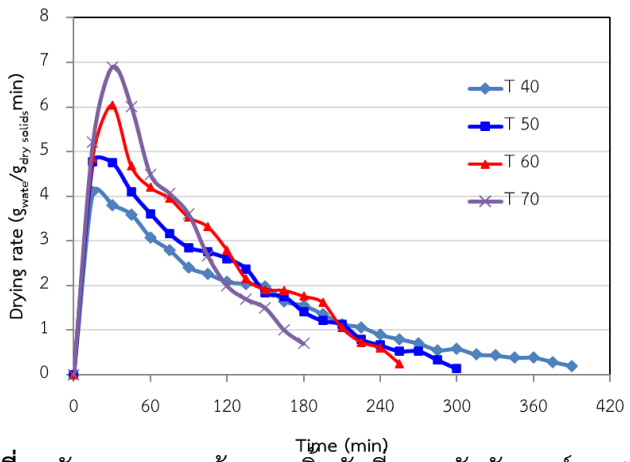
การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C โดยขมิ้นชันมีน้ำหนักเริ่มต้นในการอบแห้ง 200 g ความชื้นเริ่มต้น 627.2 %d.b. บันทึกน้ำหนักทุกๆ 15 min จนกระทั่งน้ำหนักของขมิ้นชันไม่มีการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของขมิ้นชันที่อบแห้งด้วยความดันสัมบูรณ์ 10 kPa

จากผลการทดลองพบว่าความชื้นของขมิ้นชันมีการลดลงที่ต่างกัน โดยในช่วงสองชั่วโมงแรกความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะค่อยลดลงจนสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น น้ำจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุแล้วระเหยออกจากวัสดุได้เร็วขึ้นส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง ดังภาพที่ 2 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความชื้นมาตฐานแห้งเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งสอดคล้องกับการอบแห้งขิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดของ อำไพศักดิ์ และศักชัย (2553) ซึ่งพบว่าอัตราส่วนความชื้นจะลงลงตามระยะเวลาอบแห้ง โดยความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูง จึงเกิดการถ่ายเทความชื้นออกจากเนื้อผลิตภัณฑ์สู่ห้องอบอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลงจนคงที่ และจากผลการทดลองดังกล่าวจะสอดคล้องกับภาพที่ 3 ซึ่งการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C จะใช้เวลาอบแห้งน้อยที่สุดคือ 180 min ซึ่งสอดคล้องกับการอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมอินฟราเรดของ ณัฐพล (2560) พบว่า

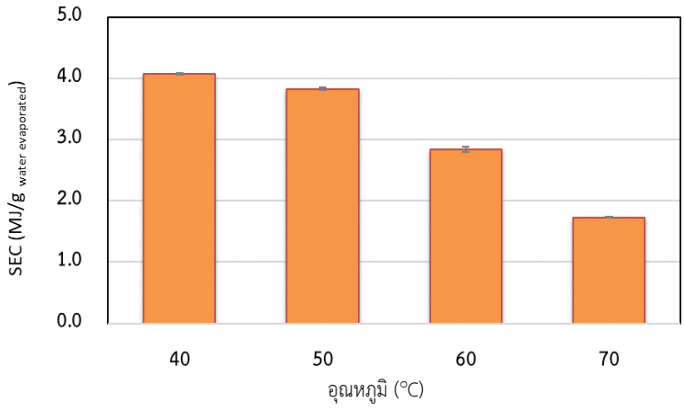
อัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและกำลังของอินฟราเรด โดยที่การอบแห้งที่อุณหภูมิและกำลังอินฟราเรดสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 3 อัตราการอบแห้งของขมิ้นชันที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa

4.2 ความสิ้นเปลืองของพลังงานจำเพาะในการอบแห้งขมิ้นชัน

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด พบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 390 300 225 และ 180 min ตามลำดับ และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ที่ 4.1 3.8 2.8 และ 1.7 MJ/$g_{water\ evaporated}$ ตามลำดับ ดังภาพที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอบแห้งกับวัสดุมาก ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น และน้ำระเหยออกจากวัสดุได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ใช้เวลาอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยลง สอดคล้องกับการศึกษาการอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมอินฟราเรดของ ณัฐพล (2560) พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มกำลังอินฟราเรด แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน ขณะที่การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการอบแห้งอื่น ๆ



ภาพที่ 4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งขมิ้นชันด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

4.3 คุณภาพสีและปริมาณน้ำอิสระ

จากการทดลองพบว่าปริมาณน้ำอิสระที่อุณหภูมิต่างๆ มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คือ ไม่เกิน 0.6 ดังตารางที่ 1 ซึ่งเชื้อราไม่สามารถเจริญเติบโตได้ (ดวงกมล และคณะ, 2548) และการทดสอบสีด้วยเครื่องวัดสี Portable colorimeter รุ่น NH300 ยี่ห้อ 3nh โดยทำการตรวจวัดค่าความสว่างและมืด L* ค่าความเป็นสีแดงหรือสีเขียว a* และค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน b* ของขมิ้นชันก่อนและหลังอบแห้งดังภาพที่ 5 และตารางที่ 1 พบว่าอุณหภูมิและเวลาส่งผลต่อคุณภาพสีของขมิ้นดังนี้

จากผลการทดลองพบว่าค่าความสว่าง (L^*) ของขมิ้นสด มีค่า 51.84 เมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด ค่าความสว่างเพิ่มสูงขึ้น สูงที่สุดคือ 62.39 และค่อยๆ ลดลงเป็น 57.47 55.27 และ 54.38 ที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C ตามลำดับ แสดงว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่าความสว่างยิ่งอุณหภูมิในการอบแห้งสูงค่าความสว่างจะลดลง ส่วนค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลืองของขมิ้นชันสดมีค่าเท่ากับ 34.51 และ 53.68 ตามลำดับ เมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมอินฟราเรด ค่าสีแดงลดลงเป็น 25.96 24.65 23.45 และ 22.78 และค่าสีเหลืองลดลงเป็น 52.92 47.13 43.54 และ 43.24 ที่อุณหภูมิอบแห้ง 40 50 60 และ 70 °C ตามลำดับ แสดงว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อคุณภาพสีของขมิ้นชันทำให้ขมิ้นมีสีคล้ำขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาจลนพลศาสตร์และคุณภาพชิ้นกล้วยอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟาเรดของณัฐภัค และกิตติศักดิ์ (2564) ที่พบว่าการใช้ระยะเวลาอบแห้งที่นานขึ้นมีผลทำให้ชิ้นกล้วยมีสีคล้ำขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลชนิดที่เกิดจากเอมไซม์โพลิฟีนอลออกซิเดสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับค่าความแตกต่างของสีโดยรวมของขมิ้นชันเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 40 °C มีค่ามากที่สุดคือ 14.92 และความแตกต่างของค่าสีน้อยลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งเป็น 50 °C ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดคือ 12.62 ดังตารางที่ 1

ก) ขมิ้นชันสด

ข) อุณหภูมิ 40 °C

ค) อุณหภูมิ 50 °C

ง) อุณหภูมิ 60 °C

จ) อุณหภูมิ 70 °C

ภาพที่ 5 คุณภาพสีของขมิ้นชันหลังจากอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

ตารางที่ 1 คุณภาพสีและปริมาณน้ำอิสระที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ

เงื่อนไขการทดลอง	ความชื้น (%d.b.)	ค่าสี				ปริมาณน้ำอิสระ (a_w)
		L*	a*	b*	ΔE	
ขมิ้นสด	-	51.84±1.51^{d}	34.51±1.14^{a}	53.68±2.44^{a}	N/A	N/A
40 °C	11.20	62.39±3.75^{a}	25.96±1.73^{b}	52.92±2.70^{a}	14.92+0.57^{a}	0.60±0.01^{C}
50 °C	11.90	57.47±4.00^{b}	24.65±2.08^{bc}	47.13±4.60^{b}	12.62+0.45^{b}	0.52±0.03^{b}
60 °C	11.20	55.27±3.35^{bc}	23.45±1.72^{cd}	43.54±3.30^{c}	13.02±0.58^{ab}	0.35±0.05^{a}
70 °C	11.80	54.38±4.68^{cd}	22.78±1.74^{d}	43.24±3.26^{c}	13.74±0.66^{ab}	0.46±0.01^{b}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

4.4 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณสารฟีนอลิกรวมทั้งหมด

การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากผลการทดลองดังตารางที่ 2 พบว่าที่ขมิ้นชันที่อบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 60 °C มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด (IC_{50}=0.82 mg/ml) ซึ่งมีค่า IC_{50} น้อยที่สุดแสดงว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงและคงสภาพของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้ดีที่สุด อุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นมีผลต่อค่า IC_{50} ที่เพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 40 และ 50 °C คือ 1.00 และ 1.11 mg/ml ตามลำดับ และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงกว่า 50 °C และจากการทดสอบหาปริมาณฟีนอลิกรวมด้วยวิธี Folin-Ciocalteu colormetric ซึ่งใช้กรดแกลลิกเป็นมาตรฐาน พบว่าปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดในขมิ้นชันที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 60 °C มีปริมาณสาร ฟีนอลิกรวมสูงที่สุด 155.83 mgGAE/g แสดงว่าการอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลต่อการลดลงของสารฟีนอลิก ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาของ Wanyo *et al.* (2011) ที่พบว่าการอบแห้งใบหม่อนด้วยอินฟราเรด อุณหภูมิอบแห้งส่งผลต่อปริมาณฟีนอลิก และจากการศึกษาของ ชมพูนุช และคณะ (2560) สารประกอบฟีนอลิกส่วนใหญ่จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นหลังจากให้ความร้อน เนื่องจากความร้อนไปทำลายผนังเซลล์ของพืช แต่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C สารฟีนอลิกมีค่าลดลง อาจเป็นเพราะอุณหภูมิอบแห้งที่สูงเกินไปส่งผลให้ฟีนอลิกสลายตัว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shiyu *et al.* (2023) ที่พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นสารประกอบฟีนอลิกจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญหรือลดลงเล็กน้อยอาจเป็นเพราะการย่อยสลายของเซลล์

ตารางที่ 2 IC_{50} และปริมาณสารฟีนอลิกรวมทั้งหมดของสารสกัดขมิ้น ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	IC_{50} (mg/ml)	ปริมาณฟีนอลิกรวม (mgGAE/g)
40	1.00 ± 0.03^{b}	129.47 ± 1.16^{b}
50	1.11 ± 0.03^{b}	119.32 ± 0.49^{a}
60	0.82 ± 0.01^{a}	155.83 ± 2.39^{c}
70	1.08 ± 0.02^{b}	125.44 ± 1.92^{ab}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการอบแห้งขมิ้นชันหั่นแว่นหนาประมาณ 5 mm ด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่ความดันสัมบูรณ์คงที่ 10 kPa และอุณหภูมิอบแห้ง 40 50 60 และ 70 °C พบว่าอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชัน โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งอัตราการ

อบแห้งก็เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งลดลง นอกจากนี้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นยังส่งผลต่อคุณภาพสีโดยค่าความสว่าง สีแดง และสีเหลืองจะมีค่าลดลง แต่ค่าความสว่างหลังอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองจะมีค่ามากกว่าขมิ้นชันสด ซึ่งค่าความแตกต่างของสีโดยรวมจะมีน้อยที่สุดที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C ส่วนปริมาณน้ำอิสระมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคือไม่เกิน 0.6 ทุกเงื่อนไขการทดลอง

เมื่อพิจารณาด้านคุณภาพของขมิ้นชันหลังอบแห้งสรุปได้ว่าการอบแห้งขมิ้นชันโดยใช้เทคนิคสุญญากาศร่วมอินฟราเรดที่ความดันสัมบูรณ์คงที่ 10 kPa อุณหภูมิอบแห้งที่เหมาะสมคือ 60 °C เนื่องจากมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมไม่สูงมากคือ 12.62 มีค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด (IC_{50}= 0.82 mg/ml) และปริมาณสารฟีนอลิกรวมสูงที่สุด 155.83 mgGAE/g

จากผลการทดลองที่กล่าวมาสามารถใช้เป็นแนวทางในการอบแห้งขมิ้นชันด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด เพื่อลดเวลาและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งโดยที่ผลิตภัณฑ์ขมิ้นชันหลังอบแห้งมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชันระดับอุตสาหกรรมได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

ชมพูนุช อุทัยรัตน์, เอกรัตน์ ศรีสุข และกล่าวขวัญ ศรีสุข. (2560). ผลของสภาวะต่างๆ ของการอบแห้งและการสกัดต่อปริมาณของสารประกอบฟีนอลิก สารประกอบฟลาโวนอยด์ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากผลปอกะบิด. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 22(1), 151-165.

ชัชวาล ช่างทำ. (2558). คุณประโยชน์และฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลายของสมุนไพรขมิ้นชัน. 94 ว. **วิทย. เทคโน. หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ**, 1(2). 94-109.

ณัฐพล กระจ่าง. (2560). **การอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมอินฟราเรด.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี.

ณัฐภัค อิ่มเอิบ และกิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์. (2564). การศึกษาจลนพลศาสตร์และคุณภาพชิ้นกล้วยอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟาเรด.**วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ,** 16(3), 24-36.

ดวงกมล แก้วพิมพา, นิศารัตน์ ตามสมัคร และสุรัตน์ สุขต้อ. (2548). **การปฏิบัติเบื้องต้นในการลดความชื้นของเห็ดหอมด้วยสารละลายเกลือแกงเพื่อลดระยะเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด.** (ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

ปาริชาติ ราชมณี, สุธิดา พิทักษ์วินัย, วาณิช นิลนนท์, และวุฒิไกร บัวแก้ว. (2564). จลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันแบบชั้นบางด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน.**วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม**, 17(2), 1686-1689.

แพรวพรรณ บุญนวม, นุรมา กาแบ, รัยมี หะยีมะสาและ, วิทวัส หมาดอี, ปิยะนุช สุวรรณรัตน์ และกุสุมาลย์ น้อยผา. (2564). การศึกษาสารพฤกษเคมีเบื้องต้น ปริมาณฟีนอลิก และสารฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดกระชายขาว เพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สบู่กระดาษ. **วารสารวิจัยและพัฒนาระบบสุขภาพ**, 14(3), 152-165.

วรวุฒิ มานะงาม และกิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์. (2563). การอบแห้งดอกบัวด้วยเทคนิคสุญญากาศแบบพัลส์และอินฟราเรดร่วมกับการฝังในซิลิกาทราย. **วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต,** 10(3), 84-98.

วัชรนนท์ แก้วยัง, กฤตนน วงศ์มิตรวาที และโฆษะ โฆษิตวรวุฒิ. (2563). **การพัฒนาผลิตภัณฑ์มาส์กหน้าจากสารสกัดธรรมชาติขมิ้นชัน.** (โครงงานวิจัยทางเภสัชศาสตร์). มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี.

สุภาภรณ์ ปิติพร, ผกากรอง ขวัญข้าว, อาสาฬา เชาว์เจริญ, ณัชชา เต็งเติมวงศ์, เบญจวรรณ หมายมั่นจันทิมา สุวรรณ และฐานิตา บุญเชิด. (2563). **อาหารสมุนไพรเสริมภูมิคุ้มกัน ในภาวะที่มีการระบาดของโควิด-19**. ค้นจาก https://www4.fisheries.go.th/local/file_announce/202107211106511_announce.pdf

สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดสุรินทร์. (2563). **ขมิ้น สรรพคุณและประโยชน์ของขมิ้นชัน.** ค้นจาก https://www.opsmoac.go.th/surin-local_wisdom-preview-422891791843

อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และศักชัย จงจำ. (2553). การอบแห้งขิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 15(2), 76-86.

AOAC. (Association of Official Analytical Chemists). (2000). **Official Methods of Analysis. At the Association of Official Analytical Chemists (**17th ed). Maryland: Gaithersburg.

Su, D., Lv, W., Wang, Y., Wang, L., & Li, D. (2020). Influence of microwave hot-air flow rolling dry-blanching on microstructure, water migration and quality of pleurotus eryngii during hot-air drying. **Food Control**, 114.

Shiyu, Z., Bo W., Weiqiao, L., & Yiran, W. (2023). Antioxidant activities of curcumin and ascorbyl dipalmitate nanoparticles and their activities after incorporation into cellulose-based packaging films. **Journal of food chemistry.** 404(23), 134741.

Sonkaew, P., Sane, A., & Suppakul, P. (2012). Antioxidant activities of curcumin and ascorbyl dipalmitate nanoparticles and their activities after incorporation into cellulose-based packaging films. **Journal of agricultural and food chemistry**. 60(21), 5388-5399.

Vieira, E.S., & Lemos-Senna, E. (2020). Application of a new validated HPLC-PDA method for simultaneous determination of curcumin and melatonin in hyaluronic acid-coated nanoemulsions. **Journal of the Brazilian Chemical Society.** 31(3), 467-475.

Wanyo, P., Siriamornpun, S. & Meeso, N., (2011). Improvement of quality and antioxidant properties of dried mulberry leaves with combined far-infrared radiation and air convection in Thai tea process. **Food and Bioproducts Processing.** 89, 22-30.

ความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตา ที่มีส่วนผสมของเถ้าพืช

THE STRENGTH OF CERAMICS TERRACOTTA CONTAINING PLANT ASH

ทนารัช จิตชาญวิชัย
Thanarat Jitcharnvichai
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000
Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000
Corresponding author e-mail: papthanarat@gmail.com

วันที่เข้าระบบ 8 มกราคม 2567
วันที่แก้ไขบทความ 26 มีนาคม 2567
วันที่ตอบรับบทความ 27 มีนาคม 2567

บทคัดย่อ

วิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่มีเถ้าพืชเป็นส่วนผสม และเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่ไม่มีเถ้าพืชและมีเถ้าพืชผสมอยู่ วัตถุดิบที่กำหนดคือ ดินเหนียวทะเลแก้ว เถ้าแกลบ เถ้ายางพารา และเถ้าต้นข้าวโพด กำหนดกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง 3 กลุ่ม เตรียมวัตถุดิบ ชั่งวัตถุดิบและบดผสมให้เข้ากัน ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบ เผาในอุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ผลการวิจัยพบว่า เนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้ว มีความแข็งแรง 148.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่มีเถ้าต้นข้าวโพดเป็นส่วนผสมมีความแข็งแรงสูงสุดคือ 288.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีปริมาณเถ้าต้นข้าวโพดผสมอยู่ร้อยละ 25 ของวัตถุดิบ เนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่มีเถ้ายางพาราเป็นส่วนผสมมีความแข็งแรงสูงสุดคือ 216.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีปริมาณเถ้ายางพาราผสมอยู่ร้อยละ 12.5 ของวัตถุดิบ และ เนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่มีเถ้าแกลบเป็นส่วนผสมมีค่าความแข็งแรงสูงสุดคือ 79 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีปริมาณเถ้าแกลบผสมอยู่ร้อยละ 2.5 ของวัตถุดิบ เมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงกับเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้ว พบว่าเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่มีเถ้าแกลบผสมมีความแข็งแรงต่ำกว่ากลุ่มที่มีเถ้ายางพาราและเถ้าต้นข้าวโพดผสมอยู่ ซึ่งมีความแข็งแรงที่สูงกว่า โดยค่าความแข็งแรงที่แตกต่างกันยังขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าพืชแต่ละชนิด อุณหภูมิที่เผา การขึ้นรูป และปริมาณของเถ้าพืชในส่วนผสม โดยส่วนผสมที่กล่าวมาข้างต้นสามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ได้จริง และเป็นข้อมูลสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งต่อไปได้

คำสำคัญ: เซรามิกส์, เถ้าพืช, ความแข็งแรงของเซรามิกส์, เทอราคอตตา

Abstract

The objective of this research is to study the strength of terracotta ceramics containing plant ash as an ingredient and compare the difference in strength between terracotta ceramics without plant ash and those with plant ash mixed with them. The determined raw materials were Thalekaew clay, rice husk ash, rubber ash, and corn stalk ash. The researchers categorized the samples into three groups using purposive sampling, prepared and weighed the materials, ground, and mixed them together. After that, they formed those samples by pressing in a mold and burned them at the temperature of 1,100 degrees Celsius. The research results revealed that terracotta ceramics made from Thalekaew clay exhibited a strength of 148.5 kilograms per square centimeter. With plant ash mixed in the raw materials, terracotta ceramics with 25 percent corn trunk ash showed the highest strength of 288.0 kilograms per square centimeter; terracotta ceramics with 12.5 percent rubber wood ash showed the highest strength of 216.7 kilograms per square centimeter; and terracotta ceramics with 2.5 percent rice husk ash yielded the highest strength of 79 kilograms per square centimeter. When comparing the strength values of terracotta ceramics made from Talay Kaew clay, and those mixed with rice husk ash displayed lower strength than those containing rubber wood ash and corn trunk ash, which revealed higher strength. These strength values varied based on the number of chemical components in each type of plant ash, the burning temperature, the forming process, and the amount of plant ash in the mixture. In summary, the mixture mentioned above can develop to be actual products. In addition, the obtained information is useful for future research endeavors.

Keywords: Ceramics, Plant ash, Strength of ceramics, Terracotta

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นแหล่งเกษตรกรรมที่สำคัญของโลก มีการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจที่ใช้ในการอุปโภคและบริโภคมากมาย เป็นแหล่งปลูกข้าวที่เป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญ เป็นแหล่งปลูกยางพาราที่มีกำลังการผลิตลำดับต้นๆ ของโลก ทั้งยังเป็นแหล่งเพาะปลูกข้าวโพดเพื่อการบริโภคและเป็นอาหารสัตว์จำนวนมาก ทำให้มีปริมาณของเศษเหลือทิ้งทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวมหาศาล เช่น แกลบ กิ่งและเศษลำต้นยางพารา และต้นข้าวโพดแห้ง เป็นต้น

เซรามิกส์เป็นวัสดุที่สำคัญกลุ่มหนึ่งที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจัดเป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ในกลุ่มเอิร์ทเทินแวร์ มีสีโทนแดง เผาที่อุณหภูมิต่ำ (790-800 องศาเซลเซียส) หรือปานกลาง (1,050-1,100 องศาเซลเซียส) ส่วนใหญ่ไม่เคลือบ มีการดูดซึมน้ำมากกว่า ร้อยละ 7 ใช้เป็นเครื่องประดับตกแต่ง เช่น กระเบื้อง กระเบื้องมุงหลังคา แจกัน ประติมากรรมเครื่องปั้นดินเผาสมัยโบราณ (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2548) โดยไพจิตร (2541) กล่าวว่า วัตถุดิบที่ทำกระเบื้องมุงหลังคา ใช้ดินแดงเนื้อละเอียดที่มีความเหนียว และควรเป็นดินที่เนื้อละเอียดกว่าดินสำหรับทำอิฐดินเผา จึงสอดคล้องกับผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตา ซึ่งค่าความแข็งแรงของเซรามิกส์ คือ ความสามารถของผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อแรงกระแทกที่มากระทำกับผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ (2548) ได้ให้คำจำกัดความของผลิตภัณฑ์เซรามิกส์กลุ่มเอิร์ทเทินแวร์ ว่า มีเนื้อดินเปราะ แตกหักง่าย การแตกเปราะหักนั้นแสดงถึงความไม่แข็งแรงของผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ชนิดนั้นๆ และวีระศักดิ์ และคณะ (2543) กล่าวว่า สิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาวัสดุ คือ สมบัติที่ต้องมีความแข็งแรง ความคงทน และความปลอดภัย เพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้งานได้อย่างเต็มที่และเหมาะสมที่สุดสำหรับผู้บริโภค ด้วยผลิตภัณฑ์เซรามิกส์นั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีความแข็งแรงต่อการนำไปใช้งานตามแต่ละชนิดที่แตกต่างกันออกไป

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น เนื้อดินเหนียวจากแหล่งทะเลแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก มีคุณสมบัติสอดคล้องกันกับเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตา คือ เมื่อเผาที่อุณหภูมิปานกลาง ดินมีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าร้อยละ 7 มีสีน้ำตาลอมแดง มีความแข็งแรง 149.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (สุภกิจ, 2560) อีกทั้งเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่ในท้องถิ่นที่ทำการวิจัย เหมาะสมที่จะนำมาศึกษาเพื่อหาความแข็งแรงของเนื้อดินเทอราคอตตาที่มีเถ้าพืชเป็นส่วนผสม และเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างความแข็งแรงของเนื้อดินเทอราคอตตาที่ไม่มีเถ้าพืชและมีเถ้าพืชผสมอยู่ โดยเลือกเถ้าพืชที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นและมีปริมาณมากพอต่อการใช้งานจริง ได้แก่ เถ้าแกลบ เถ้ายางพารา และเถ้าต้นข้าวโพด เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินท้องถิ่นที่ผสมเถ้าพืชให้มีความแข็งแรงที่มากขึ้นให้ได้ผลิตภัณฑ์มีมีคุณภาพเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดประโยชน์แก่วิสาหกิจชุมชน หน่วยงาน สถานประกอบการด้านอุตสาหกรรมเซรามิกส์ต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่มีเถ้าพืชชนิดต่างๆ เป็นส่วนผสม

2.2 เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่ไม่มีเถ้าพืช และมีเถ้าพืชเป็นส่วนผสม

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเถ้าพืชที่มีผลต่อความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตานี้ ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีดำเนินการไว้ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเลือกวัตถุดิบ กำหนดอัตราส่วนผสม และการเตรียมวัตถุดิบที่ใช้วิจัย

1. กำหนดวัตถุดิบจากวัตถุดิบที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นและมีปริมาณมากเพียงพอต่อการใช้งานจริง ได้แก่ ดินเหนียวทะเลแก้ว เถ้าแกลบ เถ้ายางพารา และเถ้าต้นข้าวโพด

2. กำหนดอัตราส่วนผสมของเนื้อดินเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้ว เถ้าแกลบ เถ้ายางพารา และเถ้าต้นข้าวโพด โดยกำหนดเป็น 3 กลุ่มตัวอย่าง โดยการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง จากวัตถุดิบ 2 ชนิดบนแกนเส้นตรง (Line blend) แบ่งเป็นช่วง ๆ ละ 2.5 และวัตถุดิบมีการแปรเปลี่ยนไปตามอัตราส่วนผสมของดินเหนียวทะเลแก้วกับเถ้าพืชแต่ละชนิด จึงได้อัตราส่วนผสมกลุ่มตัวอย่างละ 20 อัตราส่วนผสม รวมทั้งสิ้น 60 อัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 1

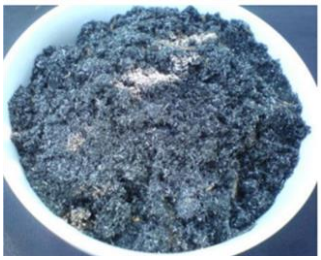
ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตา ที่มีเถ้าพืชเป็นส่วนผสม 3 กลุ่มตัวอย่าง รวม 60 อัตราส่วนผสม

อัตราส่วนผสมที่	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
ดินเหนียวทะเลแก้ว	97.5	95.0	92.5	90.0	87.5	85.0	82.5	80.0	77.5	75.0
เถ้า *	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0
รวม	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
อัตราส่วนผสม	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
ดินเหนียวทะเลแก้ว	72.5	70.0	67.5	65.0	62.5	60.0	57.5	55.0	52.5	50.0
เถ้า *	27.5	30.0	32.5	35.0	37.5	40.0	42.5	45.0	47.5	50.0
รวม	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

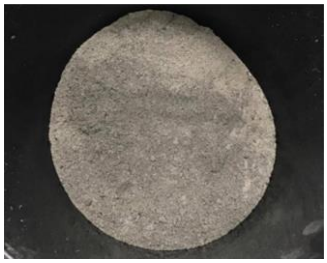
* คือ เถ้าแกลบ เถ้ายางพารา และเถ้าต้นข้าวโพด กำหนดเถ้า 1 ชนิดคือ 1 กลุ่มตัวอย่าง

3. เตรียมวัตถุดิบ แกลบสดได้มาจากโรงสีข้าวในอำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก กิ่งของยางพาราได้จากแหล่งปลูกยางพารา ตำบลวังนกแอ่น อำเภอวังทอง จังหวัดพิษณุโลก และต้นข้าวโพดแห้งได้จากแปลงปลูกข้าวโพดใน อำเภอกงไกรลาส จังหวัดสุโขทัย โดยเถ้าพืชทั้ง 3 ชนิด ต้องผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิสูงมากกว่า 800 องศาเซลเซียสในบรรยากาศทั่วไป (กรณีไม่มีเตาเผาสามารถเผากลางแจ้งหรือในภาชนะวงปูนซีเมนต์ได้ ซึ่งต้องใช้เวลานานกว่าการเผาด้วยเตาเผา) เถ้าที่เผาได้มีลักษณะเป็นสีเทา มีน้ำหนักเบา สัมผัสแล้วนุ่มมือ ซึ่งหากเมื่อสัมผัสแล้วมีลักษณะหยาบคล้ายเม็ดทราย และมีสีเข้มดำ แสดงว่ายังไม่กล้ายเป็นเถ้าต้องเผาต่อจนกลายเป็นเถ้า เพื่อให้ได้เถ้าที่บริสุทธิ์

ที่สุด นำเถ้าที่ได้ไปล้างให้สะอาดตามกรรมวิธีการล้างเถ้าพืชโดยวิธีการตกตะกอนของเถ้าพืชเช่นเดียวกับการเตรียมผงดินทะเลแก้ว จากนั้นอบเถ้าให้แห้งโดยใช้อุณภูมิ 110 องศาเซลเซียส และนำไปผ่านตะแกรงความละเอียด ขนาด 80 เมช เพื่อให้เถ้ากลายเป็นผง ในกรณีของดินเหนียวทะเลแก้ว นำดินเหนียวไปแช่น้ำอย่างน้อย 48 ชั่วโมง กวนล้างนำสิ่งเจอปนในดินให้ออกมากที่สุด ทิ้งให้ตกตะกอนรินน้ำและสิ่งเจือปนที่ลอยอยู่บนผิวน้ำออก นำดินที่ตกตะกอนไปผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช และทำให้แห้งเช่นเดียวกับเถ้าพืชทั้ง 3 ชนิด นำไปบดให้แตกตัวและผ่านตะแกรงอีกครั้งให้เป็นผงดิน โดยลักษณะของเถ้าพืชที่ผ่านการเผาแสดงตามภาพที่ 1



เถ้าแกลบ



เถ้ายางพารา

เถ้าต้นข้าวโพด

ภาพที่ 1 เถ้าไม้ที่ใช้ในการวิจัย

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดลอง การเผา และการทดสอบความแข็งแรงของเนื้อดินเนื้อดินเซรามิกส์ประเภท เทอราคอตตาจากดินทะเลแก้ว และเนื้อดินเทอราคอตตาที่มีเถ้าพืชเป็นส่วนผสม

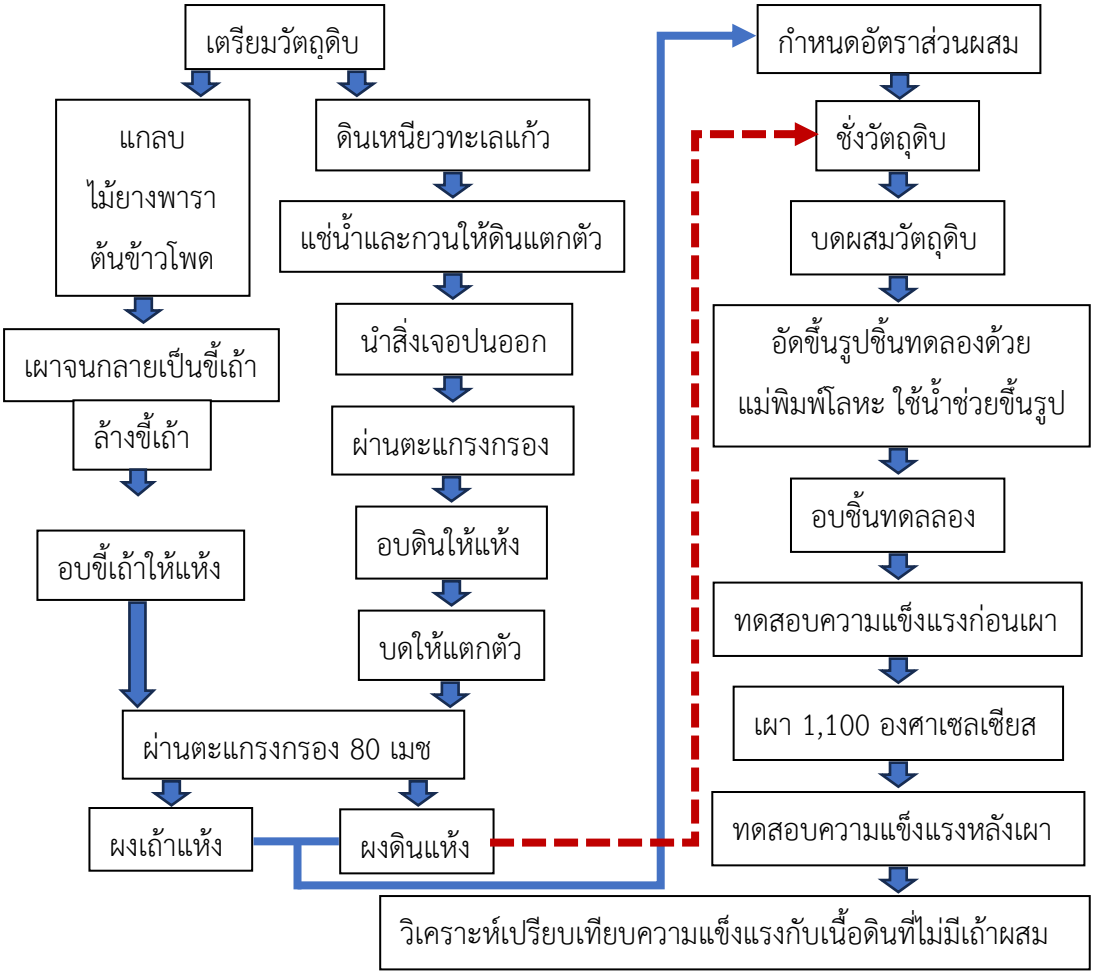
1. นำวัตถุดิบที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 1 มาชั่งส่วนผสมตามที่กำหนดด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิตอล ของบริษัท Mettler Toledo กำหนดความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง และบดผสมแบบแห้งด้วยเครื่องบดความเร็วสูง (Hi-speed centrifugal) ความเร็ว 500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 3 นาที โดยมี 1 อัตราส่วนผสมที่ไม่มีส่วนประกอบของเถ้าพืชผสมอยู่เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการวิจัย ในกรณีของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตา จากดินเหนียวทะเลแก้วชั่งดินผงเป็นดินเหนียวทะเลแก้วเพียงอย่างเดียว และนำไปผ่านขบวนการทดลองเช่นเดียวกับกลุ่มตัวอย่างที่ทำการวิจัย

2. นำวัตถุดิบที่ได้ในข้อ 1 ไปขึ้นรูปโดยวิธีการอัดแบบในแบบพิมพ์โลหะด้วยเครื่องอัดที่แรงกด 1,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ใช้น้ำช่วยในการยึดเกาะชิ้นทดลองในขนะขึ้นรูป ร้อยละ 6 ของวัตถุดิบ อัดชิ้นทดลองจำนวน 6 ชิ้น เพื่อนำผลการทดลองที่ได้แต่ละชิ้นมาหาค่าเฉลี่ยที่แม่นยำที่สุด

3. นำชิ้นทดลองที่ผ่านการอัดแบบไปอบที่อุณภูมิ 110 องศาเซลเซียส นำมาทดสอบความแข็งแรงก่อนเผาจำนวน 3 ชิ้น ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรง (MOR) ของบริษัท Ametek รุ่น Lloyd LS1 หาค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของชิ้นทดลอง และนำชิ้นทดลองที่เหลือเผาในอุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปทดสอบความแข็งแรงหลังเผาโดยเครื่องทดสอบความแข็งแรงเช่นเดิม

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นวิเคราะห์ เปรียบเทียบความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่ไม่มีเถ้าพืชและมีเถ้าพืชเป็นส่วนผสม ทั้ง 3 กลุ่ม โดยการนำผลการทดลองจากขั้นตอนที่ 2 มาวิเคราะห์เปรียบเทียบการทดลอง

จากขั้นตอนการวิจัย ทั้ง 3 ขั้นตอนสามารถสรุปเป็นภาพการดำเนินการวิจัยได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการวิจัยเพื่อหาความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่มีเถ้าพืชเป็นส่วนผสม

4. ผลการวิจัย

ความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาภายหลังดำเนินการทดลองแสดงตามตารางที่ 2, 3, 4 และ 5

ตารางที่ 2 ค่าความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้ว มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2)

	เนื้อดินเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้ว
ความแข็งแรงก่อนเผา	2.5
ความแข็งแรงหลังเผา	148.5

จากตารางที่ 2 เป็นผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบกับความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่มีส่วนผสมระหว่างดินเหนียวทะเลแก้ว กับเถ้าพืช พบว่า เนื้อดินก่อนการเผามีค่าความแข็งแรง 2.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเนื้อดินหลังการเผามีค่าความแข็งแรง 148.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 3 ค่าความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วที่มีเถ้าแกลบเป็นส่วนผสม มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2)

ส่วนผสมที่	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
ความแข็งแรงก่อนเผา	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
ความแข็งแรงหลังเผา	79.0	72.7	71.3	70.8	52.5	45.8	45.6	40.7	36.5	36.3
ส่วนผสมที่	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
ความแข็งแรงก่อนเผา	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
ความแข็งแรงหลังเผา	32.7	27.7	23.0	17.6	15.3	12.4	10.2	7.6	6.2	5.5

* ค่าความแข็งแรงก่อนเผาที่ทดสอบจากแรงกดของน้ำหนักต่ำสุดคือ 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

จากตารางที่ 3 เป็นผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วที่มีเถ้าแกลบเป็นส่วนผสม พบว่า ทุกอัตราส่วนผสมมีความแข็งแรงก่อนเผาน้อยกว่า 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนค่าความแข็งแรงหลังเผา อัตราส่วนผสมที่ 20 เนื้อดินมีค่าความแข็งแรงน้อยที่สุดคือ 5.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอัตราส่วนผสมที่ 1 เนื้อดินมีค่าความแข็งแรงมากที่สุดคือ 79.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 4 ค่าความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วที่มีเถ้ายางพาราเป็นส่วนผสม มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2)

อัตราส่วนผสมที่	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
ความแข็งแรงก่อนเผา*	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
ความแข็งแรงหลังเผา	141.6	158.8	166.0	191.7	216.7	212.4	193.7	163.6	147.4	137.2
อัตราส่วนผสมที่	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
ความแข็งแรงก่อนเผา	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
ความแข็งแรงหลังเผา	122.2	119.6	117.1	70.9	67.9	65.9	59.9	43.7	34.6	34.6

* ค่าความแข็งแรงก่อนเผาที่ทดสอบจากแรงกดของน้ำหนักต่ำสุดคือ 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

จากตารางที่ 4 เป็นผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วที่มีเถ้ายางพาราเป็นส่วนผสม พบว่า ทุกอัตราส่วนผสมมีความแข็งแรงก่อนเผาน้อยกว่า 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนค่าความแข็งแรงหลังเผา อัตราส่วนผสมที่ 19 และ 20 เนื้อดินมีค่าความแข็งแรงน้อยที่สุดคือ 34.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอัตราส่วนผสมที่ 5 เนื้อดินมีค่าความแข็งแรงมากที่สุดคือ 216.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

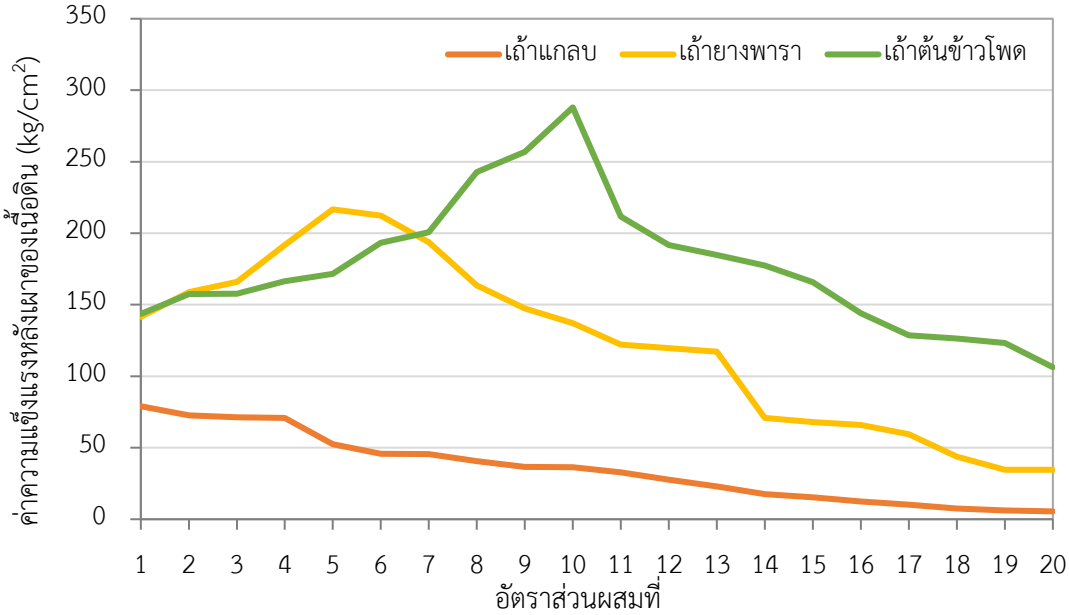
ตารางที่ 5 ค่าความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วที่มีเถ้าต้นข้าวโพดเป็นส่วนผสม มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2)

อัตราส่วนผสมที่	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
ความแข็งแรงก่อนเผา*	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
ความแข็งแรงหลังเผา	143.5	157.5	157.7	166.5	171.5	193.3	200.7	242.7	256.8	288.0
อัตราส่วนผสมที่	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
ความแข็งแรงก่อนเผา	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
ความแข็งแรงหลังเผา	211.7	191.7	184.7	177.5	165.7	144.1	128.7	126.3	123.3	106.3

* ค่าความแข็งแรงก่อนเผาที่ทดสอบจากแรงกดของน้ำหนักต่ำสุดคือ 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

จากตารางที่ 5 เป็นผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วที่มีเถ้าต้นข้าวโพดเป็นส่วนผสม พบว่า ทุกอัตราส่วนผสมมีความแข็งแรงก่อนเผาน้อยกว่า 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนค่าความแข็งแรงหลังเผา อัตราส่วนผสมที่ 20 เนื้อดินมีค่าความแข็งแรงน้อยที่สุดคือ 106.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอัตราส่วนผสมที่ 10 เนื้อดินมีค่าความแข็งแรงมากที่สุดคือ 288.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ข้อมูลจากตารางที่ 3 , 4 และ 5 สามารถแสดงเป็นกราฟเพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วที่มีส่วนผสมของเถ้าชนิดต่างๆ หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ตามภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความแข็งแรงหลังเผาของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วที่มีส่วนผสมของเถ้าพืชชนิดต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง

จากภาพที่ 3 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่มีดินทะแลแก้วผสมกับเถ้าพืช 3 ชนิด ชนิดละ 1 กลุ่มตัวอย่าง โดยมีปริมาณของเถ้าพืชแตกต่างกันในแต่ละอัตราส่วนผสม ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส และตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิจัยในแต่ละกลุ่มตัวอย่างได้เลือกอัตราส่วนผสมที่มีความแข็งแรงสูงสุดมาทดลองทำเป็นผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ส่วนผสมที่มีเถ้าแกลบเลือกอัตราส่วนผสมที่ 1 ส่วนผสมที่มีที่มีเถ้ายางพาราเลือกอัตราส่วนผสมที่ 5 และส่วนผสมที่มีที่มีเถ้าต้นข้าวโพดเลือกอัตราส่วนผสมที่ 10 แสดงตามภาพที่ 4

เถ้าแกลบ

เถ้ายางพารา

เถ้าต้นข้าวโพด

ภาพที่ 4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิจัย

5. สรุปผล และการอภิปรายผล

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยเรื่องความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่มีส่วนผสมของเถ้าพืช สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 เนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วก่อนการเผามีค่าความแข็งแรง 2.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และดินเหนียวทะเลแก้วหลังการเผามีค่าความแข็งแรง 148.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

5.1.2 เนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วที่มีเถ้าแกลบ เถ้ายางพารา และเถ้าต้นข้าวโพด ทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่างรวม 60 อัตราส่วนผสม ทุกอัตราส่วนผสมมีค่าความแข็งแรงก่อนเผาน้อยกว่า 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

5.1.3 เนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วที่มีเถ้าแกลบเป็นส่วนผสม พบว่า อัตราส่วนผสมที่ 20 เนื้อดินมีความแข็งแรงหลังเผาน้อยที่สุดคือ 5.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอัตราส่วนผสมที่ 1 เนื้อดินมีความแข็งแรงหลังเผามากที่สุดคือ 79.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

5.1.4 เนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วที่มีเถ้ายางพาราเป็นส่วนผสม พบว่า อัตราส่วนผสมที่ 19 และ 20 เนื้อดินมีความแข็งแรงหลังเผาน้อยที่สุดคือ 34.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอัตราส่วนผสมที่ 5 เนื้อดินมีความแข็งแรงหลังเผามากที่สุดคือ 216.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

5.1.5 เนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วที่มีเถ้าต้นข้าวโพดเป็นส่วนผสม พบว่า อัตราส่วนผสมที่ 20 เนื้อดินมีความแข็งแรงหลังเผาน้อยที่สุดคือ 106.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอัตราส่วนผสมที่ 10 เนื้อดินมีความแข็งแรงหลังเผามากที่สุดคือ 288.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

การวิจัยเรื่อง ความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่มีส่วนผสมของเถ้าพืช สามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

5.2.1 ความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่มีเถ้าพืชต่างชนิดกันเป็นส่วนผสมในเนื้อดินทำให้เกิดความแตกต่างกันตามลักษณะของเถ้าพืชที่ผสมลงไป คือ กลุ่มที่ผสมเถ้าแกลบที่ปริมาณน้อยสุด คือ อัตราส่วนผสมที่ 1 ผสมเพียงร้อยละ 2.5 เนื้อดินมีความแข็งแรงมากที่สุดในกลุ่มนี้ คือ 79.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าความแข็งแรงของกลุ่มตัวอย่างนี้จะลดลงไปตามลำดับจนถึงอัตราส่วนผสมสุดท้ายที่มีเถ้าแกลบที่ผสมอยู่ร้อยละ 50 คือ 5.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แตกต่างจากกลุ่มที่ผสมเถ้ายางพาราและกลุ่มที่ผสมเถ้าต้นข้าวโพด คือ กลุ่มที่ผสมเถ้ายางพาราในอัตราส่วนผสมที่ 1 มีเถ้ายางพาราผสมอยู่ร้อยละ 2.5 มีความแข็งแรง 141.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กลับมีความแข็งแรงต่ำกว่าอัตราส่วนผสมที่ 5 คือ 216.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่มีเถ้ายางพาราผสมอยู่ร้อยละ 12.5 และค่าความแข็งแรงของกลุ่มตัวอย่างนี้ลดลงไปตามลำดับตั้งแต่อัตราส่วนผสมที่ 6 จนถึงอัตราส่วนผสมสุดท้ายที่มีเถ้ายางพาราผสมอยู่ร้อยละ 47.5 และร้อยละ 50 คือ 34.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกลุ่มที่ผสมเถ้าต้นข้าวโพด ในอัตราส่วนผสมที่ 1 มีเถ้าต้นข้าวโพดผสมอยู่ร้อยละ 2.5 มีความแข็งแรง 143.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กลับมีความแข็งแรงต่ำกว่าอัตราส่วนผสมที่ 10 คือ 288.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่มีเถ้าต้นข้าวโพดผสมอยู่ร้อยละ 25 และค่าความแข็งแรงของกลุ่มตัวอย่างนี้จะลดลงไปตามลำดับตั้งแต่อัตราส่วนผสมที่ 11 จนถึงอัตราส่วนผสมสุดท้ายที่มีเถ้าต้นข้าวโพดที่ผสมอยู่ร้อยละ 50 คือ 106.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

จากค่าความแข็งแรงที่แตกต่างกันในแต่ละกลุ่มตัวอย่างที่ทำการวิจัย พบว่า กลุ่มตัวอย่างที่มีเถ้าแกลบเป็นส่วนผสมนั้น เถ้าแกลบมีส่วนประกอบทางเคมีเป็นซิลิกาออกไซด์ถึงร้อยละ 82.92 และมีส่วนประกอบทางเคมีที่เป็นออกไซด์ที่ช่วยลดอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย (เสริมศักดิ์, 2536) ซึ่งปริมาณของซิลิกาออกไซด์ที่มีสูงมากย่อมทำให้เกิดความทนไฟเพิ่มขึ้นมีผลต่อการสุกตัว และการเชื่อมต่อของอนุภาคของวัตถุดิบ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่ากลุ่มที่มีเถ้าแกลบเป็นส่วนผสมมีความแข็งแรงต่ำ เนื่องจากเนื้อดินยังไม่สุกตัวพอที่จะทำให้อนุภาคของวัตถุดิบหลอมตัวเชื่อมกันส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของเนื้อดินนั้นลดลง แต่ในทางกลับกันกลุ่มที่ผสมเถ้ายางพารานั้น เถ้ายางพารามีส่วนประกอบทางเคมีเป็น ซิลิกาออกไซด์ต่ำมากเพียงร้อยละ 1.69 และมีออกไซด์ที่ช่วยลดอุณหภูมิที่สูง คือ แคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 52.31 (ดนุพล และคณะ, 2557) ซึ่งสอดคล้องกับ อรนุช (2561) กล่าวว่าเถ้ายางพารามีส่วนประกอบทางเคมีเป็นซิลิกาออกไซด์ร้อยละ 1.71 และมีออกไซด์ที่ช่วยลดอุณหภูมิที่สูง คือ แคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 43.37 โดยปริมาณของออกไซด์ที่ช่วยลดอุณหภูมินี้มีส่วนสำคัญที่ทำให้เนื้อดินสุกตัวได้ดีขึ้นในอุณภูมิที่กำหนดจึงทำให้ค่าความแข็งแรงของเนื้อดินกลุ่มเถ้ายางพาราสูงกว่าเนื้อ

ดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วเพียงอย่างเดียว และเป็นไปในทางเดียวกันกับกลุ่มเถ้าต้นข้าวโพด ซึ่งเถ้าต้นข้าวโพดมีส่วนประกอบทางเคมีของซิลิกาออกไซด์ร้อยละ 34.61 และมีส่วนผสมในกลุ่มของออกไซด์ที่ช่วยลดอุณหภูมิอยู่พอสมควร เช่น โพแทสเซียมออกไซด์ ร้อยละ 13.9 และ แคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 6.22 เป็นต้น (เสริมศักดิ์, 2536) ปริมาณของออกไซด์ที่ช่วยลดอุณภูมินี้มีส่วนสำคัญที่ทำให้เนื้อดินสุกตัวได้ดีขึ้นในอุณภูมิที่กำหนด จึงทำให้ค่าความแข็งแรงของกลุ่มเถ้าต้นข้าวโพดสูงกว่าเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วเพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงของเนื้อดิน 3 กลุ่มตัวอย่าง จึงขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าพืชแต่ละชนิดที่ผสมลงไปในเนื้อดินและมีผลโดยตรงกับความแข็งแรงของเนื้อดินเมื่อเผาเนื้อดินนั้นที่อุณหภูมิเดียวกัน อีกทั้งความแข็งแรงของเนื้อดินนั้นๆ จะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับการเผาเนื้อดินนั้นให้ถึงจุดสุกตัวด้วยเช่นกัน

5.2.2 จากการทดสอบค่าความแข็งแรงของกลุ่มตัวอย่างที่มีเถ้าพืชชนิดต่างๆ เป็นส่วนผสม เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วเพียงอย่างเดียว พบว่า ค่าความแข็งแรงก่อนเผาสูงกว่ากลุ่มตัวอย่างที่มีเถ้าพืชชนิดต่างๆ เป็นส่วนผสม คือ 2.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งโกมล (2531) กล่าวว่า ดินเหนียวเป็นวัตถุดิบที่ใช้มากในอุตสาหกรรมมีเม็ดละเอียดมีความเหนียวดีเหมาะกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดความแข็งแรงต่อผลิตภัณฑ์เมื่อยังไม่เผา นอกจากนี้ ปรีดา (2539) กล่าวว่า ดินเหนียวมีลักษณะพิเศษคือ มีสารอินทรีย์ปนอยู่เสมอ สารอินทรีย์นี้มีส่วนประกอบคล้ายลิกไนต์มาก ดินเหนียวเมื่อแห้งมีความแข็งแรงสูง เมื่อผสมเนื้อดินปั้นจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงสูงตามด้วย ดังนั้นจึงเป็นผลดีต่อการตกแต่ง เก็บรักษาและเคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์ได้สะดวก แต่ในทางกลับกันเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วเพียงอย่างเดียวมีค่าความแข็งแรงหลังเผา 148.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรกลับมีค่าความแข็งแรงหลังเผาที่ต่ำกว่ากลุ่มตัวอย่างของกลุ่มที่มีเถ้ายางพารา และกลุ่มเถ้าต้นข้าวโพดผสมอยู่ ยกเว้นกลุ่มที่มีเถ้าแกลบผสมอยู่มีความแข็งแรงต่ำกว่าเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วเพียงกลุ่มเดียว

จากการทดสอบความแข็งแรงของเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้ว ได้มีการศึกษาส่วนประกอบทางเคมีไว้ พบว่าดินเหนียวทะเลแก้วมีปริมาณซิลิกาออกไซด์ร้อย ละ 61.60 มีอลูมินาออกไซด์ร้อยละ 5.48 (ทนารัช,2561) ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี ของ ประสิทธิ์ (2539) ที่ได้ศึกษาไว้ พบว่า มีปริมาณมีซิลิกาออกไซด์ใกล้เคียงกันคือ ร้อยละ 62.00 มีอลูมินาออกไซด์ร้อยละ18.20 มีเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5.46 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าแหล่งวัตถุดิบนี้ยังคงมีความสเถียร และคุณภาพที่เชื่อถือได้ เนื่องจากดินเหนียวทะเลแก้วมีซิลิกาออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์จึงทำให้ดินมีความทนไฟสูง อายุวัฒน์ (2543) แต่เนื่องด้วยดินมีเหล็กออกไซด์ที่พอเหมาะจะทำให้ดินสุกตัวในระดับหนึ่งจึงทำให้มีความแข็งแรงเพียงพอต่อคุณภาพของ

เนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่จะนำไปใช้งาน แต่เนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วมีค่าความแข็งแรงสูงกว่ากลุ่มที่ผสมเถ้าแกลบเนื่องจากการเพิ่มเถ้าแกลบเข้าไปในส่วนผสมของเนื้อดินยิ่งทำให้ดินมีความทนไฟสูงขึ้นเพราะ ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบที่มีซิลิกาออกไซด์สูงกว่าร้อยละ 80 ยิ่งทำให้เนื้อดินมีปริมาณซิลิกาออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อเผาในอุณภูมิที่กำหนดเนื้อดินจึงยังไม่สุกตัวทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงเมื่อเทียบกับเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้ว แต่อย่างไรก็ตามเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วกลับมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่ากลุ่มที่มีเถ้ายางพารา และกลุ่มที่มีเถ้าต้นข้าวโพดผสมอยู่ อาจเนื่องจากเถ้ายางพาราและเถ้าต้นข้าวโพด มีปริมาณออกไซด์ที่ทำหน้าที่ช่วยลดอุณหภูมิในการเผาในปริมาณที่พอเหมาะ มีปริมาณซิลิกาออกไซด์ไม่สูงเกินไป และเผาในอุณภูมิที่เหมาะสมพอดีกับอัตราส่วนผสมของกลุ่มตัวอย่างที่กำหนด จึงทำให้เนื้อดินทั้ง 2 กลุ่มนี้มีความแข็งแรงสูงกว่าเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาจากดินเหนียวทะเลแก้วเพียงอย่างเดียว อีกทั้งการขึ้นรูปโดยวิธีการอัดแบบจะทำให้ปริมาณของวัตถุดิบในหนึ่งหน่วยพื้นที่สูงกว่าการหล่อแบบเนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้ขึ้นรูปน้อยกว่าจึงทำให้เกิดการอัดแน่นของเนื้อวัตถุดิบมากกว่าเมื่อนำเนื้อดินไปเผาจนถึงจุดสุกตัวและปริมาณของเนื้อวัตถุดิบที่มากกว่าย่อมทำให้เนื้อดินนั้นๆ มีความแข็งแรงสูงตามไปด้วย ซึ่งเหมาะสมกับเนื้อดินเซรามิกส์ประเภทเทอราคอตตาที่นิยมนำมาทำผลิตภัณฑ์ตกแต่ง ประเภทกระเบื้องปูพื้นกระเบื้องมุงหลังคาที่มักใช้การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีและนวัตกรรมเซรามิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ในการวิจัย ทำให้การดำเนินการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

โกมล รักษ์วงศ์. (2531). **วัตถุดิบที่ใช้ในงานเครื่องปั้นดินเผาและเนื้อดินปั้น.** กรุงเทพมหานคร: วิทยาลัยครูพระนคร.

ดนุพล ตันนโยภาส และคณะ. (2557). **ผลของการเติมเถ้าลอยไม้ยางพาราต่อสมบัติของมวลรวมน้ำหนักเบาผลิตจากแก้วขวดใส.** 15(1), 32.

ทนารัช จิตชาญวิชัย. (2561). **เครื่องปั้นดินเผาอุณหภูมิต่ำทำจากเถ้าลอยลิกไนต์ และดินเหนียวทะเลแก้ว จังหวัดพิษณุโลก.** พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยราชภัฏพระพิบูลสงคราม.

ประสิทธิ์ แก้วฟุ้งรังษี. (2539). **การทดลองหาประสิทธิภาพเนื้อดินปั้นประเภทสโตนแวร์ของดินเหนียวทะเลแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก.** (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. (2539). **เซรามิกส์** (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไพจิตร อิ่งศิริวัฒน์. (2541). **เนื้อดินเซรามิกส์.** กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, สุรศักดิ์ ไวทยวงศ์สกุล, ฟูศักดิ์ บุญยกุลศรีรุ่ง, วรมน สุภัทรวณิชย์, วีระ ชูกระชั้น, ศรีไฉล ขุนทน, ...สรินทร ลิ่มปนาท. (2543). **เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2548). **พจนานุกรมศัพท์วัสดุศาสตร์ และเทคโนโลยี.** กรุงเทพมหานคร: กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

เสริมศักดิ์ นาคบัว. (2536). **เคลือบขี้เถ้าพืช**. กรุงเทพฯ: เจ.ฟิลม์ โปรเซส จำกัด.

สุภกิจ พุ่มพวง. (2560). **การทดลองเนื้อดินปั้นที่มีน้ำหนักเบา จากดินเหนียวทะเลแก้ว.** พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยราชภัฏพระพิบูลสงคราม.

อรนุช จินดาสกุลยนต์. (2561, มีนาคม). **ขี้เถ้าไม้สำหรับเคลือบเซรามิกส์.** เอกสารในการนำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 6 ราชภัฏหมู่บ้านจอมบึงวิจัย, มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอม. ราชบุรี.

อายุวัฒน์ สว่างผล. (2543). **วัตถุดิบที่ใช้แพร่หลายในงานเซรามิกส์.** กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

การหาคำตอบที่ดีที่สุดของที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ จังหวัดอุตรดิตถ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

OPTIMAL SOLUTION OF DISTRIBUTION CENTER OF VEGETABLE AND FRUIT PRODUCTS OF UTTARADIT PROVINCE USING MATHEMATICAL MODEL

รัตน์ติยากร มีรัตน์*, บุญทรัพย์ พานิชการ
Rattiyagorn Meerat*, Boonsub Panichakarn
คณะโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000
Faculty of Logistics and Digital Supply Chain, Naresuan University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000
*Corresponding author e-mail: rattiyagornm63@nu.ac.th

วันที่เข้าระบบ 26 มกราคม 2567
วันที่แก้ไขบทความ 28 กุมภาพันธ์ 2567
วันที่ตอบรับบทความ 13 มีนาคม 2567

บทคัดย่อ

การเลือกที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าเป็นหนึ่งในกลไกสำคัญของการจัดการโลจิสติกส์ ในการศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ที่ตั้งที่เหมาะสมศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ สำหรับสินค้าผักและผลไม้จากแต่ละอำเภอในจังหวัดอุตรดิตถ์ โดยการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาคำตอบที่ดีที่สุดของที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าที่เกิดต้นทุนโดยรวมต่ำที่สุดและใช้ระยะเวลาโดยรวมน้อยที่สุด และประยุกต์ใช้เอ็กเซลโซลเวอร์ (Excel solver) สำหรับการประมวลผล ข้อมูลที่นำมาใช้วิเคราะห์ประกอบด้วย ต้นทุนการขนส่ง ต้นทุนการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้า ปริมาณความจุศูนย์กระจายสินค้า ปริมาณผลผลิตผักและผลไม้ ระยะทาง และเวลา ผลการศึกษาสรุปได้ว่า ด้านต้นทุนโดยรวม ที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ ได้แก่ อำเภอเมือง อำเภอท่าปลา อำเภอน้ำปาด อำเภอบ้านโคก และลับแล โดยมีต้นทุนโดยรวมต่ำที่สุด คือ 46,066,154 บาท/ปี ในขณะที่ด้านระยะเวลา ที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ ได้แก่ ทุกอำเภอในจังหวัดอุตรดิตถ์ โดยมีระยะเวลาโดยรวมน้อยที่สุด คือ 45,344 นาที/ปี ซึ่งจะพบว่า มีพื้นที่ 5 อำเภอที่เหมาะสมที่สุดในการจัดตั้งให้เป็นศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ จากทั้งปัจจัยด้านต้นทุนโดยรวมและด้านระยะเวลาโดยรวม ได้แก่ อำเภอเมือง อำเภอท่าปลา อำเภอน้ำปาด อำเภอบ้านโคก และอำเภอลับแล

คำสำคัญ: การเลือกทำเลที่ตั้ง, ศูนย์กระจายสินค้า, สินค้าเกษตร, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Abstract

Selecting the distribution center location is one of the key mechanisms of logistics management. This study aims to analyze optimal locations for fruit and vegetable distribution centers from each district in Uttaradit Province by developing the mathematical model for analyzing distribution center locations for the best one with the lowest total costs and the minimum total time, using Excel Solver for data processing. The data for analysis includes: transportation cost; distribution center cost; distribution center capacity, vegetable and fruit production volume, distance, and time. The results of this study concluded that regarding total cost factor; the locations of the fruit and vegetable distribution centers including Mueang district, Tha Pla district, Nam Pat district, Ban Khok district, and Laplae district have the lowest overall cost of 46,066,154 baht per year, while in terms of total time factor; the locations of the fruit and vegetable distribution centers are those in every district of Uttaradit Province, with the minimum total time of 45,344 minutes per year. It could be seen that the five most suitable districts for setting up vegetable and fruit distribution centers owing to both overall cost and overall time factors are Mueang district, Tha Pla district, Nam Pat district, Ban Khok district, and Laplae district.

Keywords: Location selection, Distribution center, Agricultural products, Mathematical model

1. บทนำ

ประเทศไทยมีที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ที่เหมาะสมกับการเป็นจุดศูนย์กลางการผลิตการค้าและบริการที่สะดวกต่อการเชื่อมโยงกับกลุ่มประเทศอาเซียนและอนุภาคลุ่มแม่น้ำโขง (GMS) และมีความได้เปรียบจากโครงสร้างระบบการคมนาคมขนส่งที่เชื่อมต่อกับประเทศเพื่อนบ้าน นอกจากนี้ยังเป็นที่รู้จักในฐานะแหล่งผลิตสินค้าการเกษตรที่นิยมแพร่หลายในตลาดโลก รวมถึงเป็นเสน่ห์ดึงดูดให้มีกลุ่มนักท่องเที่ยวมาเยือนแหล่งผลิตทั่วภูมิภาคของประเทศไทย จึงเป็นความท้าทาย ที่จะยกระดับมูลค่าและรายได้ของเกษตรกรไทย (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559)

จังหวัดอุตรดิตถ์ ประกอบด้วย 9 อำเภอ ได้แก่ อำเภอเมือง อำเภอท่าปลา อำเภอน้ำปาด อำเภอฟากท่า อำเภอบ้านโคก อำเภอตรอน อำเภอพิชัย อำเภอลับแล และอำเภอทองแสนขัน เป็นจังหวัดหนึ่งที่มีการดำเนินการทางภาคเกษตรเป็นจำนวนมาก ในปี 2561-2565 มีปริมาณของผลผลิต/ปี โดยเฉลี่ย เท่ากับ 2,263.76 ตัน/ปี โดยภาวะเศรษฐกิจของจังหวัดอุตรดิตถ์ย้อนหลัง 5 ปี

(2558-2562) ขึ้นอยู่กับภาคเกษตร ภาคอุตสาหกรรม และการขายส่ง การขายปลีกเป็นสำคัญตามลำดับ ซึ่งในปี 2562 ภาคการเกษตรนั้นมีสัดส่วนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับปี 2558 โดยคิดเป็นร้อยละ 31.2 ผลิตภัณฑ์มวลรวมของจังหวัดอุตรดิตถ์ (GPP) อยู่ในลำดับที่ 61 ของประเทศ และลำดับที่ 13 ของภาคเหนือ (กลุ่มงานยุทธศาสตร์และข้อมูลเพื่อการพัฒนาจังหวัด, 2562) มีการดำเนินนโยบายและมาตรการของภาครัฐ และความร่วมมือจากทุกภาคส่วนต่าง ๆ อาทิ ยกระดับสินค้าเกษตรให้มีคุณภาพมาตรฐานอละบริหารจัดการสินค้าให้สอดคล้องกับความต้องการของตลาด และเพิ่มช่องทางการตลาด ทั้งตลาดออนไลน์และออฟไลน์ ทำให้มีช่องทางการจำหน่ายสินค้าเกษตรมากขึ้น แต่พบว่าในปัจจุบันยังไม่มีการจัดตั้งศูนย์ฏระจายสินค้าเกษตรสำหรับการรองรับและการกระจายสินค้าเกษตรในจังหวัดอุตรดิตถ์ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2565) ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาคำตอบที่ดีที่สุดของที่ตั้งที่เหมาะสมสำหรับศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ ของจังหวัดอุตรดิตถ์ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะช่วยให้ระบบการดำเนินการภาคการเกษตรของจังหวัดอุตรดิตถ์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อให้ต้นทุนโดยรวมของการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ต่ำที่สุด และมีระยะเวลาการขนส่งโดยรวมน้อยที่สุด และนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิเคราะห์นั้น เป็นแนวทางให้แก่ผู้ที่สนใจในการใช้ประโยชน์จากผลการวิเคราะห์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับเกษตรกร ผู้ประกอบส่งออกสินค้าทางการเกษตรและหน่วยงานทางการเกษตรที่เกี่ยวข้องจังหวัดอุตรดิตถ์ และจังหวัดอื่น ๆ ได้ต่อไป

2. ทบทวนวรรณกรรม

งานวิจัยเรื่องการหาคำตอบที่ดีที่สุดของที่ตั้งที่เหมาะสมสำหรับศูนย์กระจายสินค้าเกษตร ของจังหวัดอุตรดิตถ์ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมและโครงการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้า

จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเลือกทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าสามารถจำแนกวิธีการในการแก้ปัญหาได้หลายวิธี ยกตัวอย่างงานวิจัย ได้แก่ การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic hierarchy process : AHP) เพื่อศึกษาปัจจัยการเลือกทำเลที่ตั้งและเลือกทำเลที่ตั้งเหมาะสม (จุฑามาศ, 2556; ณภัทร และคณะ, 2559; Nona, 2015) การประยุกต์ใช้เทคนิคการหาจุดศูนย์กลาง (Center of gravity) เพื่อศึกษาทำเลที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้า (ยุพิณ, 2557; อุทัย และคณะ, 2554) การประยุกต์ใช้การโปรแกรม LOGWARE ในการเลือกทำเลที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้า (กิตติพงษ์, 2557) การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมสายตาสั้น (The myopic algorithm) เป็นปัญหาแบบ P-median เพื่อศึกษาที่ตั้งแบบไดนามิก (Dynamic) ของศูนย์กระจายสินค้า (Esther *et al.*, 2014) การใช้อัลกอริทึมการจัดกลุ่ม FCM (Fuzzy C) ในการแก้ไข

ปัญหาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพตำแหน่งศูนย์กระจายสินค้าด่วนในภูมิภาค (Yingfeng *et al.*, 2013) และการประยุกต์ใช้ทฤษฎีฮิวริสติกส์ (Anthony & Vaidyanathan, 2008) เพื่อประเมินขั้นตอนการแก้ปัญหาเชิงพฤติกรรมแบบใหม่สำหรับตำแหน่งที่ตั้ง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

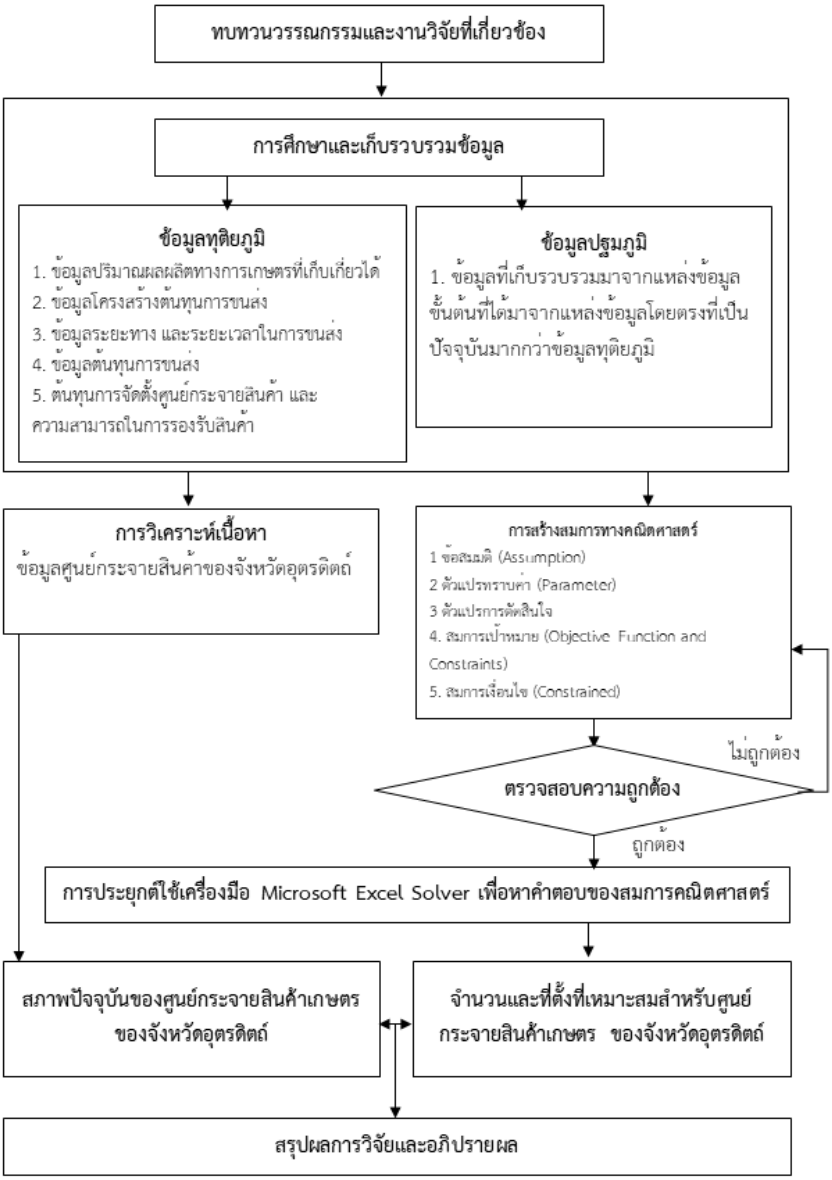
จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาหาคำตอบที่ดีที่สุดของที่ตั้งที่เหมาะสมสำหรับศูนย์กระจายสินค้า ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้า โดยส่วนใหญ่คนจะให้ความสำคัญในเรื่องของต้นทุนโดยรวมของการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าเป็นอันดับแรก รองลงมาเป็นค่าขนส่งสินค้าที่ต่ำที่สุด และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เช่น งานวิจัยของ ดวงขวัญ (2554) ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาและทำการเปรียบเทียบสถานการณ์ (Scenarios) ต่าง ๆ ที่มีความเป็นไปได้ในการวิเคราะห์ในการหาจำนวนและทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าผลิตภัณฑ์น้ำตาล งานวิจัยของ จารุพงษ์ และคณะ (2560) ใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาการกำหนดทำเลที่ตั้งของคลังวัคซีนระดับภูมิภาคแต่ละแห่ง และค่าใช้จ่ายในการขนส่ง เพื่อกำหนดตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับที่ตั้งวัคซีนโรงพยาบาลชุมชนที่เหมาะสมในเขตกลุ่มจังหวัดนครชัยบุรินทร์ ให้มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุด และงานวิจัยของ Hafize & Ozgur (2016) ใช้รูปแบบการตัดสินใจหลายวัตถุประสงค์โดยการเขียนโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์ที่นำเสนอแบบจำลอง เพื่อลดระยะห่างระหว่างจุดอุปสงค์ ศูนย์กระจายสินค้าหลัก และลดจำนวนศูนย์กระจายสินค้าท้องถิ่นและคลังสินค้าหลัก

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาคำตอบที่ดีที่สุดของที่ตั้งที่เหมาะสมสำหรับศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ของจังหวัดอุตรดิตถ์ โดยการใช้โปรแกรม เอ็กเซลโซลเวอร์ (Excel solver) ในการประมวลผลข้อมูล

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมาย เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) วิเคราะห์หาที่ตั้งที่เหมาะสมสำหรับศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ของจังหวัด โดยจะเริ่มจากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง จากนั้นนำข้อมูลที่เกี่ยวข้องมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตรวจสอบและวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หากไม่ถูกต้องจึงทำการปรับปรุงแก้ไข เมื่อสมการทางคณิตศาสตร์ให้ผลคำตอบที่ถูกต้องแล้ว จากนั้นจะทำการประยุกต์ใช้เครื่องมือ Microsoft excel solver เพื่อหาคำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หลังจากนั้นจึงทำการสรุปผลและอภิปรายผล แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.2 ข้อมูลที่นำมาใช้สำหรับการวิจัย

สำหรับข้อมูลที่ถูกนำมาใช้เพื่อทดสอบสมการทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วย ต้นทุนการขนส่ง ต้นทุนการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้า ปริมาณความจุศูนย์กระจายสินค้า ปริมาณผลผลิตผักและผลไม้ ระยะทาง และเวลา แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ข้อมูลโครงสร้างต้นทุนสำหรับการวิเคราะห์

โครงสร้างต้นทุนการขนส่งด้วยรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซล (TC_a) *1

รายการ	รถ 4 ล้อ	รถ 6 ล้อ	รถ 10 ล้อ
ค่ารถและเครื่องมือ	0.88	2.18	4.21
ค่าทะเบียน	0.02	0.04	0.05
ค่าตรวจสภาพรถ	0.01	0.02	0.02
ค่าประกันภัย	0.22	0.52	0.75
ค่าพนักงานขับรถและผู้ช่วย	3.41	4.20	4.20
ค่าเชื้อเพลิง	2.33	3.77	6.12
ค่ายาง	0.14	0.28	0.29
ค่าน้ำมันหล่อลื่น	0.15	0.40	0.30
ค่าซ่อมรถและบำรุงรักษา	0.49	0.55	0.95
ค่าใช้จ่ายไม่มีใบเสร็จ	0.10	0.10	0.10
ค่าใช้จ่ายสำนักงาน	0.41	0.51	0.51
ต้นทุนการขนส่ง (บาท/กม.)	**8.16**	**12.57**	**17.50**
น้ำหนักบรรทุก (ตัน)	**2.5**	**8**	**15**
ต้นทุนการขนส่ง (บาท/ตัน-กม.)	**3.26**	**1.57**	**1.17**

ต้นทุนการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้า (F_j) และความสามารถสูงสุดในการรองรับสินค้า (K_j) *2

ต้นทุนการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้า (บาท)	ปริมาณความจุที่ศูนย์กระจายสินค้ารองรับได้ (ตัน)
8,600,000	500

หมายเหตุ

*1: กรมการขนส่งทางบก, (2559)

*2: มูลนิธิประเมินค่านายหน้าแห่งประเทศไทย, (2566); กฎกระทรวง ฉบับที่ 6, (2527)

F_j ของทุกอำเภอ เท่ากับ 8,600,000 บาท เท่ากันหมด

K_j ของทุกอำเภอ เท่ากับ 500 ตัน เท่ากันหมด

ตารางที่ 2 ข้อมูลปริมาณผลผลิตทางการเกษตรที่เก็บเกี่ยวได้ แบ่งออกเป็นข้อมูลผักและผลไม้ ทั้ง 9 อำเภอ ในจังหวัดอุตรดิตถ์ (d_i) (ตัน/สัปดาห์)

ประเภทสินค้าเกษตร		ปริมาณผลผลิตทางการเกษตรที่เก็บเกี่ยวได้ แต่ละอำเภอในจังหวัดอุตรดิตถ์ (d_i)								
		อ.เมือง	อ.ท่าปลา	อ.น้ำปาด	อ.ฟากท่า	อ.บ้านโคก	อ.ตรอน	อ.พิชัย	อ.ลับแล	อ.ทองแสนขัน
ผัก	ปี 2561	204,170.00	50.00	4,151,000.00	56,000.00	0.00	158,600.00	0.00	15,383,000.00	0.00
	ปี 2562	103,300.00	0.00	789,800.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2,016,000.00	0.00
	ปี 2563	286,310.00	16,000.00	2,611,000.00	0.00	0.00	31,000.00	0.00	3,613,500.00	12,000.00
	ปี 2564	56,500.00	0.00	6,600,000.00	395,600.00	0.00	15,150.00	0.00	8,075,000.00	0.00
	ปี 2565	126,800.00	0.00	0.00	126,000.00	0.00	0.00	5,472.00	8,792,250.00	0.00
	รวม	**777,080.00**	**16,050.00**	**14,151,800.00**	**577,600.00**	**0.00**	**204,750.00**	**5,472.00**	**37,879,750.00**	**12,000.00**
	เฉลี่ย/กิโลกรัม/ปี	**155,416.00**	**3,210.00**	**2,830,360.00**	**115,520.00**	**0.00**	**40,950.00**	**1,094.40**	**7,575,950.00**	**2,400.00**
	เฉลี่ย/ตัน/สัปดาห์	**2.99**	**0.06**	**54.43**	**2.22**	**0.00**	**0.79**	**0.02**	**145.69**	**0.05**
ผลไม้	ปี 2561	5,103,348.00	485,470.00	54,298,500.00	0.00	8,917,200.43	61,600.00	98,800.00	40,019,594.00	0.00
	ปี 2562	3,000.00	3,624,000.00	304,785.62	0.00	14,060,065.00	15,400.00	1,855,800.00	38,181,812.50	0.00
	ปี 2563	1,328,161.00	3,331,170.00	4,235,925.00	0.00	17,568,815.00	0.00	988,001.00	27,379,350.00	15,750.00
	ปี 2564	2,678,100.00	17,129,090.00	9,137,450.00	877,800.00	30,641,265.04	1,700.00	7,500,900.00	41,019,434.00	0.00
	ปี 2565	7,354.00	14,561,030.00	66,825,370.00	12,874,825.00	50,829,475.00	509,637.50	17,463,935.00	40,944,000.00	75,050.00
	รวม	**9,119,963.00**	**39,130,760.00**	**134,802,030.62**	**13,752,625.00**	**122,016,820.47**	**588,337.50**	**27,907,436.00**	**187,544,190.50**	**90,800.00**
	เฉลี่ย/กิโลกรัม/ปี	**1,823,992.60**	**7,826,152.00**	**26,960,406.12**	**2,750,525.00**	**24,403,364.09**	**117,667.50**	**5,581,487.20**	**37,508,838.10**	**18,160.00**
	เฉลี่ย/ตัน/สัปดาห์	**35.08**	**150.50**	**518.47**	**52.89**	**469.30**	**2.26**	**107.34**	**721.32**	**0.35**

ที่มา: กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, (2566)

ตารางที่ 3 ข้อมูลระยะทาง (S_{ij}) ระยะเวลา (T_{ij}) และต้นทุนการขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซล (C_{ij})

ต้นทาง	ปลายทาง	ระยะทาง (กิโลเมตร)	ระยะเวลา (นาที)	ต้นทุนรวมการขนส่ง (บาท)		
				รถ 4 ล้อ	รถ 6 ล้อ	รถ 10 ล้อ
อ.เมือง	อ.เมือง	18	26	147	226	315
	อ.ท่าปลา	42	41	343	528	735
	อ.น้ำปาด	78	89	636	980	1365
	อ.ฟากท่า	120	77	979	1508	2100
	อ.บ้านโคก	165	90	1346	2074	2888
	อ.ตรอน	21	82	171	264	368
	อ.พิชัย	44	53	359	553	770
	อ.ลับแล	8	23	65	101	140
	อ.ทองแสนขัน	38	61	310	478	665
อ.ท่าปลา	อ.ท่าปลา	16	101	131	201	280
	อ.น้ำปาด	56	144	457	704	980
	อ.ฟากท่า	97	48	792	1219	1698
	อ.บ้านโคก	144	42	1175	1810	2520
	อ.ตรอน	57	54	465	716	998
	อ.พิชัย	86	33	702	1081	1505
	อ.ลับแล	48	40	392	603	840
	อ.ทองแสนขัน	65	81	530	817	1138
อ.น้ำปาด	อ.น้ำปาด	26	66	212	327	455
	อ.ฟากท่า	41	76	335	515	718
	อ.บ้านโคก	89	74	726	1119	1558
	อ.ตรอน	77	46	628	968	1348
	อ.พิชัย	90	21	734	1131	1575
	อ.ลับแล	82	26	669	1031	1435
	อ.ทองแสนขัน	53	41	432	666	928
อ.ฟากท่า	อ.ฟากท่า	11	17	90	138	193
	อ.บ้านโคก	47	46	384	591	823
	อ.ตรอน	118	109	963	1483	2065
	อ.พิชัย	131	123	1069	1647	2293
	อ.ลับแล	123	116	1004	1546	2153
	อ.ทองแสนขัน	94	83	767	1182	1645
อ.บ้านโคก	อ.บ้านโคก	20	22	163	251	350
	อ.ตรอน	166	150	1355	2087	2905
	อ.พิชัย	179	203	1461	2250	3133
	อ.ลับแล	171	157	1395	2149	2993
	อ.ทองแสนขัน	141	128	1151	1772	2468
อ.ตรอน	อ.ตรอน	11	14	90	138	193
	อ.พิชัย	28	27	228	352	490
	อ.ลับแล	27	28	220	339	473
	อ.ทองแสนขัน	30	29	245	377	525
อ.พิชัย	อ.พิชัย	14	17	114	176	245
	อ.ลับแล	52	45	424	654	910
	อ.ทองแสนขัน	46	45	375	578	805
อ.ลับแล	อ.ลับแล	13	17	106	163	228
	อ.ทองแสนขัน	45	45	367	566	788
อ.ทองแสนขัน	อ.ทองแสนขัน	16	89	131	201	280

หมายเหตุ: การหาระยะทาง และระยะเวลาเป็นการคำนวณจาก Google map คำนวนแค่เฉพาะขาไปเท่านั้น (ต้นทาง-ปลายทาง)

3.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

นักวิจัยได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของที่ตั้งที่เหมาะสมสำหรับศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ ในจังหวัดอุตรดิตถ์ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

สมการที่ 1 สมการเป้าหมาย คือ การทำให้ต้นทุนรวมทั้งหมดต่ำที่สุด ประกอบด้วย ต้นทุนในการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้และต้นทุนในการขนส่งสินค้า

$$Total\ Cost = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} C_{ij}Y_{ij} + \sum_{j=1}^{m} F_j X_j \tag{1}$$

สมการที่ 2 สมการเป้าหมาย คือ การทำให้ระยะเวลาทั้งหมดต่ำที่สุด

$$Total\ Time = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} T_{ij}Y_{ij} \tag{2}$$

สมการที่ 3 แสดงปริมาณสินค้าที่จัดส่งไปยังศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้

$$Y_{ij} = d_i / Q_a \qquad ;\forall_i \tag{3}$$

สมการที่ 4 แสดงปริมาณสินค้าที่จัดส่งไปยังศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ j ต้องไม่เกินความจุของศูนย์กระจายสินค้าที่สามารถรองรับได้

$$Y_{ij} \le \sum_{j=1}^{m}\left(K_j / Q_a\right)X_j \qquad ;\forall_{ij} \tag{4}$$

ข้อจำกัด

การกำหนดตัวแปรต้องมากกว่าหรือเท่าศูนย์ และเป็นจำนวนเต็ม

$$Y_{ij} \ge 0 \ \ and\ integer \qquad ;\forall_{ij} \tag{5}$$

การกำหนดคุณสมบัติของตัวแปรตัดสินใจ

$$X_j \in \{0,1\} \qquad ;\forall_j \qquad (6)$$

โดยมีข้อสมมติฐาน ดังนี้

1) ลักษณะและปริมาณความจุสูงสุดของศูนย์กระจายสินค้าสามารถรองรับได้ในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งมีปริมาณอยู่ที่ 500 ตันต่อสัปดาห์

2) มีศูนย์กระจายสินค้า 1 แห่งต่ออำเภอ

3) จัดให้มีการขนส่งทุกสัปดาห์

4) รูปแบบที่ใช้ในการขนส่งกำหนดให้เป็นรถบรรทุก 4 ล้อ 6 ล้อ และ 10 ล้อ ใช้น้ำมันดีเซล

5) รถบรรทุกสามารถรับน้ำหนักการบรรทุกสินค้าในแต่ละรอบได้ไม่เกิน 2.5 ตัน 8 ตัน และ 15 ตัน ตามลำดับ

6) ค่าใช้จ่ายในการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ 8,600,000 บาท

โดยที่

i คือ อำเภอที่อยู่ในจังหวัดอุตรดิตถ์ โดยที่ i=1, 2, ..., n {1=อำเภอเมือง 2=อำเภอท่าปลา 3=อำเภอน้ำปาด 4=อำเภอฟากท่า 5=อำเภอบ้านโคก 6=อำเภอตรอน 7=อำเภอพิชัย 8=อำเภอลับแล 9=อำเภอทองแสนขัน}

j คือ ศูนย์กระจายสินค้า ณ อำเภอในจังหวัดอุตรดิตถ์ โดยที่ j=1, 2, ..., m {1=อำเภอเมือง 2=อำเภอท่าปลา 3=อำเภอน้ำปาด 4=อำเภอฟากท่า 5=อำเภอบ้านโคก 6=อำเภอตรอน 7=อำเภอพิชัย 8=อำเภอลับแล 9=อำเภอทองแสนขัน}

a คือ ประเภทของรถบรรทุกที่ใช้ในการขนส่งสินค้า โดยที่ a=1, 2 และ3 {1=รถบรรทุก 4 ล้อ 2=รถบรรทุก 6 ล้อ 3=รถบรรทุก 10 ล้อ}

n คือ จำนวนอำเภอที่อยู่ในจังหวัดอุตรดิตถ์

m คือ จำนวนศูนย์กระจายสินค้า ณ อำเภอในจังหวัดอุตรดิตถ์

C_{ij} คือ ต้นทุนการขนส่ง จากอำเภอ i ไปยัง ศูนย์กระจายสินค้า j (บาท/กิโลเมตร)

d_i คือ ปริมาณสินค้าที่ผลิตได้ของอำเภอ i (ตัน/สัปดาห์)

S_{ij} คือ ระยะทางจากจากอำเภอ i ไปยัง ศูนย์กระจายสินค้า j (กิโลเมตร)

TC_a คือ ต้นทุนการขนส่งสินค้าโดยรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซล (บาท/ตัน-กิโลเมตร)

Q_a คือ ปริมาณความจุสูงสุดของรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซล ที่สามารถรองรับได้ (ตัน)

F_j คือ ต้นทุนการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้า j (บาท)

K_j คือ ปริมาณความจุสูงสุดของศูนย์กระจายสินค้ารองรับได้ (ตัน/สัปดาห์)

T_{ij} คือ ระยะเวลาจากจากอำเภอ i ไปยัง ศูนย์กระจายสินค้า j (นาที)

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อถูกเลือกให้จัดตั้งเป็นศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้} \\ 0 & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$$

Y_{ij} คือ ปริมาณสินค้าที่ถูกจัดส่งจากอำเภอ i ไปยังศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ j (จำนวนรอบการขนส่ง)

4. ผลการวิจัย

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในครั้งนี้ ได้นำตัวแปรที่ทราบค่า ซึ่งประกอบด้วย โครงสร้างต้นทุนการขนส่งด้วยรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซล ต้นทุนการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้า และความสามารถสูงสุดในการรองรับสินค้าของศูนย์กระจายสินค้า ปริมาณผลผลิตทางการเกษตรที่เก็บเกี่ยวได้ ทั้ง 9 อำเภอ ของจังหวัดอุตรดิตถ์ ระยะทางและระยะเวลาระหว่างอำเภอ ในจังหวัดอุตรดิตถ์ ต้นทุนการขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซล โดยนำมาสร้างและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมถึงการนำโปรแกรม Microsoft Excel Solver ประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาต้นทุนโดยรวมที่ต่ำที่สุด และระยะเวลาโดยรวมที่น้อยที่สุด โดยมีผลลัพธ์ แสดงดังตารางที่ 4 และแสดงดังตารางที่ 5

5. อภิปรายผล

จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และนำไปประมวลผลโดยการประยุกต์ใช้โปรแกรม Microsoft excel solver เพื่อหาต้นทุนโดยรวมที่ต่ำที่สุด และระยะเวลาโดยรวมที่น้อยที่สุด ผลลัพธ์แสดงว่า การขนส่งสินค้าผักและผลไม้ด้วยรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซลแบบ 10 ล้อ เป็นรูปแบบการขนส่งที่เหมาะสมที่สุด นั่นคือมีต้นทุนโดยรวมที่ต่ำที่สุด และใช้ระยะเวลาโดยรวมน้อยที่สุด

ด้านต้นทุนโดยรวม พบว่า อำเภอเมือง อำเภอท่าปลา อำเภอน้ำปาด อำเภอบ้านโคก และอำเภอลับแล เป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการจัดตั้งให้เป็นศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ โดยมีต้นทุนโดยรวมที่ต่ำที่สุดในการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ เท่ากับ 46,066,154 บาท/ปี ประกอบด้วย ต้นทุนการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้า เท่ากับ 43,000,000 บาท และต้นทุนการขนส่งสินค้าเท่ากับ 3,066,154 บาท/ปี

ด้านระยะเวลาโดยรวม พบว่า ทุกอำเภอในจังหวัดอุตรดิตถ์ เป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการจัดตั้งเป็นศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ โดยมีระยะเวลาโดยรวมที่น้อยที่สุด เท่ากับ 45,344 นาที/ปี

ตารางที่ 4 แสดงผลลัพธ์ของต้นทุนโดยรวมที่ต่ำที่สุด ของศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ จังหวัดอุตรดิตถ์

สินค้าเกษตรชนิดผักและผลไม้ ขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุก 4 ล้อ

จำนวนรอบการขนส่งสินค้าจากอำเภอไปยังศูนย์กระจายสินค้า

อำเภอตั้งศูนย์กระจายสินค้า	1	2	3	4	5	6	7	8	9	รวม	การเลือก
1	-	-	-	-	-	-	43	157	-	200	✓
2	6	61	41	-	-	2	-	-	1	111	✓
3	-	-	189	11	-	-	-	-	-	200	✓
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	-	-	-	12	188	-	-	-	-	200	✓
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	10	-	-	-	-	-	-	190	-	200	✓
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
รวม	16	61	230	23	188	2	43	347	1	911	
ต้นทุนการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้า (บาท)										43,000,000.00	
ต้นทุนการขนส่งสินค้า (บาท/ปี)										8,087,352.00	
ต้นทุนรวม (บาท/ปี)										51,087,352.00	

สินค้าเกษตรชนิดผักและผลไม้ ขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุก 6 ล้อ

จำนวนรอบการขนส่งสินค้าจากอำเภอไปยังศูนย์กระจายสินค้า

อำเภอตั้งศูนย์กระจายสินค้า	1	2	3	4	5	6	7	8	9	รวม	การเลือก
1	-	-	-	-	-	-	14	49	-	63	✓
2	2	19	12	-	-	1	-	-	1	35	✓
3	-	-	60	3	-	-	-	-	-	63	✓
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	-	-	-	4	59	-	-	-	-	63	✓
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	3	-	-	-	-	-	-	60	-	63	✓
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
รวม	5	19	72	7	59	1	14	109	1	287	
ต้นทุนการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้า (บาท)										43,000,000.00	
ต้นทุนการขนส่งสินค้า (บาท/ปี)										3,948,050.96	
ต้นทุนรวม (บาท/ปี)										46,948,050.96	

สินค้าเกษตรชนิดผักและผลไม้ ขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุก 10 ล้อ

จำนวนรอบการขนส่งสินค้าจากอำเภอไปยังศูนย์กระจายสินค้า

อำเภอตั้งศูนย์กระจายสินค้า	1	2	3	4	5	6	7	8	9	รวม	การเลือก
1	-	-	-	-	-	-	8	26	-	34	✓
2	1	11	7	-	-	1	-	-	1	21	✓
3	-	-	32	2	-	-	-	-	-	34	✓
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	-	-	-	2	32	-	-	-	-	34	✓
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	2	-	-	-	-	-	-	32	-	34	✓
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
รวม	3	11	39	4	32	1	8	58	1	157	
ต้นทุนการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้า (บาท)										43,000,000.00	
ต้นทุนการขนส่งสินค้า (บาท/ปี)										3,066,154.00	
ต้นทุนรวม (บาท/ปี)										46,066,154.00	

หมายเหตุ: อำเภอ: 1=อ.เมือง 2=อ.ท่าปลา 3=อ.น้ำปาด 4=อ.ฟากท่า 5=อ.บ้านโคก 6=อ.ตรอน 7=อ.พิชัย 8=อ.ลับแล 9=อ.ทองแสนขัน

ตารางที่ 5 แสดงผลลัพธ์ของระยะเวลาโดยรวมที่น้อยที่สุด ของศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ จังหวัดอุตรดิตถ์

สินค้าเกษตรชนิดผักและผลไม้ ขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุก 4 ล้อ

จำนวนรอบการขนส่งสินค้าจากอำเภอไปยังศูนย์กระจายสินค้า

อำเภอตั้งศูนย์กระจายสินค้า	1	2	3	4	5	6	7	8	9	รวม	การเลือก
1	-	-	-	-	-	-	-	200	-	200	✓
2	-	61	-	-	-	-	-	-	-	61	✓
3	-	-	200	-	-	-	-	-	-	200	✓
4	-	-	30	23	-	-	-	-	-	53	✓
5	-	-	-	-	188	-	-	-	-	188	✓
6	-	-	-	-	-	2	-	-	-	2	✓
7	-	-	-	-	-	-	43	-	-	43	✓
8	16	-	-	-	-	-	-	147	-	163	✓
9	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	✓
รวม	16	61	230	23	188	2	43	347	1	911	
ระยะเวลารวม (นาที/ปี)										1,019,252.00	

สินค้าเกษตรชนิดผักและผลไม้ ขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุก 6 ล้อ

จำนวนรอบการขนส่งสินค้าจากอำเภอไปยังศูนย์กระจายสินค้า

อำเภอตั้งศูนย์กระจายสินค้า	1	2	3	4	5	6	7	8	9	รวม	การเลือก
1	-	-	-	-	-	-	-	63	-	63	✓
2	-	19	-	-	-	-	-	-	-	19	✓
3	-	-	63	-	-	-	-	-	-	63	✓
4	-	-	9	7	-	-	-	-	-	16	✓
5	-	-	-	-	59	-	-	-	-	59	✓
6	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	✓
7	-	-	-	-	-	-	14	-	-	14	✓
8	5	-	-	-	-	-	-	46	-	51	✓
9	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	✓
รวม	5	19	72	7	59	1	14	109	1	287	
ระยะเวลารวม (นาที/ปี)										320,528.00	

สินค้าเกษตรชนิดผักและผลไม้ ขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุก 10 ล้อ

จำนวนรอบการขนส่งสินค้าจากอำเภอไปยังศูนย์กระจายสินค้า

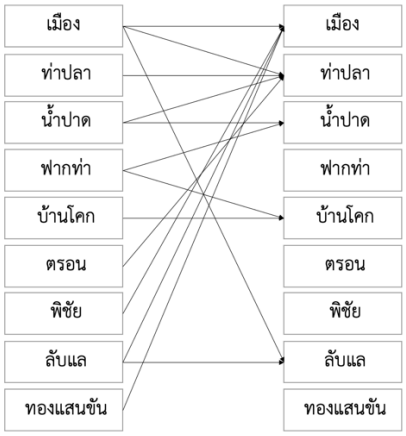
อำเภอตั้งศูนย์กระจายสินค้า	1	2	3	4	5	6	7	8	9	รวม	การเลือก
1	3	-	-	-	-	-	-	-	-	3	✓
2	-	11	-	-	-	-	-	-	-	11	✓
3	-	-	34	-	-	-	-	-	-	34	✓
4	-	-	5	4	-	-	-	-	-	9	✓
5	-	-	-	-	32	-	-	-	-	32	✓
6	-	-	-	-	-	1	-	24	-	25	✓
7	-	-	-	-	-	-	8	-	-	8	✓
8	-	-	-	-	-	-	-	34	-	34	✓
9	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	✓
รวม	3	11	39	4	32	1	8	58	1	157	
ระยะเวลารวม (นาที/ปี)										45,344.00	

หมายเหตุ: อำเภอ: 1=อ.เมือง 2=อ.ท่าปลา 3=อ.น้ำปาด 4=อ.ฟากท่า 5=อ.บ้านโคก 6=อ.ตรอน 7=อ.พิชัย 8=อ.ลับแล 9=อ.ทองแสนขัน

6. สรุปผลการวิจัย

จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาที่ตั้งที่เหมาะสมของศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ ของจังหวัดอุตรดิตถ์ พบว่า ศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ที่อำเภอเมือง อำเภอท่าปลา อำเภอน้ำปาด อำเภอบ้านโคก และอำเภอลับแล เป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการจัดตั้งเป็นศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ เพื่อให้ระบบการดำเนินการภาคการเกษตรของจังหวัดอุตรดิตถ์มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยมีต้นทุนโดยรวมทั้งหมด เท่ากับ 46,066,154 บาท/ปี และ ทุกอำเภอในจังหวัดอุตรดิตถ์ เป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการจัดตั้งเป็นศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ โดยมีระยะเวลาโดยรวมที่น้อยที่สุด คือ 45,344 นาที/ปี

จะพบว่า มีพื้นที่ 5 อำเภอที่เหมาะสมที่สุดในการจัดตั้งให้เป็นศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้ จากทั้งปัจจัยด้านต้นทุนโดยรวมและด้านระยะเวลาโดยรวม ได้แก่ อำเภอเมือง อำเภอท่าปลา อำเภอน้ำปาด อำเภอบ้านโคก และอำเภอลับแล แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 เส้นทางการกระจายสินค้าจากอำเภอไปยังศูนย์กระจายสินค้าผักและผลไม้

7. ข้อเสนอแนะ

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเลือกหาทำเลที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าใหม่ หรือเพื่อเป็นแนวทางในการสนับสนุนการเลือกทำเลที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าที่มีอยู่เดิม ในจังหวัดอื่น ๆ ได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโจทย์ปัญหาตามบริบทของพื้นที่ และสามารถนำผลวิจัยไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการวางแผนให้สอดคล้องกับบริบทและความต้องการของพื้นที่ได้

8. กิตติกรรมประกาศ

วารสารฉบับนี้สำเร็จล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณาจากคณะโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการศึกษางานวิจัยนี้ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงครามที่ได้ให้งานวิจัยฉบับนี้ได้ตีพิมพ์ในวารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม อีกทั้งต้องขอขอบพระคุณ ดร.บุญทรัพย์ พานิชการ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาเป็นที่ปรึกษา พร้อมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเป็นอย่างดี และขอกราบขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำตลอดจนแนะแนวทางการแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัย ทำให้วิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ หน่วยงานต่าง ๆ ภายในจังหวัดอุตรดิตถ์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยซาบซึ้งและขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่วิจัยฉบับนี้ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

8. เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2566). **ระบบให้บริการข้อมูลสารสนเทศการผลิตทางด้านการเกษตร**. ค้นจาก https://production.doae.go.th.

กรมการขนส่งทางบก. (2559). **โครงการการศึกษาต้นทุนการขนส่งและกระจายสินค้าเพื่อรองรับการพัฒนาสถานีขนส่งสินค้าทั่วประเทศ.** (รายงานอัตราค่าขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุกของประเทศไทย). ค้นจาก https://www.thaitruckcenter.com.

กฎกระทรวงฉบับที่ 6. (2527). **พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522**. ค้นจาก https://download.asa.or.th/03media/04law/cba/mr27-06.pdf.

กิตติพงษ์ รักษ์เจริญ. (2557). **การศึกษาระบบการขนส่งและเลือกทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้า กรณีศึกษาธุรกิจรับจัดการจนส่งสินค้าของธุรกิจค้าปลีก**. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์, กรุงเทพฯ.

กลุ่มงานยุทธศาสตร์และข้อมูลเพื่อการพัฒนาจังหวัด. (2562). **ข้อมูลด้านการเกษตรที่สำคัญของจังหวัดอุตรดิตถ์**. ค้นจาก https://www.opsmoac.go.th/uttaradit-dwl-files-431891791919.

จารุพงษ์ บรรเทา, พงษ์ศักดิ์ นาใจคง, ธัญชนก งามสมโภชน์, เสาวลักษณ์ อาจใจ และณัฐิญา วงละคร. (2560, กรกฎาคม). **ตัวแบบการกำหนดที่ตั้งคลังวัคซีน กรณีศึกษาโรงพยาบาลในเขตจังหวัดนครราชสีมา**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 8, มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, ขอนแก่น.

จุฑามาศ อินทร์แก้ว. (2556). **การวิเคราะห์ปัจจัยการเลือกทำเลที่ตั้งสาขา กรณีศึกษา หจก. เอสเอส ค้าไม้ จังหวัดสุราษฎร์ธานี**. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, กรุงเทพฯ.

ณภัทร ศรีนวล, อดุลย์ นงภา, สิทธิโชค สินรัตน์, แววมยุรา คาสุข และพิมสหรา ยาคล้าย. (2559). การประยุกต์ใช้กระบวนการลาดับชั้นเชิงวิเคราะห์ปัจจัยในการเลือกทำเลที่ตั้งของคลังสินค้า. **วารสารธุรกิจปริทัศน์**, 8(2), 75-90.

ดวงขวัญ รณฤทธิวิชัย. (2554). **การวิเคราะห์หาจำนวนและที่ตั้งที่เหมาะสมของศูนย์กระจายสินค้าผลิตภัณฑ์น้ำตาล ด้วยวิธีออพติไมเซชัน**. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

มูลนิธิประเมินค่า-นายหน้าแห่งประเทศไทย. (2566). **ราคาประเมินค่าก่อสร้างอาคาร**. ค้นจาก https://www.thaiappraisal.org/thai/value/value.php.

ยุพิน วงษ์วิลาศ. (2557). **การวิเคราะห์การเลือกที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้า กรณีศึกษาธุรกิจบริการจัดส่ง และกระจายสินค้าอุปโภคบริโภค**. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี.

อุทัย มิตรช่วยรอด, พงศ์ หรดาล และสมเดช เฉยไสย. (2554). การศึกษาทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายน้ำมันในภาคตะวันออกของประเทศไทย. **วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา**, 5(1), 94- 100.

Anthony, R., & Vaidyanathan, J. (2008). An evaluation of new heuristics for the location of cross-docks distribution centers in supply chain network design. **Computers & Industrial Engineering**. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.12.001.

Esther, S., Rafael, B.C., & Angélica, L. (2014). Dynamic Location of Distribution Centers, a Real Case Study. **Transportation Research Procedia**, 3, 547-554.

Hafize, Y., & Özgür, K. (2016). A Multiple Objective Mathematical Program to Determine Locations of Disaster Response Distribution Centers. **IFAC- PapersOnLine**, 49(12), 520-525.

Nona, O. (2015). **Determining the Optimal Distribution Center Location**. (Master's thesis). Tampere University of Technology, Finland.

Yingfeng, J., Hualong, Y., Yan, Z., & Weixin, Z. (2013). Location Optimization Model of Regional Express Distribution Center. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, 96, 1008-1013.

แบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มสำหรับการวางแผนการจัดหาวัตถุดิบในการผลิตอาหารสัตว์

MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING FOR RESOURCE PROCUREMENT PLANNING IN SILAGE PRODUCTION

กัญญาณัฐ น่วมอิ่ม, ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ*
Gunyanat Noamim, Sirikarn Chansombat*
คณะโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000
Faculty of Logistics and Digital Supply Chain, Naresuan University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000
*Corresponding author e-mail: sirikarnc@nu.ac.th

วันที่เข้าระบบ 17 ธันวาคม 2566
วันที่แก้ไขบทความ 31 มกราคม 2567
วันที่ตอบรับบทความ 12 กุมภาพันธ์ 2567

บทคัดย่อ

อาหารสัตว์ที่ทำจากข้าวโพด เป็นอาหารสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้องที่มีคุณภาพสูงและได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ในการผลิตอาหารสัตว์ที่ทำจากข้าวโพด ปัญหาหลัก คือ การขาดแคลนวัตถุดิบเพื่อมาทำการผลิต นั่นคือ ต้นข้าวโพด วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ คือ ช่วยทำให้การจัดหาวัตถุดิบเพื่อการผลิตสำหรับโรงงานผลิตอาหารสัตว์ที่ทำจากข้าวโพดนั้นดียิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed integer linear programming: MILP) เพื่อแก้ปัญหาการจัดสรรรถบรรทุก พร้อมทั้งช่วยในการตัดสินใจด้านการวางแผนการจัดหาวัตถุดิบสำหรับโรงงานผลิตอาหารสัตว์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นที่ต่ำที่สุด ประกอบด้วย ต้นทุนการขนส่งและต้นทุนการจัดหาวัตถุดิบ อีกทั้งยังมีการพิจารณาด้านความต้องการวัตถุดิบ ความต้องการของลูกค้า แหล่งที่มาของวัตถุดิบ ความสามารถในการผลิต และการตัดสินใจด้านการวางแผนการขนส่งด้วยยานพาหนะที่หลากหลาย แบบจำลองที่ถูกนำเสนอนั้นได้ถูกทดสอบด้วยการใช้ข้อมูลจากโรงงานผลิตอาหารสัตว์ที่ทำจากต้นข้าวโพดในจังหวัดสุโขทัย ประเทศไทย ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ Microsoft excel solver ในการค้นหาคำตอบ ผลลัพธ์ที่ได้ พบว่า ต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด คือ 318,757.60 บาท ซึ่งแบ่งเป็นต้นทุนในการขนส่งต้นข้าวโพดสดจากพื้นที่ปลูกมายังโรงงาน คือ 7,507.60 บาท และต้นทุนในการซื้อต้นข้าวโพดสด คือ 311,250 บาท โดยสรุปแบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มที่งานนี้ได้นำเสนอ สามารถใช้หารูปแบบของการขนส่งที่ทำให้เกิดต้นทุนที่เหมาะสมและมีความถูกต้องที่จะนำไปปรับใช้กับปัญหาในสถานการณ์จริงได้

คำสำคัญ: แบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม, อาหารสัตว์, การวางแผนการจัดหา, การจัดสรรรถบรรทุก

Abstract

Corn silage, a high-quality animal feed is well-known for ruminants. In corn silage production, the main problem is the lack of corn plants. The purpose of this study is to reinforce procurement management for a corn silage production company. This research implemented mixed integer linear programming (MILP) to solve the truck allocation problem and simultaneously helping make decisions in the resource procurement selection planning, aiming to minimize total cost regarding transportation and procurement costs, resource demand, customer demand, supply sources, production capacity, and transport planning decisions for different vehicles. Regarding the test of the proposed model, it used the data obtained from a corn silage production company in Sukhothai province, Thailand, and employed Microsoft Excel Solver to find the solutions. The results found that the minimum total costs were 318,757.60 Baht, comprising transportation costs from the planting areas to the plant of 7,507.60 Baht and resource purchasing costs of 311,250 Baht. In conclusion, this research has proposed that mixed integer linear programming can gain a suitable and exact cost for a real-world application.

Keywords: Mixed integer linear programming, Silage, Procurement planning, Truck allocation

1. บทนำ

การจัดการโซ่อุปทาน (Supply chain management) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการบริหารจัดการเชิงกลยุทธ์ที่ถูกใช้เพื่อเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้า ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันและผลกำไรที่จะได้รับของบริษัทได้ (Giunipero & Brand, 1996) ด้วยความที่โซ่อุปทานมีลักษณะเป็นพลวัต (Dynamic) ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของข้อมูล ผลิตภัณฑ์ และเงินลงทุนในแต่ละขั้นตอนที่แตกต่างกัน ซึ่งกิจกรรมในโซ่อุปทานนั้นจะเริ่มต้นเมื่อเกิดคำสั่งซื้อของลูกค้าและสิ้นสุดลงเมื่อลูกค้าได้รับผลิตภัณฑ์ตามความต้องการ (Chopra & Meindl, 2016)

การจัดหาวัตถุดิบ (Procurement) เป็นจุดเชื่อมโยงที่สำคัญในโซ่อุปทานที่เป็นการเชื่อมโยงระหว่างผู้จัดหาวัตถุดิบ (Supplier) กับผู้ผลิต (Manufacturer) เนื่องจากการจัดหาวัตถุดิบสามารถมีอิทธิผลต่อความสำเร็จขององค์กรได้ และสิ่งสำคัญของการจัดหาวัตถุดิบ คือ ต้องมีอุปทาน (Supply) ของวัตถุดิบในปริมาณที่เพียงพอต่อกระบวนการผลิตในราคาที่เหมาะสม รวมถึงมีคุณภาพตรงตามที่กำหนดอีกด้วย ดังนั้นเพื่อให้สามารถจัดหาวัตถุดิบได้อย่างเพียงพอต่อกระบวนการผลิต ไม่ให้

กระบวนการผลิตต้องเกิดการหยุดชะงัก กระบวนการในการจัดหาวัตถุดิบจึงเป็นกระบวนการที่สำคัญต่อความสำเร็จขององค์กร

โรงงานกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นโรงงานผู้ผลิตอาหารสัตว์ที่มีวัตถุดิบหลัก คือ ต้นข้าวโพดสด ด้วยความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบันในการใช้อาหารสัตว์ที่ทำจากข้าวโพดเพื่อการเลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้องนั้น ทำให้โรงงานกรณีศึกษามีคำสั่งซื้อจากลูกค้าในปริมาณมาก แต่ทางโรงงานประสบปัญหาด้านวัตถุดิบเพื่อใช้ในการผลิต ก่อให้เกิดปัญหาการใช้งานเครื่องจักรได้อย่างไม่เต็มความสามารถ (Max utilization of machine) อีกทั้งยังไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าที่มีเพิ่มมากขึ้นได้ ทำให้ขาดความสมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อหาแนวทางในการตัดสินใจในการวางแผนการจัดหาวัตถุดิบเพื่อให้เกิดต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด โดยคำนึงถึงขีดความสามารถที่มีอยู่อย่างจำกัด

ในการแก้ปัญหาการจัดหาวัตถุดิบ (Procurement problem) ได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการในการหาค่าคำตอบที่หลากหลาย โปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก มีการประยุกต์ใช้โปรแกรมเชิงเส้นเพื่อช่วยในการจัดหาและเคลื่อนย้ายถ่านหินสำหรับโรงผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินในประเทศอินเดีย ซึ่งผลลัพธ์นั้นช่วยทำให้ต้นทุนทางด้านโลจิสติกส์ลดลง (Subrata & Balram, 2018) มีการประยุกต์ใช้โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear program) ในการเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบและเพื่อการจัดสรรคำสั่งซื้อจากความต้องการของตลาด ซึ่งผลลัพธ์ของแบบจำลองช่วยทำให้เกิดความสมดุลระหว่างคำสั่งซื้อและการคัดเลือกผู้จัดหาได้ (Ashish *et al*., 2017)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโซ่อุปทานในส่วนของโลจิสติกส์ขาเข้า (Inbound logistics) โดยพิจารณาการจัดหาวัตถุดิบ ซึ่งเป็นต้นข้าวโพดสดเพื่อทำการผลิตอาหารสัตว์ของโรงงานกรณีศึกษา เพื่อให้สามารถมีวัตถุดิบที่เพียงพอต่อการผลิตและสามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

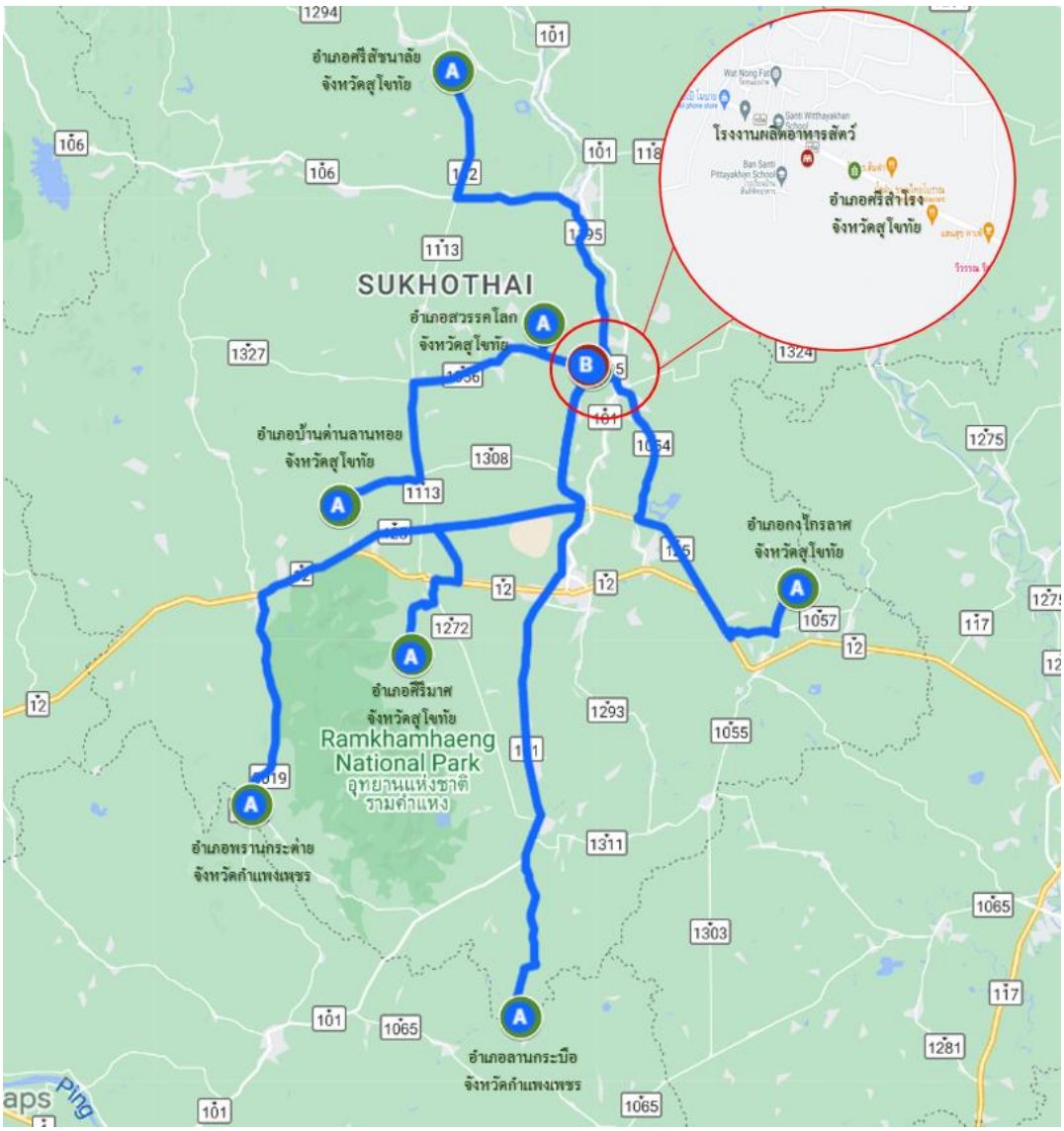
เพื่อพัฒนาแบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed integer linear programming: MILP) เพื่อแก้ปัญหาการจัดสรรรถบรรทุก พร้อมทั้งช่วยในการตัดสินใจด้านการวางแผนการจัดหาวัตถุดิบสำหรับโรงงานผลิตอาหารสัตว์

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

สำหรับวิธีดำเนินงานวิจัยในการพัฒนาแบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มเพื่อแก้ปัญหาการจัดสรรรถบรรทุก พร้อมทั้งช่วยในการตัดสินใจด้านการวางแผนการจัดหาวัตถุดิบสำหรับบริษัทผู้ผลิตอาหารสัตว์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นที่ต่ำที่สุด ประกอบด้วย ต้นทุนการขนส่งและต้นทุนการจัดหาวัตถุดิบ อีกทั้งยังมีการพิจารณาด้านความต้องการวัตถุดิบ ความต้องการของลูกค้า แหล่งที่มาของวัตถุดิบ ความสามารถในการอุปทาน ความสามารถในการผลิต และการตัดสินใจด้านการวางแผนการขนส่งด้วยยานพาหนะที่หลากหลาย มีรายละเอียดดังนี้

3.1 ศึกษาปัญหาและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

จากการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นของโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งเป็นโรงงานผลิตอาหารสัตว์ ตั้งอยู่ที่อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย การดำเนินงานในปัจจุบัน ประสบปัญหาด้านวัตถุดิบเพื่อใช้สำหรับการผลิตไม่เพียงพอ นั่นคือ ต้นข้าวโพดสด โดยปกติแล้วจะมีต้นข้าวโพดสดที่ป้อนเข้าสู่โรงงานเพื่อทำการผลิต โดยเฉลี่ยประมาณ 15,000 กิโลกรัมต่อวัน เนื่องจากการจัดหาจัดซื้อต้นข้าวโพดในปัจจุบันนั้นเป็นการจัดหาจัดซื้อจากพื้นที่ใกล้เคียงโรงงานเท่านั้น แต่กำลังการผลิต (Production capacity) ของโรงงาน สามารถรองรับปริมาณต้นข้าวโพดสดเพื่อมาทำการผลิตได้มากถึง 25,000 กิโลกรัมต่อวัน อีกทั้งปริมาณความต้องการอาหารสัตว์ที่ทำจากต้นข้าวโพดนั้นมีสูงขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นทางโรงงานจึงมีความต้องการในการตัดสินใจด้านการวางแผนการจัดหาวัตถุดิบให้เพิ่มมากขึ้น พร้อมทั้งการตัดสินใจด้านการวางแผนการขนส่งด้วยยานพาหนะที่หลากหลายที่มีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งปัจจุบันโรงงานมียานพาหนะเพื่อใช้ในการขนส่งต้นข้าวโพดอยู่ 3 ชนิด นั่นคือ รถบรรทุก 10 ล้อ จำนวน 2 คัน รถบรรทุก 6 ล้อ จำนวน 3 คัน และรถบรรทุก 4 ล้อ จำนวน 5 คัน ซึ่งแต่ละคันมีความจุในการบรรทุกแตกต่างกัน คือ 20,000 กิโลกรัมต่อคัน 7,000 กิโลกรัมต่อคัน และ 4,000 กิโลกรัมต่อคัน ตามลำดับ ยานพาหนะแต่ละชนิดมีต้นทุนการขนส่ง ดังนี้ รถบรรทุก 10 ล้อ คือ 17.5 บาทต่อกิโลเมตร รถบรรทุก 6 ล้อ คือ 12.57 บาทต่อกิโลเมตร และรถบรรทุก 4 ล้อ คือ 8.16 บาทต่อกิโลเมตร (สำนักงานขนส่งสินค้า กรมการขนส่งทางบก, 2560) ในแผนการขยายพื้นที่การรับซื้อต้นข้าวโพดสดของโรงงาน มีแผนการขยายการรับซื้อภายในระยะทางไม่เกินกว่า 100 กิโลเมตรจากโรงงาน (จุด B) จากการสำรวจข้อมูล พบว่า มีแหล่งปลูกต้นข้าวโพดสดเพื่อไว้สำหรับผลิตเป็นอาหารสัตว์ทั้งสิ้น 8 พื้นที่ ครอบคลุม 2 จังหวัด ทั้งในจังหวัดสุโขทัยและจังหวัดกำแพงเพชร (จุด A) แสดงในภาพที่ 1 สำหรับรายละเอียดข้อมูลของพื้นที่ปลูกต้นข้าวโพดในแต่ละพื้นที่ แสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 1 เส้นทางจากโรงงานและพื้นที่ปลูกต้นข้าวโพด

ตารางที่ 1 ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลของพื้นที่ปลูกต้นข้าวโพดในแต่ละพื้นที่

พื้นที่	รายละเอียดพื้นที่	ระยะทางจากโรงงาน (กิโลเมตร)	ปริมาณต้นข้าวโพดที่มี (กิโลกรัม)
1	อ. ศรีสัชนาลัย จ. สุโขทัย	68.2	2,000
2	อ. บ้านด่านลานหอย จ. สุโขทัย	42	3,000
3	อ. กงไกรลาศ จ. สุโขทัย	43.5	4,000
4	อ. คีรีมาศ จ. สุโขทัย	51.3	3,000
5	อ. ศรีสำโรง จ. สุโขทัย	5	5,000

6	อ. สวรรคโลก จ. สุโขทัย	26.5	5,000
7	อ. พรานกระต่าย จ. กำแพงเพชร	97.9	1,500
8	อ. ลานกระบือ จ. กำแพงเพชร	85.9	3,000
	รวม	420.30	**26,500**

3.2 การพัฒนาแบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม

จากข้อมูลที่สามารถเก็บรวบรวมได้จากในหัวข้อที่ 3.1 ได้ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed integer linear programming: MILP) ซึ่งเป็นการออกแบบแบบจำลองเพื่อให้เหมาะสมกับข้อมูลของโรงงานกรณีศึกษา มีรายละเอียดดังนี้

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. โรงงานมีพื้นที่รองรับต่อปริมาณต้นข้าวโพดสดที่ถูกจัดส่งเข้ามาอย่างเพียงพอ
2. พื้นที่ปลูกต้นข้าวโพดจะมียานพาหนะเพียงชนิดเดียวเท่านั้นที่เข้าไปรับซื้อต้นข้าวโพดสด
3. การขนส่งต้นข้าวโพดสามารถขนส่งได้เต็มความจุของยานพาหนะแต่ละประเภท โดยในระหว่างการขนส่งไม่มีการสูญหายในระหว่างการขนส่ง
4. ปริมาณความต้องการต้นข้าวโพดสดของโรงงานกรณีศึกษาสามารถรู้ล่วงหน้าได้และมีปริมาณที่แน่นอน
5. ต้นข้าวโพดสดถูกตัดและพร้อมต่อการขนส่งแล้ว
6. ยานพาหนะแต่ละชนิดที่มีอยู่พร้อมต่อการใช้งาน

ดัชนี (Indices)

i คือ พื้นที่ปลูกต้นข้าวโพดสด โดยที่ $i = 1, 2, \ldots, I$

j คือ โรงงาน โดยที่ $j = 1, 2, \ldots, J$

v คือ ชนิดของยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่ง โดยที่ $v = 1, 2, \ldots, V$

ตัวแปรทราบค่า (Parameters)

I คือ จำนวนพื้นที่ปลูกต้นข้าวโพดสด

J คือ จำนวนโรงงาน

V คือ จำนวนชนิดของยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่ง

D คือ ปริมาณความต้องการต้นข้าวโพดสดของโรงงาน (กิโลกรัม)

RT คือ จำนวนรอบการขนส่ง (รอบ)

RC คือ ต้นทุนในการซื้อต้นข้าวโพดสด (บาทต่อกิโลกรัม)

CAP_v คือ ความจุของยานพาหนะชนิด v (กิโลกรัม)

N_v คือ จำนวนยานพาหนะในแต่ละชนิด

T_{ij} คือ ระยะทางขนส่งต้นข้าวโพดสดจากพื้นที่ปลูก i ไปยังโรงงาน j (กิโลเมตร)

TC_v คือ ต้นทุนในการขนส่งต้นข้าวโพดสดด้วยยานพาหนะชนิด v (บาทต่อกิโลเมตร)

S_i คือ ปริมาณต้นข้าวโพดสดที่พร้อมต่อการจัดส่งจากพื้นที่ปลูก i

ตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variables)

$$Y_{ijv} = \begin{cases} 1 & \text{ถ้ามีการขนส่งต้นข้าวโพดสดจากพื้นที่ปลูก } i \text{ ไปยังโรงงาน } j \text{ ด้วยยานพาหนะชนิด } v \\ 0 & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$$

X_{ijv} ปริมาณต้นข้าวโพดสดจากพื้นที่ปลูก i ไปยังโรงงาน j ด้วยยานพาหนะชนิด v

โดยมีรูปแบบของแบบจำลองกำหนดการทางคณิตศาสตร์ ดังต่อไปนี้

$$Minimize: RC\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{v=1}^{V} X_{ijv}Y_{ijv} + RT\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{v=1}^{V} T_{ij}TC_vY_{ijv} \tag{1}$$

เงื่อนไขข้อบังคับ (Constraints):

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} Y_{ijv} \le N_v \qquad \forall v, \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{v=1}^{V} Y_{ijv} = 1 \qquad \forall i, \tag{3}$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{v=1}^{V} X_{ijv}Y_{ijv} \le S_i \qquad \forall i, \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{v=1}^{V} X_{ijv}Y_{ijv} = D \qquad \forall i, j, v, \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{v=1}^{V} X_{ijv}Y_{ijv} \le CAP_v \qquad \forall v, \tag{6}$$

$$Y_{ijv} \in \{0,1\} \qquad \forall i, j, v, \tag{7}$$

$$X_{ijv} \ge 0 \quad \text{and integer} \qquad \forall i, j, v \tag{8}$$

โดยสมการและอสมการต่าง ๆ สามารถอธิบายอย่างละเอียด ดังนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ (1) แสดงถึงต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด ซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนในการซื้อต้นข้าวโพดสดและต้นทุนในการขนส่งต้นข้าวโพดสดจากพื้นที่ปลูกมายังโรงงาน

อสมการที่ (2) แสดงถึงจำนวนยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งต้นข้าวโพดสดจากพื้นที่ปลูกมายังโรงงานจะต้องไม่เกินจำนวนยานพาหนะที่มี

สมการที่ (3) แสดงถึงในแต่ละพื้นที่ปลูกจะจำกัดให้ยานพาหนะเพียงชนิดเดียวและคันเดียวเท่านั้นในการเข้าไปรับต้นข้าวโพดสด

อสมการที่ (4) แสดงถึงปริมาณต้นข้าวโพดสดที่รับซื้อจากแต่ละพื้นที่จะต้องมีปริมาณไม่เกินกว่าปริมาณต้นข้าวโพดสดที่มี

สมการที่ (5) แสดงถึงปริมาณต้นข้าวโพดสดที่รับซื้อจากแต่ละพื้นที่จะต้องมีเท่ากับปริมาณความต้องการต้นข้าวโพดสดของโรงงาน

อสมการที่ (6) แสดงถึงปริมาณต้นข้าวโพดสดที่รับซื้อจากแต่ละพื้นที่ปลูกมายังโรงงานด้วยยานพาหนะต่าง ๆ จะต้องไม่เกินความจุของยานพาหนะนั้น

ข้อจำกัดที่ (7) การกำหนดคุณสมบัติของตัวแปรการตัดสินใจ

ข้อจำกัดที่ (8) การกำหนดตัวแปรต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0 และเป็นจำนวนเต็ม

3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ได้มีการแทนค่าพารามิเตอร์เพื่อตรวจสอบคำตอบที่ได้รับ เพื่อดูว่าแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นมานั้นสามารถให้คำตอบที่ถูกต้องกับสมการเงื่อนไขและมีผลลัพธ์ที่ถูกต้องหรือไม่

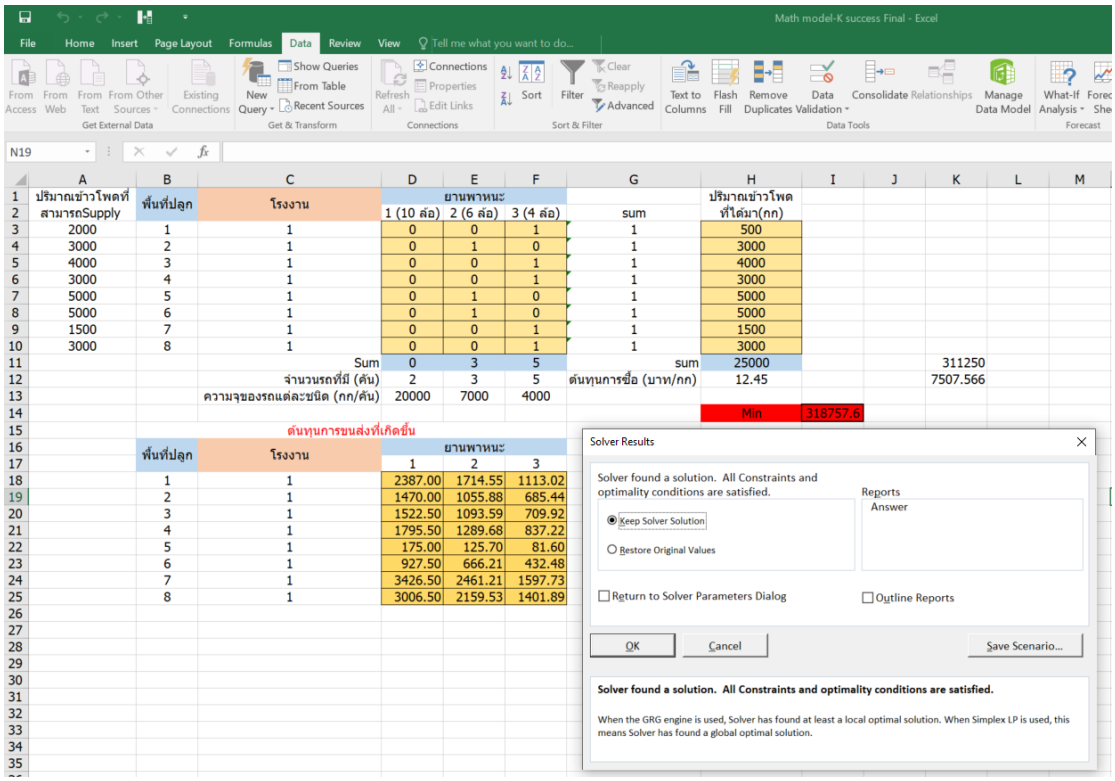
3.4 สรุปผล

ในขั้นตอนของการสรุปผล เป็นการนำเอาผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มที่ถูกพัฒนาขึ้นนำมาแปรผลเพื่อให้สามารถเป็นข้อมูลป้อนกลับไปยังโรงงานกรณีศึกษาสู่การนำไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์จริงต่อไป

4. ผลการวิจัย

จากแบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มที่ถูกพัฒนาขึ้น งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม Solver ซึ่งเป็น Add-in ใน Microsoft excel เป็นเครื่องมือในการค้นหาคำตอบที่รันบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพาที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) แบบ Intel(R) Core(TM) i5-8250U ด้วยความถี่ 1.80 GHz และมีหน่วยความจำ (RAM) 8.00 GB บนระบบปฏิบัติการ Windows 10 โดยข้อมูลที่นำมาใช้ในการทดสอบแบบจำลอง เป็นข้อมูลจริงของโรงงานกรณีศึกษาและข้อมูลที่ได้ศึกษา

รวบรวมมา จากการทดสอบแบบจำลองด้วย Microsoft excel solver พบว่า เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ คือ 0.047 วินาที และผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง พบว่า ต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด คือ 318,757.60 บาท ซึ่งแบ่งเป็นต้นทุนในการซื้อต้นข้าวโพดสด คือ 311,250 บาท และ ต้นทุนในการขนส่งต้นข้าวโพดสดจากพื้นที่ปลูกมายังโรงงาน คือ 7,507.60 บาท โดยเลือกใช้ยานพาหนะเพื่อการขนส่งต้นข้าวโพดสดเป็นรถบรรทุก 4 ล้อ ทั้งหมด 5 คัน และรถบรรทุก 6 ล้อ ทั้งหมด 3 คัน ซึ่งเป็นการใช้แบบเต็มขีดข้อจำกัดที่มี ซึ่งรถบรรทุก 4 ล้อทั้ง 5 คัน ได้ถูกเลือกเพื่อให้ไปรับซื้อต้นข้าวโพดสดในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย ประกอบด้วย อำเภอศรีสัชนาลัย อำเภอกงไกรลาศ และอำเภอคีรีมาศ และพื้นที่จังหวัดกำแพงเพชร ประกอบด้วย อำเภอพรานกระต่ายและอำเภอลานกระบือ และรถบรรทุก 6 ล้อทั้ง 3 คัน ได้ถูกเลือกเพื่อไปรับซื้อต้นข้าวโพดสดในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย ประกอบด้วย อำเภอศรีสัชนาลัย อำเภอศรีสำโรง และอำเภอสวรรคโลก โดยรถบรรทุก 10 ล้อที่มีอยู่จำนวน 2 คัน ไม่ถูกเลือกเพื่อนำมาใช้ในการขนส่งต้นข้าวโพดสด รายละเอียดของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วย Microsoft excel solver แสดงในตารางที่ 2



ภาพที่ 2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วย Microsoft excel solver

ตารางที่ 2 ตารางแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วย Microsoft excel solver

พื้นที่	รายละเอียดพื้นที่	ต้นทุนการขนส่งต้นข้าวโพดสด (บาท)			ปริมาณต้นข้าวโพดที่รับซื้อ
		10 ล้อ	6 ล้อ	4 ล้อ	(กิโลกรัม)
1	อ. ศรีสัชนาลัย จ. สุโขทัย			113.02	500
2	อ. บ้านด่านลานหอย จ. สุโขทัย		055.88		3,000
3	อ. กงไกรลาศ จ. สุโขทัย			’09.92	4,000
4	อ. คีรีมาศ จ. สุโขทัย			ȝ37.22	3,000
5	อ. ศรีสำโรง จ. สุโขทัย		.25.70		5,000
6	อ. สวรรคโลก จ. สุโขทัย		ȝ66.21		5,000
7	อ. พรานกระต่าย จ. กำแพงเพชร			597.73	1,500
8	อ. ลานกระบือ จ. กำแพงเพชร			401.89	3,000
	รวม	**0**	**847.79**	**659.78**	**25,000**

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed integer linear programming: MILP) เพื่อแก้ปัญหาการจัดสรรรถบรรทุก พร้อมทั้งช่วยในการตัดสินใจด้านการวางแผนการจัดหาวัตถุดิบสำหรับโรงงานผลิตอาหารสัตว์ ซึ่งเป็นโรงงานกรณีศึกษา เนื่องจากประสบปัญหาด้านวัตถุดิบเพื่อใช้สำหรับการผลิตไม่เพียงพอ นั่นคือ ต้นข้าวโพดสด โดยปกติแล้วจะมีต้นข้าวโพดสดที่ป้อนเข้าสู่โรงงานเพื่อทำการผลิต โดยเฉลี่ยประมาณ 15,000 กิโลกรัมต่อวัน เนื่องจากการจัดหาจัดซื้อต้นข้าวโพดในปัจจุบันนั้นเป็นการจัดหาจัดซื้อจากพื้นที่ใกล้เคียงโรงงานเท่านั้น แต่กำลังการผลิต (Production capacity) ของโรงงาน สามารถรองรับปริมาณต้นข้าวโพดสดเพื่อมาทำการผลิตได้มากถึง 25,000 กิโลกรัมต่อวัน จากผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มที่ถูกพัฒนาขึ้น พบว่า หากโรงงานขยายเขตพื้นที่ในการรับซื้อต้นข้าวโพดสดให้มากขึ้น จะช่วยลดปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบเพื่อใช้ในการผลิตได้ โดยที่ไม่เกินขีดความสามารถหรือข้อจำกัดที่มีของโรงงาน เนื่องจากการขนส่งนั้น ได้เลือกใช้ยานพาหนะเป็นรถบรรทุก 4 ล้อ และ 6 ล้อเท่านั้น ซึ่งสามารถถูกใช้เพื่อขนส่งวัตถุดิบให้กับโรงงานได้ตามปริมาณที่ต้องการ อีกทั้งยังก่อให้เกิดต้นทุนโดยรวมที่ต่ำที่สุดด้วย แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้ได้ตรวจสอบแล้วว่ามีความถูกต้อง และสามารถนำเอาไปประยุกต์ใช้กับปัญหาที่สามารถพบได้ในสถานการณ์จริง สำหรับงานวิจัยในอนาคตจะมีการปรับลดข้อตกลงเบื้องต้นบางประการ เพื่อให้แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมานั้น มีความสมจริงมากยิ่งขึ้น เช่น พื้นที่ปลูกต้นข้าวโพดจะมียานพาหนะเพียงชนิดเดียวเท่านั้นที่เข้าไปรับซื้อต้นข้าวโพดสด ซึ่งในความเป็นจริง รถบรรทุก 1 คัน สามารถเข้าไปรับซื้อต้นข้าวโพดสดได้หลายพื้นที่ จนกว่าจะเต็มขีดความจุของรถบรรทุกนั้น เป็นต้น ซึ่งช่วยทำให้แบบจำลองนั้นมีความสมจริงมากยิ่งขึ้น และอาจจะต้อง

ประยุกต์ใช้วิธีการฮิวริสติกส์เพื่อมาช่วยในการค้นหาคำตอบได้ หากขนาดของปัญหามีขนาดใหญ่และซับซ้อนมากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

วารสารฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากคณะโลจิสติกส์ และดิจิทัลซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยนเรศวร และหน่วยวิจัย ASEAN Logistics academic network (ALA) ที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษางานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

กรมการขนส่งทางบก. (2560). **รายงานอัตราค่าขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุกของประเทศไทย**. (รายงานวิจัย). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Ashish, T., Ankur, C., Surya, P.S., & Harpreet, K. (2017). A multi-objective integer linear program to integrate supplier selection and order allocation with market demand in a supply chain. **International Journal of Procurement Management (IJPM)**, 10(3), 335-359.

Chopra, S., & Meindl, P. (2016). **Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation** (6th ed.). Boston: Pearson.

Giunipero, L.C. & Brand, R.R. (1996). Purchasing's role in supply chain management. **The International Journal of Logistics Management**, 7(1), 29-37.

Subrata, M., & Balram, A. (2018). Application of linear programming in optimizing the procurement and movement of coal for an Indian coal-fired power-generating company. **Decision**, 45(3), 207-224.