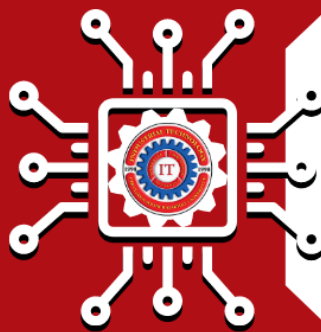




JOURNAL OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND

**ENGINEERING**

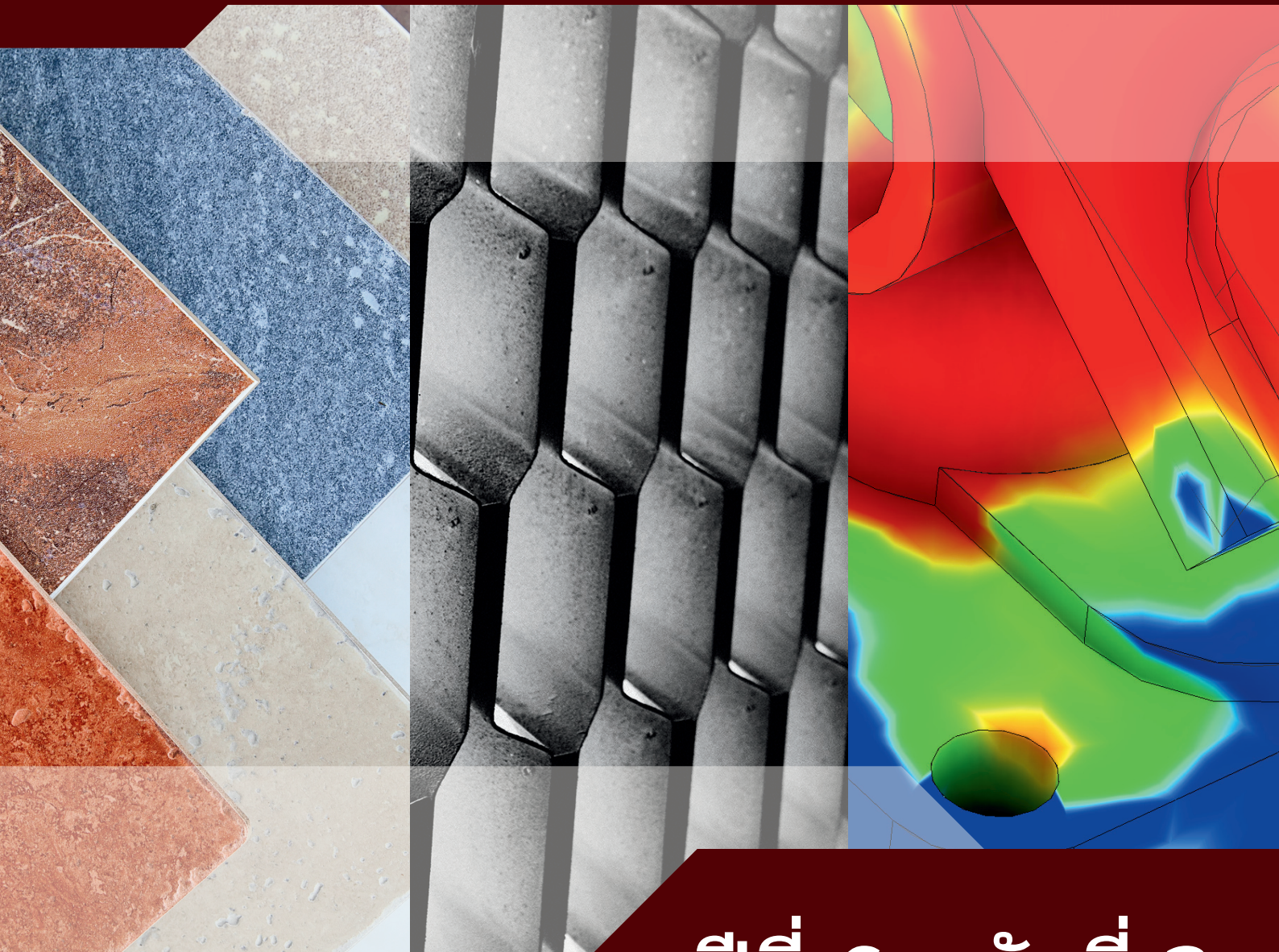
PIBULSONGKRAM RAJABHAT UNIVERSITY



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



วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม  
มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม



ปีที่ 6 ฉบับที่ 2

พฤษภาคม - สิงหาคม ปี2567



## ข้อกำหนดมาตรฐาน วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

เพื่อให้วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เป็นวารสารที่มีคุณภาพได้มาตรฐานทางกองบรรณาธิการจึงมีข้อกำหนดของวารสารดังต่อไปนี้

### 1. วัตถุประสงค์

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

### 2. ครอบคลุมสาขาที่เกี่ยวข้อง

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

2.2 สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ประยุกต์

2.3 สาขาวิชาที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และวิศวกรรม

### 3. การพิจารณาบทความ (Peer Review Process)

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

### ขั้นตอนการประเมินบทความมีกระบวนการดังต่อไปนี้

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

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

- กรณีมีความเห็นให้ ปฏิเสธการรับตีพิมพ์ (Decline Submission) กองบรรณาธิการ จะส่งจดหมายแจ้งผลดังกล่าวให้ผู้เขียนรับทราบ พร้อมทั้งเหตุผลของการปฏิเสธการรับ

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

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

#### 4. กำหนดออกเล่มวารสาร

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

#### 5. คำแนะนำสำหรับผู้ส่งบทความเพื่อตีพิมพ์

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

5.2 รูปแบบบทความที่ส่งกองบรรณาธิการเพื่อตีพิมพ์

#### 6. จริยธรรมในการตีพิมพ์ผลงาน

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



## 7. บทบาทและหน้าที่ของผู้นิพนธ์ (Duties of Authors)

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

## 8. บทบาทและหน้าที่ของบรรณาธิการวารสาร (Duties of Editors)

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

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

## 9. บทบาทและหน้าที่ของผู้ประเมินบทความ (Duties of Reviewers)

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

6. ผู้ประเมินบทความ ควรประเมินบทความในสาขาวิชาที่ตนมีความเชี่ยวชาญ โดยพิจารณาความสำคัญของเนื้อหาในบทความที่จะมีต่อสาขาวิชานั้น ๆ คุณภาพของการวิเคราะห์ และความเข้มข้นของผลงาน

7. ผู้ประเมินบทความไม่ควรใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่มีข้อมูลรองรับมาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินบทความวิจัย

8. หากผู้ประเมินบทความทราบว่ามีส่วนใดของบทความที่มีความเหมือน หรือซ้ำซ้อนกับผลงานชิ้นอื่น ๆ ผู้ประเมินบทความต้องแจ้งให้บรรณาธิการวารสารทราบด้วย

## 10. ลิขสิทธิ์และสิทธิ (Copyright and Right)

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

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

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

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

## 11. นโยบายจริยธรรมการทดลอง (Research Integrity Policy) ในงานวิจัย

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

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

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

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

**สำหรับผู้เขียน** ต้องมีการใช้ข้อมูลในการเขียนงานวิจัยโดยไม่มีส่วนเกี่ยวข้องที่อาจทำให้เกิดความโน้มเอียงในงานวิจัย ในผลการศึกษา สรุปผล หรือ การอภิปรายผล โดยเฉพาะผลประโยชน์ทางตรงหรือทางอ้อมต่อการทำงานวิจัย

**สำหรับผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ** ควรให้ข้อมูลต่อบรรณาธิการผู้รับผิดชอบบทความ หากมีผลประโยชน์เกี่ยวข้องกับงานวิจัยหรือมีความเกี่ยวข้องอย่างใดอย่างหนึ่ง ให้แจ้งบรรณาธิการ เพื่อยืนยันความโปร่งใสต่อการประเมินบทความ ทั้งนี้การเกี่ยวข้องย่อมมีโอกาสเกิดขึ้นได้เสมอ บรรณาธิการจะเป็นผู้พิจารณาให้ความเห็นในการยอมรับต่อการประเมินบทความอีกครั้ง

## บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม (Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University) Print ISSN : 3057-0093, E-ISSN : 3057-0107 ฉบับนี้เป็นปีที่ 6 ฉบับที่ 2 มีเนื้อหาที่เน้นด้านทางด้านเทคโนโลยี อุตสาหกรรมและวิศวกรรม วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีเนื้อหาครอบคลุมเกี่ยวข้องกับงานวิจัย ในสาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์สาขาต่างๆ โดยบทความทั้งหมดได้ผ่านการประเมิน โดยผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Review) ในสาขานั้นๆ เพื่อให้ได้ผลงานที่มีคุณภาพก่อน การตีพิมพ์และสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/psru-jite/issue/view/16508> ภายใต้ระบบ ThaiJo ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย

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



รองศาสตราจารย์ ดร.สนธิ ปิ่นสกุล  
บรรณาธิการ



## สารบัญ

| เรื่อง                                                                                                                                                                | หน้า    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| การระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการเมตาฮิวริสติก<br>.....มนัญ บุลย์ประมุข, สัญญา พรหมภาสิต, วีระพล พลีสัตย์, วสันต์ เพชรพิมูล,<br>วิษณุ บัวเทศ | 136-150 |
| ผลของออกไซด์ให้สีและการจัดเรียงตัวของเนื้อดินต่อการเกิดลวดลายหินอ่อนของ<br>ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่ขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน<br>.....จุมพฏ พงศ์ศักดิ์ศรี                       | 151-164 |
| การพัฒนาเครื่องอัดก้อนมะขามเปียกกึ่งอัตโนมัติสำหรับธุรกิจชุมชน<br>.....ภูววิทยา หนูช่างสิงห์, ธนภัทร มะณีแสง, มานะ อินพรม                                             | 165-180 |
| THE STUDY AND OPTIMUM DESIGN OF THE STRAINER PLATE IN THE<br>FILTER TANK BY USING THE FINITE ELEMENT METHOD<br>..... Picha Panmongkol, Thaloeng Poljaroen             | 181-193 |
| การพัฒนาบรรจุภัณฑ์มะขามเปรี้ยวอัดก้อนโดยใช้เทคนิควิศวกรรมคั่นเซสำหรับ<br>กลุ่มวิสาหกิจชุมชน<br>.....มานะ อินพรมมี, ธนภัทร มะณีแสง, ปรรธนา ศิริสานต์                   | 194-216 |
| การวิเคราะห์พลังงานของระบบการอบลมร้อนสำหรับมันสำปะหลังทอด<br>..... ฐานวิทย์ แนนใส*, อธิโรจน์ มะโน, สหพงศ์ สมวงศ์, วรพงศ์ บุญช่วยแทน                                   | 217-231 |
| การศึกษาสมบัติด้านวิศวกรรมของคอนกรีตบล็อกผสมเปลือกหอยนางรมบด<br>.....ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล, ปิยะพงศ์ กีสวัสดิ์คอน, อภิเสฏฐ์ สุวรรณสะอาด                          | 232-245 |
| การออกแบบและพัฒนาเครื่องขัดผิวโลหะ<br>.....แมน พักทอง, เกริกชัย มีหนู, ศักดิ์สิทธิ์ ชื่นชมนาคจาด, ธงชัย เครือฝื่อ,<br>กันตภณ โล่นพันธ์                                | 246-255 |
| การพัฒนาเครื่องย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติก<br>.....กฤติธฤต ทองสิน, สุรพงษ์ ราษฎร์จิตต์, วันวิสาข์ กาญจนารณ์,<br>กัณฐภัทร ไชยแสน                                          | 256-268 |



การออกแบบและพัฒนาสเปรตซีตเพื่อการพยากรณ์ความต้องการปุ๋ย กรณีศึกษา 269-287  
ร้านค้าปุ๋ย ABC ในจังหวัดสุโขทัย  
.....ณัฐพร ตั้งเจริญชัย

## การระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วย

### วิธีการเมตาฮิวริสติก

## IDENTIFICATION OF BRUSHLESS DC MOTOR WITH METAHEURISTIC METHOD

มนูญ บุญประมุข\*, สันญา พรหมภาสิต, วีระพล พลีสัตย์, วสันต์ เพชรพิมูล, วิษณุ บัวเทศ  
Manoon Boonpramuk\*, Sunya Phomprasit, Weerapon Plesatt, Wasan Phetphimoon,  
Witsanu Buathes

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร อ.เมือง จ.กำแพงเพชร ประเทศไทย 62000  
Faculty of Industrial Technology, Kamphang Phet Rajabhat University, Muang, Kamphang Phet, Thailand, 62000

\*Corresponding author e-mail: amanoonz@gmail.com

วันที่เข้ารับ 24 พฤศจิกายน 2566

วันที่แก้ไขบทความ 13 พฤษภาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 13 พฤษภาคม 2567

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการเมตาฮิวริสติก โดยมีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อหาวิธีการเมตาฮิวริสติกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านและ 2) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ผลการทดสอบพบว่า 1) วิธีการเมตาฮิวริสติกที่ใช้มี 3 แบบคือการค้นหาแบบตาข่ายเชิงปรับ (ATS), การค้นหาแบบฝูงอนุภาค (PSO) และการค้นหาแบบกระแสวิ่งข้ามขั้น (ICS) โดยการค้นหาแบบกระแสวิ่งข้ามขั้นจะได้ผลการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดจากการทดสอบด้วยฟังก์ชันมาตรฐาน 2) การทดสอบประสิทธิภาพในการระบุเอกลักษณ์สำหรับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านพบว่า วิธีการค้นหาแบบกระแสวิ่งข้ามขั้นสามารถระบุเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ออกมาได้อย่างเหมาะสมที่สุดโดยมีค่าผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (SSE) ที่น้อยที่สุด

**คำสำคัญ:** ระบุเอกลักษณ์, เมตาฮิวริสติก, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

### Abstract

This paper presents the identification of brushless DC motors using the meta-heuristic method. The objectives are 1) to find the most suitable meta-heuristic method for their identification and 2) to test the identification performance of brushless DC electric motors. The test results found that: 1) the three types of meta-heuristic methods used included: adaptive taboo search (ATS); particle swarm optimization (PSO); and intensified current search (ICS). The ICS could potentially provide the best answer according to standard functions. 2) The identification performance tests for brushless DC motors found that the ICS method could optimally identify the uniqueness of various parameters and make available the least amount of sum squared error (SSE).

**Keywords:** Identification, Metaheuristic, Brushless DC Motor

### 1. บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) เป็นมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดหนึ่งที่มีลักษณะที่เหมือนกันคือมีแม่เหล็กถาวรบนโรเตอร์และขดลวดสเตเตอร์ ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น ฮาร์ดดิสก์, หุ่นยนต์, ยานพาหนะ, การบินและอวกาศ, เครื่องใช้ในบ้าน และเครื่องมือวัด ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน มีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่ามอเตอร์กระแสตรงทั่วไปที่มีแปรงถ่าน โดยโครงสร้างมีความเรียบง่าย มีประสิทธิภาพสูง การบำรุงรักษาน้อยกว่าเนื่องจากไม่มีแปรงถ่าน เสียบกวนต่ำขณะทำงาน มีความเร็วและแรงบิดที่สูงกว่า (Moon, 2013)

การนำเอามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องมีวิธีการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ที่สามารถตอบสนองต่อความเร็วและแรงบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัญหาอย่างหนึ่งที่มีผลต่อการออกแบบระบบควบคุมคือมีความยุ่งยากในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลตอบสนองของระบบค่อนข้างต่ำ (Saleh & Obed, 2014) ส่งผลต่อความผิดพลาดในการออกแบบระบบควบคุมก่อให้เกิดเสถียรภาพในการทำงานที่ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในปัจจุบันแนวคิดการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีเมตาฮิวริสติกเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญในงานด้านวิศวกรรมเป็นอย่างมากเนื่องด้วยมีความยืดหยุ่นต่อการใช้งานเพื่อค้นหาคำตอบโดยใช้แนวคิดกระบวนการของพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิตหรือพฤติกรรมทางธรรมชาติ (Sakulin, 2012) อาทิเช่น การค้นหาแบบตาบู่ (tabu search) ที่ใช้หลักการค้นหาแบบปิ่นเขาเพื่อหาคำตอบ, การค้นหาแบบฝูงอนุภาค (Particle

swarm optimization) ใช้หลักการค้นหาแหล่งอาหารแบบฝูง, จีเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm) ใช้หลักการการกลายพันธุ์และการแลกเปลี่ยนข้ามยีนส์, การค้นหาแบบกระแสวิ่งเข้มข้น (Intensive current search) ใช้หลักการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าในวงจร, การค้นหาแบบอบอ่อนจำลอง (Simulated annealing) ใช้หลักการให้ความร้อนกับโลหะแล้วปล่อยให้เย็นลงตามธรรมชาติ เป็นต้น

ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ด้วยวิธีการเมตาฮิวริสติกเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความผิดพลาดน้อยที่สุด

## 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อหาวิธีการเมตาฮิวริสติกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

2.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

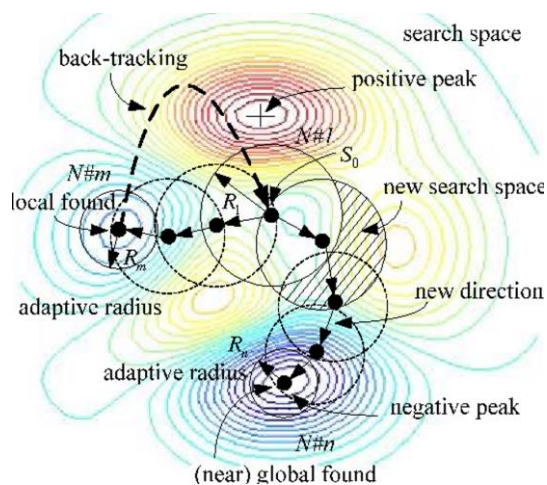
## 3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การหาวิธีการเมตาฮิวริสติกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ โดยวิธีการเมตาฮิวริสติกเป็นวิธีที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาเพื่อหาคำตอบที่มีความยุ่งยากและซับซ้อน ใช้หลักการสุ่มเลขเพื่อให้เกิดการค้นหาพื้นที่ของคำตอบให้กว้างที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ วิธีการเมตาฮิวริสติกมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอ 3 รูปแบบด้วยกันได้แก่ การค้นหาแบบตาบูเซิร์ช, การค้นหาแบบฝูงอนุภาค และการค้นหาแบบกระแสวิ่งเข้มข้น วิธีการเมตาฮิวริสติกแต่ละแบบนั้นสามารถวัดประสิทธิภาพจากการแก้ปัญหาเดียวกัน โดยวิเคราะห์จากคุณภาพของคำตอบและระยะเวลาการหาคำตอบ

### 3.1.1 การค้นหาแบบตาบูเซิร์ช (Adaptive tabu search : ATS)

เป็นกระบวนการหาคำตอบที่พิจารณาเส้นทางที่จะนำไปสู่ค่าที่เหมาะสมโดยมีการปรับปรุงจากการค้นหาแบบตาบูที่มีการหลบเลี่ยงคำตอบหรือเส้นทางที่ได้ทำการสำรวจไปแล้ว จากนั้นการค้นหาคำตอบจะไม่หยุดอยู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (Ketthong, 2017) ดังภาพที่ 1

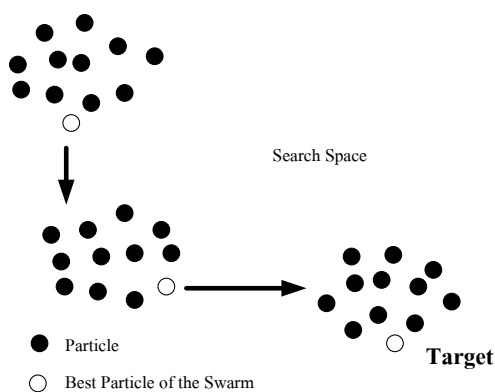
มีการอิงแนวการค้นหาพื้นที่ใกล้เคียงเพื่อแก้ไขปัญหาแบบผสมผสานและไม่เป็นเชิงเส้น กลไกการปรับตามวิธีแบบตาบูเซิร์ชมีขั้นตอนการปรับตัวของรัศมี (Adaptive radius) และการติดตามหลัง (Back tracking) เพื่อเป็นการเร่งกระบวนการหาคำตอบสามารถหลีกเลี่ยงการหาคำตอบเฉพาะถิ่นได้ดีขึ้น (Khalid, 2016)



ภาพที่ 1 พฤติกรรมการค้นหาคำตอบด้วยตาบู่เชิงปรับ

### 3.1.2 การค้นหาแบบฝูงอนุภาค (Particle swarm optimization : PSO)

การค้นหาค่าที่เหมาะสมด้วยฝูงอนุภาค เป็นกระบวนการหนึ่งของวิธีการค้นหาที่เหมาะสมแบบกลุ่มประชากร ที่มีพื้นฐานของวิธีการจากธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตที่อยู่รวมกันเป็นฝูงเช่น ฝูงนก และฝูงปลา (AOUF, 2017) โดยการเคลื่อนที่ที่จะรวมกันเป็นเหมือนกลุ่มฝูงอนุภาคในการค้นหาเหยื่อที่อาศัยการอ้างอิงตำแหน่งของตัวเองและตำแหน่งของอนุภาคใกล้เคียงที่บินมาแล้วเพื่อใช้กำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นฝูงอนุภาคต่อไปจนกว่าจะพบกับคำตอบที่เหมาะสมดังภาพที่ 2

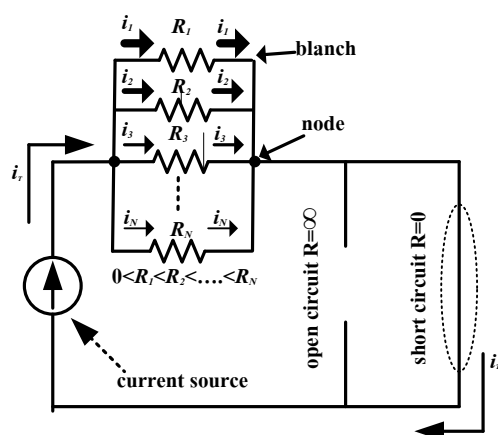


ภาพที่ 2 พฤติกรรมการค้นหาเป้าหมายด้วยฝูงอนุภาค

### 3.1.3 การค้นหาแบบกระแสเชิงเข้มข้น (Intensive current search: ICS)

การค้นหาแบบกระแสเชิงเข้มข้นเป็นวิธีการค้นหาที่เหมาะสมที่พัฒนามาจากวิธีการค้นหาแบบกระแส (Current search: CS) โดยมีพื้นฐานของพฤติกรรมการไหลกระแสไฟฟ้าใน

วงจรไฟฟ้าในแต่ละสาขาซึ่งจะอาศัยหลักทฤษฎีของเคอร์ชอฟที่ผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรไฟฟ้าจะเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 พฤติกรรมการไหลของกระแสไฟฟ้า

จากภาพที่ 3 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในแต่ละสาขาของวงจรไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าความต้านทานยิ่งค่าความต้านทานมีค่าน้อยเท่าไรกระแสไฟฟ้าจะยิ่งไหลมากขึ้นเท่านั้นและถ้าเกิดการลัดวงจรเกิดขึ้น (Short circuit) ค่าความต้านทานในสาขานั้นจะมีค่าเป็นศูนย์แต่หากว่าเกิดการเปิดวงจร (Open circuit) ค่าความต้านทานในสาขานั้นจะมีค่าเป็นอนันต์ จากพฤติกรรมการไหลของกระแสไฟฟ้าดังกล่าวนี้วงจรไฟฟ้าเปรียบเสมือนคำตอบเริ่มต้นที่เป็นไปได้ในขณะที่มีการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อพบกับวงจรเปิดเปรียบเสมือนการติดกับวงจรแคบเฉพาะถิ่นและหากว่ากระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านในสาขานั้นได้เมื่อมีค่าความต้านทานที่เหมาะสมจะเปรียบเสมือนการได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Puangdownreong, 2013) สำหรับในวิธีการค้นหาแบบ ICS เป็นการพัฒนาที่เพิ่มประสิทธิภาพโดยมีการเพิ่มกระบวนการปรับรัศมีการค้นหา (Adaptive radius: AR) และกระบวนการปรับค่าข้างเคียง (Adaptive neighborhood: AN) (Nawikavatan, 2016) การค้นหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการเมตาฮิวริสติกทั้ง 3 แบบนั้นสามารถลำดับขั้นตอนกระบวนการรหัสเทียม (Pseudo code) ดังภาพที่ 4

3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านเป็นกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทางพลวัตของระบบที่ได้มาจากการคำนวณข้อมูลทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของระบบ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมีลักษณะที่คล้ายกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไปเพียงแค่เป็นมอเตอร์ที่มีขนาด 3 เฟสที่มีลักษณะการเชื่อมต่อแบบสตาร์ (Poonsawat, 2008) ดังภาพที่ 5

#### Initialize:

- Objective function  $f(s), s=(s_1, s_2, \dots, s_d)$
- Initialize the search space  $\Omega$ , Tabu list (TL), Search radius  $R$
- Randomly generate initial  $N$  solution around  $s_0$  within  $\Omega$
- Evaluate  $f(s_0)$  via given objective function
- while** (termination criteria (TC) ):
  - Randomly generate neighborhood solutions  $s'$
  - Evaluate  $f(s')$  via given objective function
  - Find the best neighborhood solution  $s^*$
  - if**  $f(s^*) < f(s_0)$ 
    - Keep  $s_0$  into TL and update  $s_0 = s^*$
  - else**
    - Keep  $s^*$  into TL
- end**
- if** (local entrapment occurred)
  - Then** activate the backtracking (BT) mechanism.
- if** (search closes to local solutions)
  - Then** invoke the adaptive radius (AR) mechanism to reduce  $R$  by adjusting  $R = \mu R, 0 < \mu < 1$ .

**end**  
-Best solution found.

(ATS)

#### Initialized:

- Objective function  $f(x), x=(x_1, x_2, \dots, x_d)$
- Initialize the parameters  $c1, c2, w_{max}, w_{min}$  and population size  $N$
- Maximum iteration  $iter_{max}$
- Random initial solution  $x_i$  within search space
- Evaluate  $f(x_i)$  and set all initial position as  $g_{best} = x_0, p_{best} = x_0^j$
- while** ( $i \leq iter_{max}$  or TC (termination criteria));

Calculate the velocity of particle  $v_i$   
Update the position of particle  $x_i$   
**if**  $f(x_i) \leq f(x_0)$   
Update  $g_{best} = x_i$

**end**

Update  $i=i+1$

**end**

-Best solution found.

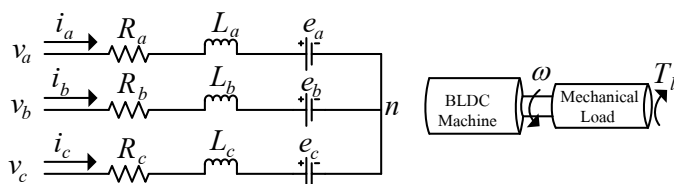
(PSO)

#### Initialized:

- Objective function  $f(x), x=(x_1, x_2, \dots, x_d)$
- Initialize the search space  $\Omega$  and memory list  $ML(\Psi, \Gamma_k, \Xi) = \emptyset$
- Maximum allowance of solution cycling  $j_{max}$
- Number of initial solution (directions of current in network)  $N$
- Number of neighborhood members  $n$  and search radius  $R, k=j=1$
- Random initial solution  $X_i$  within  $\Omega$
- Evaluate  $f(X_i)$  then rank and  $X_i$  store into  $(\Psi)$
- Let  $x_0 = X_k$  as selected initial solution
- $X_{global} = X_{local} = x_0$
- while** ( $k \leq N$  or TC (termination criteria));
  - while** ( $j \leq j_{max}$ );
    - Random neighborhood  $x_i$  around  $x_0$  within  $R$
    - Evaluate  $f(x_i)$  and set the best one as  $x^*$
    - if**  $f(x^*) < f(x_0)$ ; Update  $x_0 = x^*$ , set  $j=1$  and keep  $x_0$  into  $\Gamma_k$ ,
    - else** Update  $j=j+1$  and keep  $x^*$  into  $\Gamma_k$  **end**
    - Activate AR by  $R = \rho R, 0 < \rho < 1$ .
    - Invoke AN by  $n = \alpha n, 0 < \alpha < 1$ .
  - end**
  - Update  $X_{local} = x_0$
  - Keep  $X_{global}$  into high level  $ML(\Xi)$
  - if**  $f(X_{local}) = f(X_{global})$ ; Update  $X_{global} = X_{local}$  **end**
  - Update  $k=k+1$  and set  $j=1$
  - Let  $x_0 = X_k$  as selected initial solution
- end**
- Best solution found.

(ICS)

ภาพที่ 4 รหัสเทียมของ ATS, PSO และ ICS



ภาพที่ 5 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน 3 เฟสและแบบจำลองทางกล



การอธิบายการทำงานทางพลวัตของมอเตอร์ จะใช้รูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าเบื้องต้นของมอเตอร์พิจารณาในรูปของสมการแรงดันไฟฟ้าดังสมการที่ (1) ซึ่งเป็นสมการเฉพาะเฟส A

$$v_{an}(t) = v_s(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad (1)$$

สมการคณิตศาสตร์ความสัมพันธ์ระหว่างทางเชิงกลกับความเร็วเชิงมุมที่มีความเกี่ยวข้องกับแรงบิดโหลดและแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (2)

$$T_e(t) = B_v \omega(t) + J \frac{d\omega}{dt} + T_l(t) \quad (2)$$

จากสมการที่ (1) และ (2) สามารถอธิบายแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าต้านกลับได้ในสมการที่ (3) และ (4)

$$T_e(t) = K_T i_a(t) \quad (3)$$

$$e_a(t) = K_b \omega(t) \quad (4)$$

สมการแรงดันไฟฟ้าในสมการที่ (1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปการแปลงลาปลาซได้ในสมการที่ (5)

$$V(s) = R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + K_b \omega(s) \quad (5)$$

แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าในสมการที่ (2) และ (3) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปการแปลงลาปลาซได้ในสมการที่ (6) และ (7)

$$T_e(s) = B_v \omega(s) + J s \omega(s) + T_l(s) \quad (6)$$

$$T_e(s) = K_T I_a(s) \quad (7)$$



จากสมการที่ (6) และ (7) สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์กับสมการกระแสไฟฟ้าดังสมการที่ (8)

$$I_a(s) = \frac{B_v \omega(s)}{K_T} + \frac{Js\omega(s)}{K_T} \quad (8)$$

นอกจากนี้สมการที่ (6) และ (7) ยังสามารถเขียนอธิบายเพิ่มในรูปของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าดังสมการที่ (9)

$$T_e(s) = K_T \frac{V(s) - K_b \omega(s)}{R_a + sL_a} \quad (9)$$

จากสมการที่ (5) ถึงสมการที่ (9) สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านดังสมการที่ (10)

$$G_p(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \left( \frac{K_T}{(L_a J)s^2 + (R_a J + L_a B_v)s + (R_a B_v + K_b K_T)} \right) \quad (10)$$

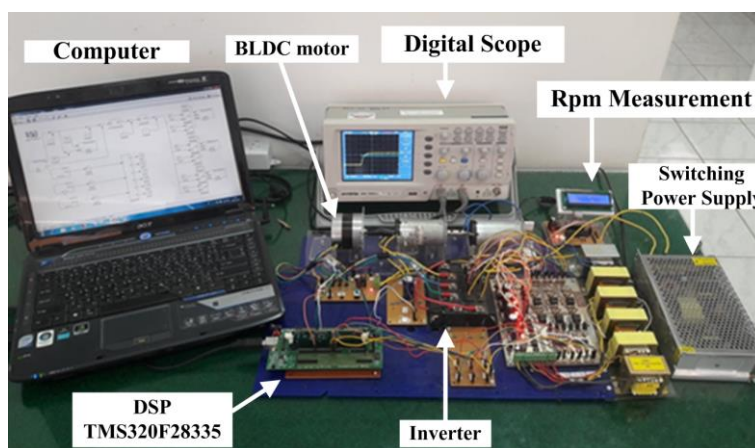
เนื่องด้วยระบบมอเตอร์ถูกขับเคลื่อนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งสามารถประมาณโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 1 (D. Kumpanya, 2015) ดังนั้นสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ที่สมบูรณ์แสดงในสมการที่ (11)

$$G_p(s) = \left( \frac{K_A}{\tau_A s + 1} \right) \left( \frac{K_T}{(L_a J)s^2 + (R_a J + L_a B_v)s + (R_a B_v + K_b K_T)} \right) \quad (11)$$

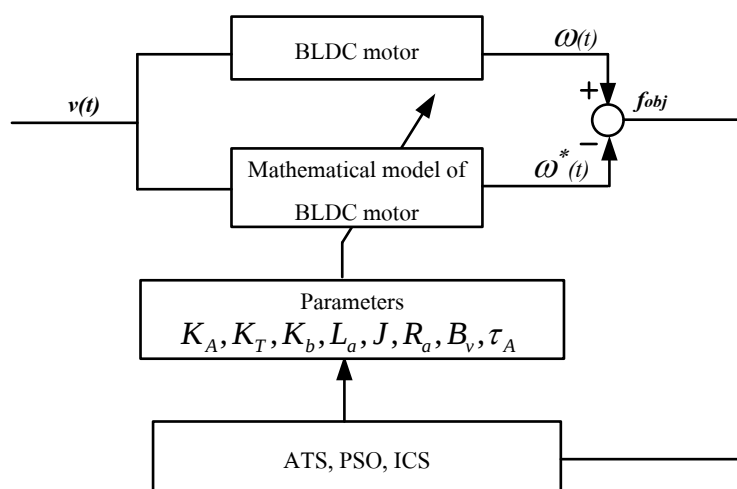
|        |          |                                  |
|--------|----------|----------------------------------|
| โดยที่ | $K_A$    | คือ ค่ากำลังวงจรรขยายคงที่       |
|        | $\tau_A$ | คือ ค่าเวลากำลังวงจรรขยายคงที่   |
|        | $B_v$    | คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน      |
|        | $R_a$    | คือ ค่าความต้านทานขดลวดมอเตอร์   |
|        | $J$      | คือ โมเมนต์ความเฉื่อย            |
|        | $L_a$    | คือ ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดมอเตอร์ |
|        | $K_T$    | คือ ค่าแรงบิดคงตัว               |

$K_b$  คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ

สมการฟังก์ชันถ่ายโอนประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญทั้งหมด 8 ตัวของมอเตอร์ที่ใช้สำหรับระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการเมตาฮิวริสติกทั้ง 3 รูปแบบ ขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ เริ่มจากเก็บข้อมูลผลการทดสอบความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านขนาดแรงดัน 24 โวลต์ที่ 2,400 รอบต่อนาที ควบคุมผ่านบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320F28335 ดังภาพที่ 6 จากนั้นทำการระบุเอกลักษณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ฟังก์ชันถ่ายโอนแล้วเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่ได้ทำการระบุเอกลักษณ์กับแบบจำลองที่ได้ทำการพิสูจน์ ลักษณะกระบวนการระบุเอกลักษณ์แบบ ATS, PSO และ ICS แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 6 ระบบควบคุมมอเตอร์



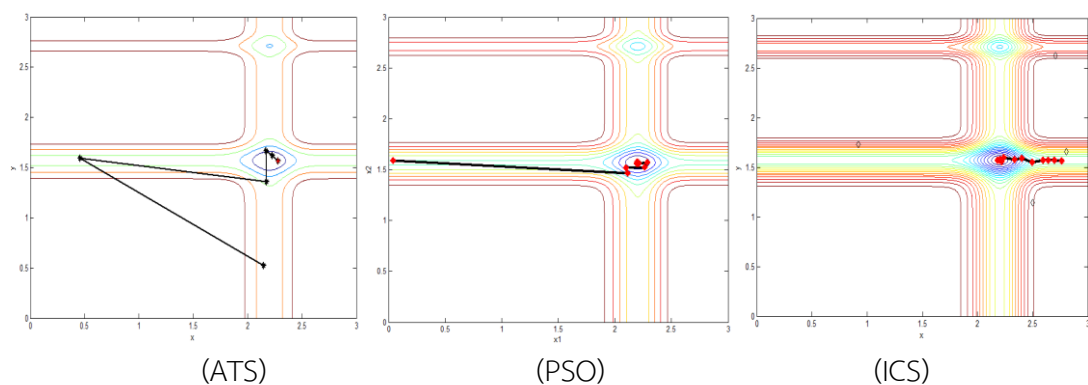
ภาพที่ 7 การระบุเอกลักษณ์ด้วย ATS, PSO และ ICS

#### 4. ผลการวิจัย

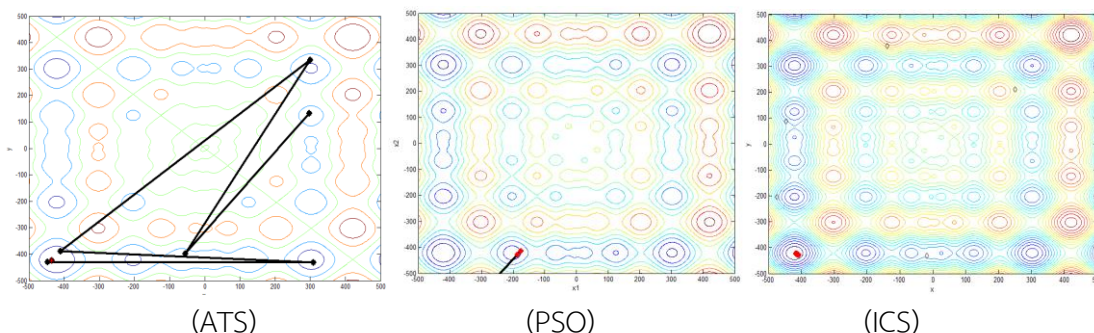
4.1 ผลการหาวิธีการเมตาฮีริสติกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยทำการวัดประสิทธิภาพจากการแก้ปัญหาเดียวกัน โดยวิเคราะห์จาก คุณภาพของคำตอบและระยะเวลาการหาคำตอบทั้ง 3 รูปแบบคือ การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับ, การ ค้นหาแบบฝูงอนุภาคและการค้นหาแบบกระแสน้ำไหลเชี่ยว ซึ่งใช้กับฟังก์ชันมาตรฐานเปรียบเทียบเพื่อ หาคำตอบดังตารางที่ 1 และทดสอบสมรรถนะการค้นหาคำตอบและอัตราการใช้หาคำตอบแบบ ICS ,PSO และ ATS ด้วยโปรแกรม MATLAB ดังภาพที่ 8 – 9

ตารางที่ 1 ฟังก์ชันมาตรฐาน

| ฟังก์ชัน<br>มาตรฐาน | สมการและขอบเขตการค้นหา                                                                                          | รูปแบบ 3 มิติ |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Michalewicz(<br>MF) | $\min f(x, y) = -\sin(x)\sin^{20}(x^2/\pi) - \sin(y)\sin^{20}(2y^2/\pi)$ <p>Subject to</p> $0 \leq x, y \leq 3$ |               |
| Schwefel (SF)       | $\min f(x, y) = 418.982 - \sum_{i=1}^n (x_i \sin \sqrt{ x_i })$ <p>Subject to</p> $-500 \leq x, y \leq 500$     |               |



ภาพที่ 8 การเคลื่อนที่ของการค้นหาคำตอบฟังก์ชัน Michalewicz



ภาพที่ 9 การเคลื่อนที่ของการค้นหาคำตอบฟังก์ชัน Schwefel

ผลการทดสอบสมรรถนะของวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยโปรแกรม MATLAB กำหนดค่าการวนซ้ำในการหาคำตอบจำนวน 100 รอบ นำผลการทดสอบที่ได้นำมาเปรียบเทียบ ดังตารางที่ 2 พบว่าการค้นหาแบบ ICS ได้ผลการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยดูจากค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสามารถนำเอาวิธีดังกล่าวไปใช้ในการระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านได้

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบฟังก์ชันมาตรฐาน

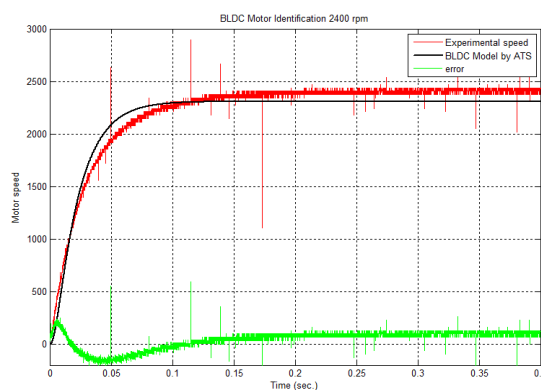
| ฟังก์ชันมาตรฐาน | พารามิเตอร์ | รูปแบบการค้นหา       |                      |                      |
|-----------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                 |             | ATS                  | PSO                  | ICS                  |
| Michalewicz     | $f(x, y)$   | -1.560               | -1.713               | -1.801               |
|                 | $x$         | 2.192                | 2.126                | 2.202                |
|                 | $y$         | 1.652                | 1.574                | 1.570                |
| Schwefel        | $f(x, y)$   | $-7.852 \times 10^2$ | $-1.805 \times 10^3$ | $-2.352 \times 10^3$ |
|                 | $x$         | $-4.238 \times 10^2$ | $-7.170 \times 10^2$ | $1.319 \times 10^3$  |
|                 | $y$         | $-4045 \times 10^2$  | $-1.092 \times 10^3$ | $-1.108 \times 10^3$ |

4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์โดยกำหนดรูปแบบการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับ, การค้นหาแบบฝูงอนุภาคและการค้นหาแบบกระแสน้ำแบบผสมผสาน ดังภาพที่ 6 ซึ่งเป็นไปตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (12) โดยที่  $f_{obj}$  เป็นค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบความเร็วมอเตอร์จากผลการทดสอบระบบจริง  $\omega(t)$  กับความเร็วมอเตอร์ที่ได้จากแบบจำลอง  $\hat{\omega}(t)$  ผลการเปรียบเทียบความเร็วทั้งสองส่วนจะถูกทำให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของการระบุเอกลักษณ์ตามขอบเขตพื้นที่การค้นหาที่กำหนดไว้ดังสมการที่ (13)

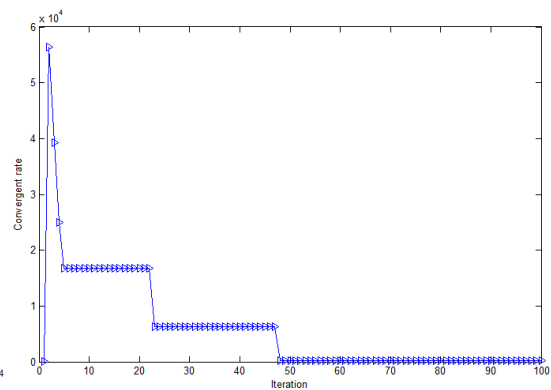
$$f_{obj} = \sum_{i=1}^N [\omega(t) - \omega^*(t)]^2 \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq K_A \leq 20 \\ 0 &\leq K_T \leq 1 \\ 0 &\leq K_b \leq 1 \\ 0 &\leq L_a \leq 0.1 \\ 0 &\leq J \leq 0.1 \\ 0 &\leq R_a \leq 20 \\ 0 &\leq B_v \leq 1 \\ 0 &\leq \tau_A \leq 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

การประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตาปูเชิงปรับ, การค้นหาแบบฝูงอนุภาคและการค้นหาแบบกระแสน้ำขึ้น สำหรับระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ BLDC เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ทำการโปรแกรมด้วย MATLAB ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง Corei5-2450M ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 2.5 GHz มีหน่วยความจำหลักชนิด DDR ขนาด 6GB โดยใช้ข้อมูลความเร็วรอบที่ 2,400 รอบต่อนาที กำหนดการค้นหาค่าตอบจำนวน 100 รอบ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 10-12 และค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ดังตารางที่ 3

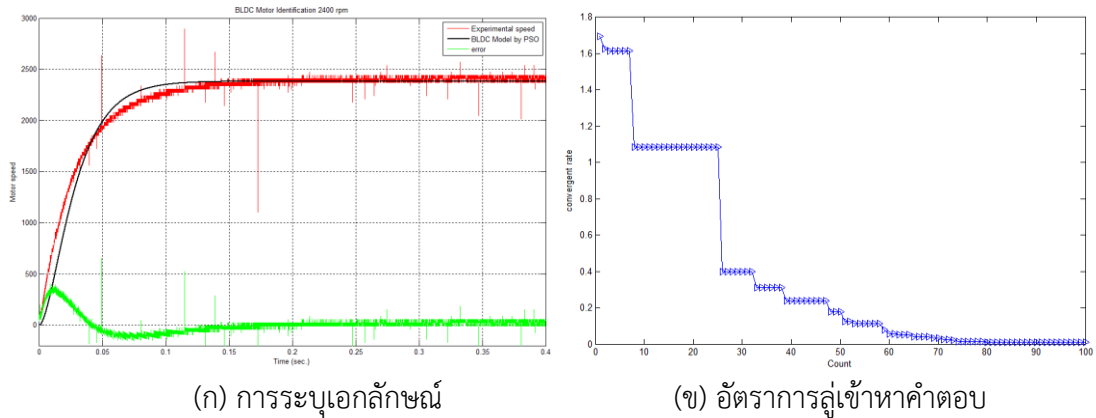


(ก) การระบุเอกลักษณ์

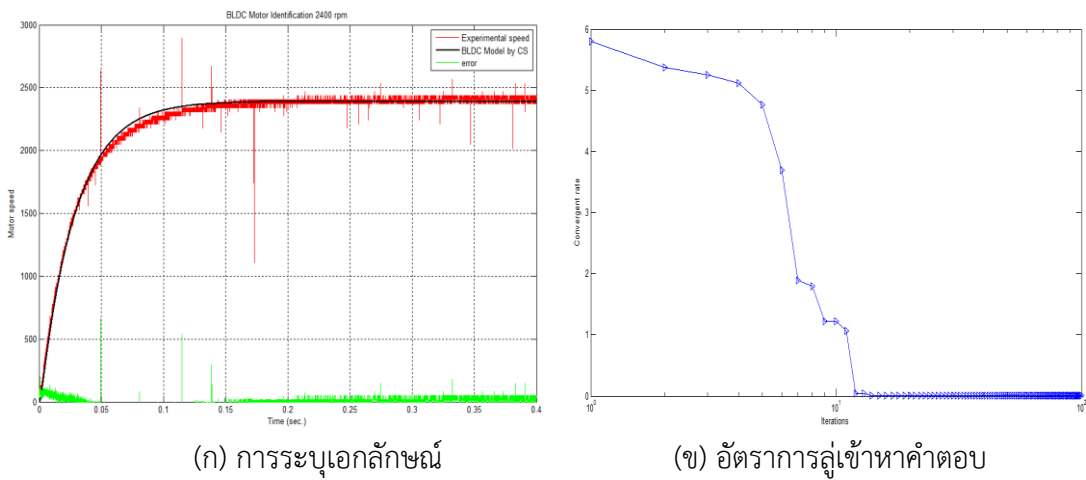


(ข) อัตราการลู่เข้าหาค่าตอบ

ภาพที่ 10 ผลการทดสอบด้วย ATS



ภาพที่ 11 ผลการทดสอบด้วย PSO



ภาพที่ 12 ผลการทดสอบด้วย ICS

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ได้จากการระบุเอกลักษณ์

| พารามิเตอร์          | ICS     | PSO     | ATS     |
|----------------------|---------|---------|---------|
| $R_o(\Omega)$        | 18.6987 | 8.4903  | 2.8975  |
| $L_o(H)$             | 0.0632  | 0.0847  | 0.0154  |
| $K_T(N.m/A)$         | 0.9675  | 1.1042  | 0.8062  |
| $K_A$                | 11.1648 | 15.7513 | 12.1016 |
| $\tau_A(sec)$        | 0.0278  | 0.0731  | 0.0189  |
| $J(kg.m^2)$          | 0.0001  | 0.0211  | 0.0010  |
| $B_v(N.m/(rad/sec))$ | 0.1527  | 0.8648  | 0.9995  |
| $K_b(V/(rad/sec))$   | 0.8775  | 0.7875  | 0.6530  |
| SSE                  | 585.48  | 740.41  | 886.80  |

จากผลการทดสอบระบุเอกลักษณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านดังภาพที่ 10 -12 จะประกอบด้วยผลการระบุเอกลักษณ์และอัตราการรู้เข้าหาคำตอบ การระบุเอกลักษณ์เป็นผลการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบของมอเตอร์กับผลที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ด้วย ATS, PSO และ ICS พบว่ารูปแบบการค้นหาคำตอบด้วย ICS จะให้ผลการระบุเอกลักษณ์ที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์มากที่สุดโดยมีค่าของรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (sum-squared error: SSE) อยู่ที่ 585.48 ซึ่งน้อยกว่า ATS และ PSO

## 5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 การหาวิธีการเมตาฮิวริสติกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยกระบวนการค้นหามีวิธีการเมตาฮิวริสติกทั้งหมด 3 รูปแบบคือ การค้นหาแบบดาวยุเชิงปรับ, การค้นหาแบบฝูงอนุภาคและการค้นหาแบบกระแสน้ำไหลเชี่ยว พบว่าเมื่อได้นำกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาทดสอบกับฟังก์ชันมาตรฐาน Michalewicz และ Schwefel ด้วยการค้นหาแบบกระแสน้ำไหลเชี่ยว ได้ผลการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยดูจากค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าน้อยที่สุดซึ่งสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกเพื่อใช้ในการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดได้

5.2 การทดสอบประสิทธิภาพการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ในขั้นตอนที่ทดสอบกับมอเตอร์ขนาดแรงดัน 24 โวลต์ที่ความเร็ว 2,400 รอบต่อนาที โดยใช้การค้นหาแบบดาวยุเชิงปรับ, การค้นหาแบบฝูงอนุภาคและการค้นหาแบบกระแสน้ำไหลเชี่ยว พบว่าการค้นหาแบบกระแสน้ำไหลเชี่ยวจะให้ผลการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ที่ดีที่สุดโดยมีค่าผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (SSE) ที่น้อยที่สุด ส่งผลทำให้ได้ค่าของพารามิเตอร์ที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์

## 6. เอกสารอ้างอิง

- AOUF, A., BOUSSAID, L., & Sakly, A. (2017, May). **A PSO algorithm applied to PID controller for motion mobile robot in complex dynamic environment.** International Conference on Engineering & MIS, Monastir, Tunisia. Doi: 10.1109/ICEMIS.2017.8273012
- Ketthong, T., Tunyasirut, S., & Puangdownreong, D. (2017). Design and Implementation of I-PD Controller for DC Motor Speed Control System by Adaptive Tabu search. **International Journal Intelligent Systems and Application**, 9, 69-78. Doi: 10.5815/ijisa.2017.09.08

- Khalid, S. (2016). Optimized Aircraft Electric Control System Based on Adaptive Tabu Search Algorithm and Fuzzy Logic Control. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics**, 4(3), 149-164. Doi: 10.11591/ijeei.v4i3.221
- Kumpanya, D., Thaiparnat, S., & Puangdownreong, D. (2015). Parameter Identification of BLDC Motor via Metaheuristic Optimization Techniques. **International Conference on Industrial Engineering and Service Science**, 4, 322-327. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.047>
- Moon, J.J., Im, W.S., & Kim, J.M. (2013, March). **Novel Phase Advance Method of BLDC motors for wide range speed operations**. 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Long Beach, USA. Doi: 10.1109/APEC.2013.6520622
- Nawikavatan, A., Tunyasirirut, S., & Puangdownreong, D. (2016). Application of Intenified Current Search to Multiobjective PID Controller Optimization. **International Journal of Intelligent Systems and Applications**, 11, 51-60. Doi: 10.5815/ijisa.2016.11.06
- Poonsawat, S., & Kulworawanichpong, T. (2008). Speed Regulation of a Small BLDC Motor using Genetic-Based Proportional Control. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, 2(5), 203-208.
- Puangdownreong, D. (2013). Current search: performance evaluation and application to DC motor speed control system design. **Intelligent Control and Automation**, 4(1), 42-54. Doi: 10.4236/ica.2013.41007
- Sakulin, A., & Puangdownreong, D. (2012, February). **A novel meta-huristic optimization algorithm current serach**. WSEAS International Conference on Articial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases, Wisconsin, United States.
- Saleh, A.L. & Obed, A.A. (2014). Speed Control of Brushledd DC Motor Based on Feactional order PID Controller. **International Journal of Computer Applications**, 95(4), 1-6.

ผลของออกไซด์ให้สีและการจัดเรียงตัวของเนื้อดินต่อการเกิดลวดลายหินอ่อน  
ของผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่ขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน

THE EFFECT OF COLOR OXIDE AND CLAY TEXTURE ARRANGMENT  
ON THE FORMATION OF MARBLE-PATTERN CERAMIC PRODUCTS  
BY WHEEL THROWING

จุมพฏ พงศ์ศักดิ์ศรี

Jumpot Phongsaksri

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

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

Corresponding author e-mail: jumpot\_ph@psru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 30 สิงหาคม 2566

วันที่แก้ไขบทความ 8 พฤษภาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 14 พฤษภาคม 2567

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาการเกิดสี ความสว่างและค่าสีของเนื้อผลิตภัณฑ์ภายหลังจากเผาจากออกไซด์ให้สีที่แตกต่างกัน 2) เพื่อศึกษาลวดลายหินอ่อนของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่ใช้รูปแบบการจัดวางเนื้อดินปั้นต่างกัน 3) เพื่อศึกษาลวดลายหินอ่อนของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่ขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนโดยใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปต่างกัน ดำเนินการวิจัยโดยกำหนดส่วนผสมแบบเจาะจง โดยใช้ดินสโตนแวร์ ผสมกับออกไซด์ให้สี ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ได้แก่ 1) โครมิกออกไซด์ 2) โคบอลต์ออกไซด์ และ 3) เพอร์ริกออกไซด์ กำหนดรูปแบบการจัดวางเนื้อดินแบบเรียงเป็นชั้น และการวางเนื้อดินแบบม้วนเป็นวง กำหนดเวลาในการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน ทุกขั้นตอนจนเป็นผลิตภัณฑ์ 2 ช่วงเวลา ได้แก่ 5 นาที และ 10 นาที เผาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น ผลการวิจัยพบว่า รูปแบบการจัดวางเนื้อดินปั้นแบบเรียงเป็นชั้นและแบบม้วนเป็นวงสามารถสร้างลวดลายหินอ่อนได้ใกล้เคียงกัน ระยะเวลาในการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนที่เหมาะสมคือ 10 นาที สูตรที่เหมาะสมได้แก่ สูตรที่ 3 สูตรที่ 4 สูตรที่ 7 และสูตรที่ 8 ซึ่งเป็นการเรียงดินสลับสี 4 และ 6 ชั้น

คำสำคัญ: ผลิตภัณฑ์ลายหินอ่อน, เครื่องปั้นดินเผา, ออกไซด์

### Abstract

This research aims to: 1) study the formation of colors, lightness, and color values of product textures after being fired with different oxides; 2) examine the marble patterns of pottery with different clay texture layer arrangements and 3) investigate the marble pattern of pottery products molded by a wheel throwing using different molding periods. The research was conducted using a purposive sampling of stoneware clay mixtures with oxides including chromic oxide, cobalt oxide, and ferric oxide at 3% concentration by weight. The clay was arranged in layers and in coils, and the molding time was set by a wheel throwing in every step for two-time intervals of 5 and 10 minutes. They were fired at 1230 degrees Celsius in oxidation. The results showed that both layer- and coil-clay arrangements produced similar marble patterns. The appropriate molding time with a wheel throwing was 10 minutes. The suitable formulas were 3, 4, 7, and 8, with arrangements in 4 and 6 layers of alternate colored clay.

**Keywords:** Marble products, Pottery, Oxide

### 1. บทนำ

การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาด้วยเทคนิคการตกแต่งเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาช่วยสร้างเสริมผลิตภัณฑ์ให้มีความโดดเด่นดึงดูดความสนใจของผู้บริโภค ซึ่งการตกแต่งผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาในปัจจุบันสามารถทำได้ในทุกช่วงของกระบวนการผลิต เช่น เทคนิคการสร้างลวดลายหินอ่อน (Marbling) เป็นเทคนิคที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ในขณะการเตรียมดินและขณะการขึ้นรูป ทั้งในสภาวะดินนุ่มและดินหมาด (สุขุมาล, 2564) มีรูปแบบที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวคล้ายกับหินอ่อนในธรรมชาติ ทำได้ง่าย และสะดวกรวดเร็ว เทคนิคการสร้างลวดลายหินอ่อนให้กับเครื่องปั้นดินเผานั้น ทำได้โดยการใช้เนื้อดินที่มีสีแตกต่างกันหรือสียึดกันหลายๆ อย่างน้อย 2 สีหรือมากกว่า (ภานุพงศ์หลาบขาว, 2546) หรือใช้การผสมออกไซด์ในเนื้อดินให้เกิดสี แล้วนำวดผสมกันโดยที่สีของเนื้อดินนั้นยังไม่เป็นสีเดียวกัน ทำให้เกิดลวดลายแบบเส้นเป็นริ้วดินสี ที่เกิดขึ้นสมบูรณ์ในตัวเอง โดยที่เนื้อดินนั้นที่นำมาสร้างลวดลายหินอ่อนควรมีอัตราการหดตัวในขณะแห้งและขณะทำการเผาที่ใกล้เคียงกันหรือแตกต่างกันน้อยที่สุด (สุพรรณิการ์ และคณะ, 2562) สามารถขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน หรือการนวดดินสลักกันทำให้เกิดลวดลายแบบหินอ่อน เมื่อขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน และชุดแต่งผิวภายนอกเรียบร้อยแล้ว สามารถนำไปเผาเคลือบหรือไม่เคลือบก็ได้ ผิวด้านนอกของผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะคล้ายกับหินอ่อนธรรมชาติ ทำส่วนผสมเนื้อปั้นได้โดยไม่ต้องเตรียมดินหลักไว้ก่อน แล้วเติมเป็นออกไซด์สารให้สี (Oxide) ประมาณ ร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 12 เช่น สีนํ้าเงิน ใช้โคบอลต์ออกไซด์

(Cobalt oxide) สีนํ้าตาลใช้เฟอร์ริก ออกไซด์ (Ferric oxide) สีเขียวใช้โครมิกออกไซด์ (Chromic oxide) (เวนิช, 2546)

ซึ่งเทคนิคการสร้างลวดลายหินอ่อนของผลิตภัณฑ์เซรามิกนั้นมักจะใช้ในการศิลปะหรือ งานหัตถกรรม แต่ยังไม่สามารถพัฒนาไปสู่การสร้างสรรคผลงานในระบบอุตสาหกรรมได้ ซึ่งต้องมี การทดลองและทดสอบก่อนที่จะผลิตในจำนวนมาก ซึ่งปัจจัยที่สำคัญในการสร้างผลงาน ขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบดังนี้ 1) อัตราส่วนผสมของสารให้สีกับเนื้อดินปั้น 2) เทคนิคการจัดเรียงชั้นของดิน (layer) 3) เทคนิคการขึ้นรูป และ 4) กระบวนการเผาที่ถูกต้อง (เวนิช, 2546) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ริเริ่ม ศึกษาผลของออกไซด์ให้สีและการจัดเรียงตัวของเนื้อดินต่อการเกิดลวดลาย หินอ่อนของผลิตภัณฑ์ เซรามิกที่ขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปพัฒนาเพิ่มมูลค่า ให้กับผลิตภัณฑ์ชนิดสโตนแวร์ (Stoneware) และผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ เช่น พอร์ซเลน (Porcelain) ได้ และสามารถใช้เป็นแนวทางและข้อมูลในการนำองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยไปถ่ายทอดสู่วิสาหกิจ ชุมชน สถานประกอบการอุตสาหกรรมด้านเครื่องปั้นดินเผาที่สนใจได้ต่อไป

## 2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาการเกิดสี ความสว่างและค่าสีของเนื้อผลิตภัณฑ์ภายหลังการเผาจากออกไซด์ให้ สีที่แตกต่างกัน

2.2 เพื่อศึกษาลวดลายหินอ่อนของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่ใช้รูปแบบการจัดวางเนื้อดินปั้น ต่างกัน

2.3 เพื่อศึกษาลวดลายหินอ่อนของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่ขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนโดยใช้ ระยะเวลาในการขึ้นรูปต่างกัน

## 3. วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาลายหินอ่อนในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีการดำเนินการ วิจัย ไว้ดังนี้

3.1 กำหนดให้มีอัตราส่วนผสมแบบเจาะจง (Purposive sampling) โดยใช้ดินสโตนแวร์ Celaton Clay บริษัท พอทเทอรี เคลย์จำกัด (Pottery Clay) ผสมกับออกไซด์ให้สีโดยประยุกต์ ส่วนผสมจาก เวนิช สุวรรณโมลี (2546) ได้จำนวน 4 ส่วนผสม ดังนี้

3.1.1 ดินสโตนแวร์ Celaton Clay (กำหนดรหัสเป็น: CC) แบบดินเปียกพร้อมปั้น

3.1.2 Celaton Clay แบบดินเปียกพร้อมปั้นผสมกับโครมิกออกไซด์ (Chromic oxide) ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (กำหนดรหัสเป็น: CH)

3.1.3 Celaton Clay แบบดินเปียกพร้อมปั้นผสมกับโคบอลท์ออกไซด์ (Cobalt oxide) ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (กำหนดรหัสเป็น: CO)

3.1.4 Celaton Clay แบบดินเปียกพร้อมปั้นผสมกับเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (กำหนดรหัสเป็น: FE)

3.2 ชิ้นส่วนผสมด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิตอลบริษัท Mettler Toledo รุ่น PG203-S

3.3 นวดผสมดินสโตนแวร์ Celaton Clay กับออกไซด์ ในลักษณะการนวดดินปั้นแบบเปียก นวดด้วยมือด้วยเทคนิคแบบ Rough Kneading ซึ่งเหมาะกับดินก้อนเล็ก ตามขั้นตอนดังนี้ 1) ตบดินเป็นรูปไข่ 2) วางมือทั้งสองคู่กันบนดิน 3) ใช้อุ้งมือกดดินแล้วผลักออกไป 4) นวดตามขั้นตอนเดิมจนเป็นเนื้อเดียวกัน ตรวจสอบโดยการใช้เชือกตัดผ่าจนเนื้อดินเป็นสีออกไซด์ทั้งหมดจนไม่มีสีของดินสโตนแวร์ (สุขุมาล, 2564) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การนวดผสมดินสโตนแวร์กับออกไซด์

3.4 กำหนดรูปแบบการจัดวางเนื้อดินปั้น (Layer) ที่สร้างลายหินอ่อนด้วยวิธีการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน โดยใช้ส่วนผสมละ 100 กรัม ดังนี้ 1) CC 100 กรัม 2) CH 100 กรัม 3) CO 100 กรัม และ 4) FE 100 กรัม นำมาจัดวางเนื้อดินปั้น 2 รูปแบบ ดังนี้

3.4.1 การจัดวางเนื้อดินแบบเรียงเป็นชั้น โดยใช้ส่วนผสม จำนวน 8 สูตรดังนี้

สูตรที่ 1 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ ชั้นที่1 CH ชั้นที่ 2 CC

สูตรที่ 2 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ ชั้นที่1 CO ชั้นที่ 2 CH ชั้นที่ 3 CC

สูตรที่ 3 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ ชั้นที่ 1 CH ชั้นที่ 2 CC ชั้นที่ 3 CH และชั้นที่ 4 CC

สูตรที่ 4 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ ชั้นที่1 CO ชั้นที่ 2 CH ชั้นที่ 3 CC ชั้นที่ 4 CO ชั้นที่ 5 CH ชั้นที่ 6 CC

สูตรที่ 5 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ ชั้นที่1 FE ชั้นที่ 2 CC

สูตรที่ 6 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ ชั้นที่ 1 CO ชั้นที่ 2 FE ชั้นที่ 3 CC

สูตรที่ 7 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ ชั้นที่ 1 FE ชั้นที่ 2 CC ชั้นที่ 3 FE และชั้นที่ 4 CC

สูตรที่ 8 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ ชั้นที่ 1 CO ชั้นที่ 2 FE ชั้นที่ 3 CC ชั้นที่ 4 CO ชั้นที่ 5 FE ชั้นที่ 6 CC

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| CC | CC | CC | CC |
| CH | CH | CH | CH |
|    | CO | CC | CO |
|    |    | CH | CC |
|    |    |    | CH |
|    |    |    | CO |

(A) (B) (C) (D)

ภาพที่ 2 การจัดวางเนื้อดินแบบเรียงเป็นชั้น (A) สูตรที่ 1 (B) สูตรที่ 2 (C) สูตรที่ 3 (D) สูตรที่ 4



(A) (B) (C) (D)

ภาพที่ 3 การเตรียมเนื้อดินขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน (A) สูตรที่ 1 (B) สูตรที่ 2 (C) สูตรที่ 3 (D) สูตรที่ 4

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| CC | CC | CC | CC |
| FE | FE | FE | FE |
|    | CO | CC | CO |
|    |    | FE | CC |
|    |    |    | FE |
|    |    |    | CO |

(A) (B) (C) (D)

ภาพที่ 4 การจัดวางเนื้อดินแบบเรียงเป็นชั้น (A) สูตรที่ 5 (B) สูตรที่ 6 (C) สูตรที่ 7 (D) สูตรที่ 8

### 3.4.2 การวางเนื้อดินแบบม้วนเป็นวง โดยใช้ส่วนผสม จำนวน 8 สูตรดังนี้

สูตรที่ 1 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ วงที่ 1 CC วงที่ 2 CH

สูตรที่ 2 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ วงที่ 1 CC วงที่ 2 CH วงที่ 3 CO

สูตรที่ 3 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ วงที่ 1 CC วงที่ 2 CH วงที่ 3 CC และวงที่ 4 CH

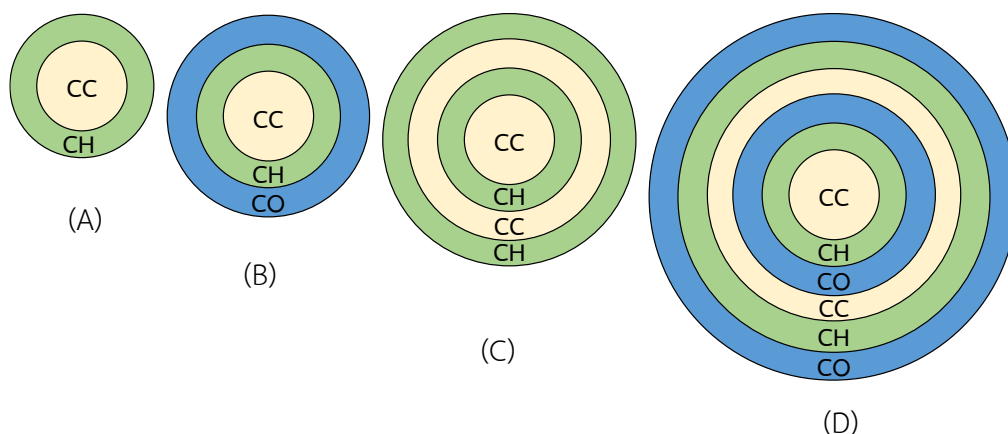
สูตรที่ 4 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ วงที่ 1 CC วงที่ 2 CH วงที่ 3 CO วงที่ 4 CC วงที่ 5 CH  
วงที่ 6 CO

สูตรที่ 5 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ วงที่ 1 CC วงที่ 2 FE

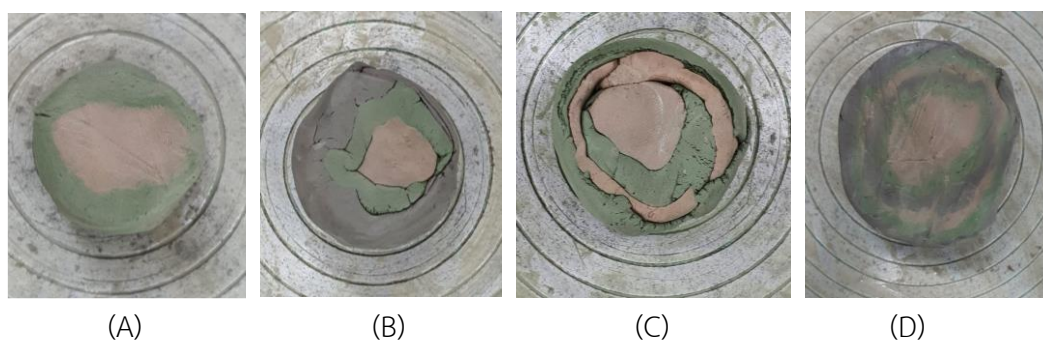
สูตรที่ 6 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ วงที่ 1 CC วงที่ 2 FE วงที่ 3 CO

สูตรที่ 7 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ วงที่ 1 CC วงที่ 2 FE วงที่ 3 CC และ วงที่ 4 FE

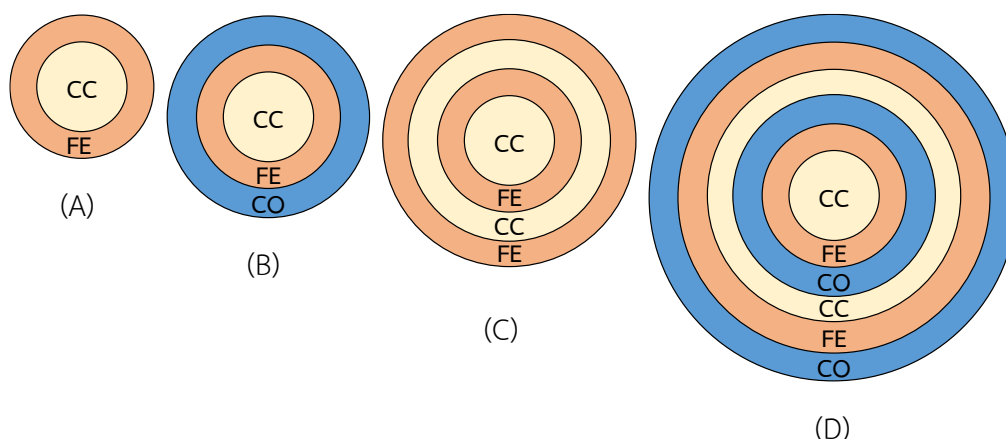
สูตรที่ 8 กำหนดส่วนผสม ดังนี้ วงที่ 1 CC วงที่ 2 FE วงที่ 3 CO วงที่ 4 CC วงที่ 5 FE  
วงที่ 6 CO



ภาพที่ 5 การวางเนื้อดินแบบม้วนเป็นวง (A) สูตรที่ 1 (B) สูตรที่ 2 (C) สูตรที่ 3 (D) สูตรที่ 4



ภาพที่ 6 การเตรียมเนื้อดินชั้นรูปด้วยแป้นหมุน (A) สูตรที่ 1 (B) สูตรที่ 2 (C) สูตรที่ 3 (D) สูตรที่ 4



ภาพที่ 7 การวางเนื้อดินแบบม้วนเป็นวง (A) สูตรที่ 5 (B) สูตรที่ 6 (C) สูตรที่ 7 (D) สูตรที่ 8

3.5 นำสูตรส่วนผสมที่เตรียมไว้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยแป้นหมุน (Wheel throwing) เป็น แก้วขนาดความสูง 10 เซนติเมตร ดังภาพที่ 8 โดยเตรียมสูตรส่วนผสม แบ่งเป็น 2 ก้อนต่อสูตร เพื่อนำมาขึ้นรูปด้วยแป้น โดยกำหนดเวลาในการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนเป็นผลิตภัณฑ์ แบ่งเป็น 2 ช่วง 1) ก้อนที่ 1 ใช้เวลาการขึ้นรูป 5 นาที และ 2) ก้อนที่ 2 ใช้เวลาการขึ้นรูป 10 นาที โดยจำนวนเวลาที่กำหนด คือระยะเวลาการขึ้นรูปรวมทุกขั้นตอน โดยมีขั้นตอนดังนี้ 1) การตั้งศูนย์ 2) การรีดดึงดิน 3) การปรับแต่งผิวและการปรับรูปทรงของผลิตภัณฑ์ และ 4) การใช้ใบมีดขูดแต่งผิวผลิตภัณฑ์ (Trimming) จนลายหินอ่อนปรากฏ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน (A) การตั้งศูนย์ (B) การรีดดึงดิน (C) การปรับแต่งผิวและการปรับรูปทรงของผลิตภัณฑ์ (D) การใช้ใบมีดขูดแต่งผิวผลิตภัณฑ์

3.6 นำผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนฝังให้แห้งแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศออกซิเดชัน (Oxidation) เผาด้วยเตาไฟฟ้าบริษัท Carbolite Gero Ltd. รุ่น CWF1300 เผาเย็นไฟ เป็นเวลา 15 นาที และนำผลิตภัณฑ์ออกจากเตาเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส

3.7 วิเคราะห์การเกิดสี โดยการสแกน (Scan) ด้วยเครื่อง Colorimeter Linshang รุ่น LS171 ได้แก่ รูปแบบรหัสสี (Color format) RGB และ รูปแบบรหัสสีตามเฉดสีของ Pantone Chart (Pantone-LS U Standard)

3.8 วิเคราะห์ความสว่างและค่าสีเนื้อผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง Chroma merter รุ่น CR-400 บริษัท Konica Minolta ในระบบสเกลสี (Color scale)  $L^*$ ,  $a^*$ , และ  $b^*$  ของ Hunter Lab Scale ซึ่งเป็นระบบการวิเคราะห์สีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน  $L^*$  จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า  $+L^*$  แสดงถึงสีขาว จนถึง  $-L^*$  แสดงถึงสีดำ โดยหากค่า  $L^*$  เพิ่มขึ้น หรือมีค่าเป็น  $+$  สีของเนื้อดิน จะเป็นสีอ่อนไปถึงสีขาว หากค่า  $L^*$  ลดลง หรือมีค่าเป็น  $-$  สีของเนื้อดินจะมีความเข้มมืดไปจนถึงดำ แกน  $a^*$  จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว ( $-a^*$ ) ไปจนถึงแดง ( $+a^*$ ) ส่วนแกน  $b^*$  จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน ( $-b^*$ ) ไปเหลือง ( $+b^*$ ) โดยสแกนบนผิวผลิตภัณฑ์ 3 จุด แล้วรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

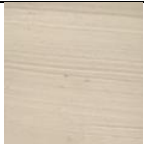
#### 4. ผลการวิจัย

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาลายหินอ่อนในครั้งนี้ ภายหลังจากดำเนินการทดลองมีผลการวิจัยดังนี้

4.1 ผลการศึกษาการเกิดสี ความสว่างและค่าสีของเนื้อผลิตภัณฑ์ภายหลังจากเผาจากออกไซด์ ให้สีที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส มีผลการศึกษาดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 พบว่าส่วนผสมในการทดลองภายหลังจากเผา มีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) มากที่สุด ได้แก่ สูตร CC ให้โทนสีครีม มีค่า  $L^*$  เท่ากับ +59.41 เนื่องจากไม่มีส่วนผสมของออกไซด์ให้สีจึงให้ความสว่างมากที่สุด ส่วนสูตรที่ผสมออกไซด์ให้สีพบว่า มีค่าความสว่างตามลำดับดังนี้ สูตร FE ให้โทนสีน้ำตาล มีค่า  $L^*$  เท่ากับ +38.75 สูตร CH ให้โทนสีเขียว มีค่า  $L^*$  เท่ากับ +25.41 และ สูตร CO ให้โทนสีน้ำเงิน มีค่า  $L^*$  เท่ากับ +15.92

ตารางที่ 1 การเกิดสี ความสว่างและค่าสี

| สูตร<br>ส่วนผสม | สี                                                                                 | RGB                | Pantone<br>Chart     | ค่าสีและความสว่าง |       |        |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------|-------------------|-------|--------|
|                 |                                                                                    |                    |                      | L*                | a*    | b*     |
| CC              |   | RGB<br>213,202,185 | Pantone-LS<br>7527 U | +59.41            | -1.57 | +18.64 |
| CH              |   | RGB<br>112,113,101 | Pantone-LS<br>4224 U | +25.41            | -3.60 | +15.48 |
| CO              |   | RGB<br>81,90,102   | Pantone-LS<br>2189 U | +15.92            | -3.82 | -3.38  |
| FE              |  | RGB<br>155,137,126 | Pantone-LS<br>4257 U | +38.75            | -0.07 | +13.67 |

4.2 ผลการศึกษาลวดลายหินอ่อนของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่ใช้รูปแบบการจัดวางเนื้อดินปั้นต่างกัน และขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนโดยใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปต่างกัน มีผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลวดลายหินอ่อนของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่ใช้รูปแบบการจัดวางเนื้อดินปั้นต่างกัน

| สูตรที่ | รูปแบบการจัดวางเนื้อดินปั้น                                                         |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|         | แบบเรียงเป็นชั้น                                                                    | แบบม้วนเป็นวง                                                                       | แบบเรียงเป็นชั้น                                                                     | แบบม้วนเป็นวง                                                                         |
|         | 5 นาที                                                                              | 5 นาที                                                                              | 10 นาที                                                                              | 10 นาที                                                                               |
| 1       |  |  |  |  |
| 2       |  |  |  |  |

| สูตรที่ | รูปแบบการจัดวางเนื้อดินปั้น |               |                  |               |
|---------|-----------------------------|---------------|------------------|---------------|
|         | แบบเรียงเป็นชั้น            | แบบม้วนเป็นวง | แบบเรียงเป็นชั้น | แบบม้วนเป็นวง |
|         | 5 นาที                      | 5 นาที        | 10 นาที          | 10 นาที       |
| 3       |                             |               |                  |               |
| 4       |                             |               |                  |               |
| 5       |                             |               |                  |               |
| 6       |                             |               |                  |               |
| 7       |                             |               |                  |               |
| 8       |                             |               |                  |               |

จากตารางที่ 2 ผลการศึกษาลวดลายหินอ่อนของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่ใช้รูปแบบการจัดวางเนื้อดินปั้นต่างกัน พบว่า การจัดวางเนื้อดินแบบเรียงเป็นชั้น และการจัดเรียงแบบม้วนวงสามารถสร้างริ้วลวดลายหินอ่อนได้ใกล้เคียงกัน และ พบว่า การจัดวางเนื้อดินแบบเรียงเป็นชั้นและแบบม้วนเป็นวง สูตรที่เกิดริ้วลวดลายหินอ่อนมากที่สุด ได้แก่ สูตรที่ 3 สูตรที่ 7 ซึ่งเป็นเรียงส่วนผสมสลับสี 4 ชั้น และ สูตรที่ 4 สูตรที่ 8 ซึ่งเป็นเรียงส่วนผสมสลับสีมากที่สุด คือ 6 ชั้น

และเมื่อศึกษาลวดลายหินอ่อนของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่ขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนโดยใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปต่างกัน พบว่า ระยะเวลาการขึ้นรูปรวมทุกขั้นตอน ตั้งแต่การตั้งศูนย์ การรีดดิน การปรับแต่งผิวและรูปทรงของผลิตภัณฑ์แล้วใช้ใบมีดชุดแต่งผิวผลิตภัณฑ์ (Trimming) จนลายหินอ่อนปรากฏ เป็นเวลา 10 นาที เป็นระยะเวลาที่สร้างริ้วลวดลายหินอ่อนได้เพิ่มขึ้น

## 5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 อภิปรายผลการวิจัย การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาลายหินอ่อนในครั้งนี้ สามารถอภิปรายผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาการเกิดสี ความสว่างและค่าสีของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา สามารถอภิปรายผลการวิจัย ได้ดังนี้ การเกิดสี สูตร CC ให้โทนสีครีม สูตร CH ให้โทนสีเขียว สูตร CO ให้โทนสีน้ำเงิน และสูตร FE ให้โทนสีน้ำตาล สอดคล้องกับงานวิจัยของ ปราโมทย์ ปันสกุล (2552) ที่ทดลองผสมเฟอร์ริกออกไซด์ในน้ำเคลือบเซรามิกส์ ร้อยละ 2 - 6 แล้วได้สีน้ำตาล ถึงน้ำตาลเข้ม และ สอดคล้องกับ ยุพดี สีนมาก (2559) ที่พบว่า ดินที่มีเฟอร์ริกออกไซด์ในส่วนผสมจะมีสีน้ำตาล และ น้ำตาลเข้ม ส่วนค่าความสว่าง สูตร CC ให้โทนสีครีม มีค่า  $L^*$  เท่ากับ +59.41 เนื่องจากไม่มีส่วนผสมของออกไซด์ให้สีจึงให้ความสว่างมากที่สุด ส่วนสูตรที่ผสมออกไซด์ให้สีพบว่า มีค่าความสว่างตามลำดับดังนี้ สูตร FE ให้โทนสีน้ำตาล มีค่า  $L^*$  เท่ากับ +38.75 สูตร CH ให้โทนสีเขียว มีค่า  $L^*$  เท่ากับ +25.41 และ สูตร CO ให้โทนสีน้ำเงิน มีค่า  $L^*$  เท่ากับ +15.92 ซึ่งสอดคล้องกับ สุขุมลสารเกษตริน (2564) ที่กล่าวว่า โคบอลต์ออกไซด์ให้สีเข้มมากเพราะเป็นสารให้สีที่มีความรุนแรงมากที่สุดจากออกไซด์ให้สีทั้งหมด

5.1.2 ผลการศึกษาลวดลายหินอ่อนของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่ใช้รูปแบบการจัดวางเนื้อดินปั้นต่างกัน สามารถอภิปรายผลการวิจัย ได้ดังนี้ การจัดวางเนื้อดินแบบเรียงเป็นชั้น และการจัดเรียงแบบม้วนวง สามารถสร้างริ้วลวดลายหินอ่อนได้ใกล้เคียงกันหรือคล้ายคลึงกัน ซึ่ง เวนิช สุวรรณโมลี (2546) กล่าวว่า ลวดลายที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถกำหนดให้มีลวดลายแบบเดียวกันได้ทุกประการ เทคนิคนี้มักจะผลิตผลิตภัณฑ์ผลงานในรูปแบบงานศิลปะและหัตถกรรมมากกว่า และพบว่า สูตรที่เกิดริ้วลวดลายหินอ่อนมากที่สุด ได้แก่ สูตรที่ 3 สูตรที่ 7 ซึ่งเป็นเรียงส่วนผสมสลับสี 4 ชั้น และ สูตรที่ 4 สูตรที่ 8 เนื่องจากเป็นเรียงส่วนผสมสลับเนื้อดินสีมากที่สุด คือ 6 ชั้น

5.1.3 ผลการศึกษาผลลดความเครียดของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่ใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปต่างกัน สามารถอธิบายผลการวิจัย ระยะเวลาการขึ้นรูปรวมทุกขั้นตอน ตั้งแต่การตั้งศูนย์ การรีดดิน การปรับแต่งผิวและรูปทรงของผลิตภัณฑ์แล้วใช้ใบมีดชุดแต่งผิวผลิตภัณฑ์ จนลายหินอ่อนปรากฏ เป็นเวลา 10 นาที เป็นระยะเวลาที่สร้างริ้วรอยลดความเครียดได้เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มระยะเวลาการขึ้นรูปจะทำให้เนื้อดินผสมกันเป็นริ้วเป็นเส้นที่มีรอยลดความเครียดมากขึ้นตามเทคนิคของการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน

5.2 สรุปผลการวิจัย การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาลายหินอ่อน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.2.1 ผลการศึกษาการเกิดสี ความสว่างและค่าสีของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา สามารถสรุปผลการวิจัย ได้ดังนี้ ส่วนผสมในการทดลองภายหลังการเผา มีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) มากที่สุดได้แก่ สูตร CC ให้โทนสีครีม มีค่า  $L^*$  เท่ากับ +59.41 เนื่องจากไม่มีส่วนผสมของออกไซด์ให้สีจึงให้ความสว่างมากที่สุด ส่วนสูตรที่ผสมออกไซด์ให้สีมีค่าความสว่างตามลำดับดังนี้ สูตร FE ให้โทนสีน้ำตาล มีค่า  $L^*$  เท่ากับ +38.75 สูตร CH ให้โทนสีเขียว มีค่า  $L^*$  เท่ากับ +25.41 และ สูตร CO ให้โทนสีน้ำเงิน มีค่า  $L^*$  เท่ากับ +15.92

5.2.2 ผลการศึกษาผลลดความเครียดของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่ใช้รูปแบบการจัดวางเนื้อดินปั้นต่างกัน สามารถสรุปผลการวิจัย ได้ดังนี้ การจัดวางเนื้อดินแบบเรียงเป็นชั้น และการจัดเรียงแบบเป็นวงสามารถสร้างริ้วรอยลดความเครียดได้ใกล้เคียงกัน และ พบว่า ทั้งการจัดวางเนื้อดินแบบเรียงเป็นชั้นและแบบม้วนเป็นวง สูตรที่เกิดริ้วรอยลดความเครียดมากที่สุด ได้แก่ สูตรที่ 3 สูตรที่ 4 สูตรที่ 7 และ สูตรที่ 8

5.2.3 ผลการศึกษาผลลดความเครียดของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่ใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปต่างกัน สามารถสรุปผลการวิจัย ได้ดังนี้ ระยะเวลาการขึ้นรูปรวมทุกขั้นตอน ตั้งแต่การตั้งศูนย์ การรีดดิน การปรับแต่งผิวและรูปทรงของผลิตภัณฑ์แล้วใช้ใบมีดชุดแต่งผิวผลิตภัณฑ์จนลายหินอ่อนปรากฏ เป็นเวลา 10 นาที เป็นระยะเวลาที่สร้างริ้วรอยลดความเครียดได้เพิ่มขึ้น

โดยสรุปผลการใช้ออกไซด์ให้สี และการจัดเรียงตัวของเนื้อดินต่อการเกิดผลลดความเครียดของผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่ขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน สามารถสรุปว่า รูปแบบการจัดวางเนื้อดินปั้นแบบเรียงเป็นชั้นและแบบม้วนเป็นวงสามารถสร้างริ้วรอยลดความเครียดได้ใกล้เคียงกัน ระยะเวลาในการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนที่เหมาะสมคือ 10 นาที สูตรที่เหมาะสมได้แก่ สูตรที่ 3 (เรียง 4 ชั้น) สูตรที่ 4 (เรียง 6 ชั้น) สูตรที่ 7 (เรียง 4 ชั้น) และสูตรที่ 8 (เรียง 6 ชั้น) ดังภาพที่ 9



(A)



(B)

ภาพที่ 9 (A) ผลิตภัณฑ์สูตรที่ 8 แบบเรียงเป็นชั้น ใช้เวลาในการขึ้นรูป 10 นาที  
และ (B) ผลิตภัณฑ์สูตรที่ 8 แบบม้วนเป็นวง ใช้เวลาในการขึ้นรูป 10 นาที

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีและนวัตกรรมเซรามิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย ซึ่งทำให้การดำเนินการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณ มา ณ โอกาสนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- ปราโมทย์ ปิ่นสกุล. (2552). การทำน้ำเคลือบเซรามิกส์จากเศษผงปูนปลาสเตอร์. **วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์**, 4(1), 63-71.
- ภานุพงศ์หลาบขาว. (2546). ผลิตภัณฑ์ลายหินอ่อนเซรามิก. **วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ**, 51(163), 1-2.
- ยุพดี สีนมาก. (2559). การศึกษาความเหมาะสมของดินในพื้นที่อำเภอเมืองจังหวัดสระแก้วเพื่อใช้ผลิตเครื่องปั้นดินเผา. **วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำปาง**, 9(1), 61-71.
- วัชรินทร์ แซ่เตียม เต๋นรักซ้อน, และปอยหลวง บุญเจริญ. (2555). การพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีการตกแต่งผิวดินด้วยเทคนิคสกาพิโตบนเครื่องปั้นดินเผาด่านเกวียนแก่ผู้ประกอบการเครื่องปั้นดินเผาชุมชนด่านเกวียนจังหวัดนครราชสีมา. (รายงานวิจัย). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, นครราชสีมา.
- เวนิช สุวรรณโมลี. (2546). อเกตแวร์. **วารสารเซรามิกส์**, 7(17), 36-39.



สุขุมล สาระเกษตริน. (2564). **เครื่องปั้นดินเผาการออกแบบและปฏิบัติงาน**. กรุงเทพฯ: 50 Press printing.

สุพรรณิการ์ ตีรณปริญญ์, จตุรพร เทวกุล, และโอภาส นุชนิยม. (2562). **การจัดการความรู้โครงการนำองค์ความรู้ทางด้านเทคนิคดินสืมาใช้ในการสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา**. (รายงานวิจัย). สถาบันบัณฑิตพัฒนศิลป์, กรุงเทพฯ.

# การพัฒนาเครื่องอัดก้อนมะขามเปียกกึ่งอัตโนมัติสำหรับธุรกิจชุมชน

## DEVELOPMENT OF SEMI-AUTOMATIC TAMARIND BRIQUETTE MACHINE FOR COMMUNITY BUSINESS

วิทยา หนูช่างสิงห์, ธนภัทร มะณีแสง\*, มานะ อินพรมมี

Wittaya Nuchangsing, Thanapat Maneesaeng\*, Mana Inpromme

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์ ประเทศไทย 67000

Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University,

Muang, Phetchabun, Thailand, 65000

\*Corresponding author e-mail: nazzdex.man@pcru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 10 ธันวาคม 2566

วันที่แก้ไขบทความ 4 มิถุนายน 2567

วันที่ตอบรับบทความ 7 มิถุนายน 2567

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาเครื่องอัดก้อนมะขามเปียกกึ่งอัตโนมัติ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของกระบวนการอัดก้อนแบบเดิมที่ใช้แรงงานคน ซึ่งใช้เวลานาน (เฉลี่ย 55 วินาทีต่อชิ้น) และมะขามที่ได้มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ เครื่องอัดก้อนนี้ใช้ระบบนิวแมติกส์ ควบคุมการดันแผ่นเพลท 4 ทิศทางไปยังชิ้นงานเพื่อให้ได้รูปทรงที่ต้องการ จากการทดสอบพบว่าแรงดัน 600 kPa เหมาะสมที่สุด โดยสามารถอัดก้อนมะขามได้รวดเร็วเพียง 8 วินาทีต่อชิ้น เพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน 5 เท่าเมื่อเทียบกับการใช้แรงงานคน และมีระยะเวลาคืนทุน 1 เดือน 1 วัน เท่านั้น ส่วนผลลัพธ์จากการประเมินความพึงพอใจโดยผู้ใช้งานพบว่าผลการประเมินในทุกๆ ด้านอยู่ในระดับดี จึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องอัดก้อนมะขามสามารถนำมาใช้ทดแทนวิธีการทำงานแบบเดิมในธุรกิจระดับชุมชนได้ และผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่จัดการกับความไร้ประสิทธิภาพในกระบวนการอัดก้อนมะขามแบบดั้งเดิมเท่านั้น แต่ยังแสดงให้เห็นถึงความก้าวหน้าในการบูรณาการระบบนิวแมติกส์กับการช่วยความเร็วและมาตรฐานในกระบวนการอัดก้อนมะขาม

**คำสำคัญ:** เครื่องอัดก้อนมะขามเปียกกึ่งอัตโนมัติ, มะขามเปรี้ยว, กระบวนการอัดก้อน

### Abstract

This research aims to develop a semi-automatic wet tamarind briquette machine to remove the limitations of the time-consuming traditional labor-intensive briquetting process (average 55 seconds per piece), producing unevenly briquette-shaped tamarinds. This briquette machine employed a pneumatic system to control the pressure of four plates toward the workpieces, ensuring the formation of the desired shape. According to the test, it revealed that the optimal pressure of 600 kPa resulted in briquette production in a mere 7.79 seconds per piece. This represented a remarkable increase in efficiency of 5.87-fold compared to manual labor and required only a rapid payback period of 1 month and 1 day. Regarding user satisfaction assessments, they consistently yielded positive results in all aspects at a good level. Therefore, it can be concluded that the briquette machine develops as a viable replacement for traditional methods in community-based businesses. The research findings not only addressed the inefficiencies of conventional briquetting method but also showcased the advancement of pneumatic system integrated with the enhancement of both speed and consistency during the tamarind briquetting process.

**Keywords:** Semi-Automatic Tamarind Briquette Machine, Sour tamarind, Briquetting process

### 1. บทนำ

เทคโนโลยีการอัดก้อนเป็นวิธีการแปรรูปอาหารที่เป็นนวัตกรรมใหม่ ซึ่งอาหารจะถูกเปลี่ยนเป็นก้อนที่สะดวก ให้ประโยชน์หลายประการ เช่น ง่ายต่อการบริโภค อายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน เพิ่มมูลค่า และการขนส่งที่มีประสิทธิภาพ ทั้งหมดนี้ยังคงคุณค่าทางโภชนาการดั้งเดิม ตัวอย่างเช่น อัจฉรา และคณะ (2562) ได้พัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องแกงผักได้แบบก้อนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาด้วยเทคโนโลยีไมโครเวฟ เผยให้เห็นการยืดอายุการเก็บรักษาได้ถึง 126 วัน เช่นเดียวกับกรมวิทยาศาสตร์บริการที่คิดค้นผลิตภัณฑ์กะปิอัดก้อน ผลิตภัณฑ์นี้หลังจากผ่านกรรมวิธีแล้วมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้นถึง 1 ปี (เจนจิรา, 2563) เช่นเดียวกันกับในงานวิจัยของนันท์ปภัตร์ และคณะได้พัฒนาผลิตภัณฑ์ปลาอัดก้อนสำเร็จรูป และทำการวิจัยเกี่ยวกับกลยุทธ์ทางการตลาดเพื่อเอื้อต่อการขยายการผลิตสู่เชิงพาณิชย์ (นันท์ปภัตร์, 2565) งานวิจัยเหล่านี้ได้แสดงให้เห็นถึงความพยายามที่พัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ที่ต้องการความสะดวกและรวดเร็วในการทำอาหาร แต่ยังคงคุณค่าสารอาหารได้ดั้งเดิม



นอกจากเทคโนโลยีการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารอัดก้อนแล้วยังมีกลุ่มนักวิจัยที่ได้พัฒนาเครื่องอัดก้อน ในรูปแบบต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในกระบวนการผลิต ตัวอย่างเช่น ชโลธร และคณะ (2561) ประสบความสำเร็จในการออกแบบเครื่องอัดก้อนข้าว โดยใช้มอเตอร์ขนาด 0.25 แรงม้า ขับเพลาลูกเบี้ยว จึงลำเลียงข้าวยาไปยังแป้นอัดเพื่ออัดให้เป็นก้อนที่มีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกัน ธนศิษฐ์ และคณะ (2565) ได้พัฒนาเครื่องอัดลูกอมขิง โดยใช้หลักการลำเลียงเนื้อขิงผ่านชุดสกรูไปขึ้นรูปยังหน้าแปลนออกมาเป็นรูปทรงกระบอก จากการทดสอบพบว่าเครื่องจักรมีกำลังการผลิตสูงสุดที่ 162.48 กรัมต่อนาที และรูปทรงที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายทั่วไป ซึ่งทั้งหมดนี้แสดงถึงความพยายามขององค์กรร่วมสมัยในการรวมเทคโนโลยีเข้ากับกระบวนการผลิตของตน โดยมีเป้าหมายเพื่อลดต้นทุนแรงงานและสร้างมาตรฐานให้กับผลิตภัณฑ์

มูลค่าการตลาดของมะขามเปรี้ยวในประเทศคาดว่าจะสูงถึง 200 ล้านบาท กว่าร้อยละ 60 ของการผลิตมุ่งสู่การบริโภคภายในประเทศ (วศิน, 2565) ซึ่งกลุ่มแปรรูปมะขามไร่บุญคงบ้านยาวิ มีความเชี่ยวชาญในการผลิตผลิตภัณฑ์จากมะขามหลากหลายประเภท ทั้งมะขามหวาน มะขามแปรรูป รวมถึงมะขามเปรี้ยว ผลผลิตจากการปลูกมะขามเปรี้ยวมีมูลค่าสูงถึง 5,698 บาทต่อไร่ ซึ่งหากจำหน่ายเป็นฝักดิบจะสามารถจำหน่ายได้ในราคากิโลกรัมละ 17-20 บาท แต่เมื่อขายเป็นมะขามฝักสุกที่ยังไม่แกะเมล็ด ราคาจะสูงขึ้นอยู่ที่กิโลกรัมละ 23-30 บาท นอกจากนี้เมื่อนำไปแปรรูป ราคาสูงขึ้นถึงกิโลกรัมละ 85 บาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2565) หนึ่งในผลิตภัณฑ์ของกลุ่มแปรรูปมะขามไร่บุญคงคือมะขามเปียกอัดก้อนที่ได้รับความนิยมเป็นพิเศษ โดยมีฐานลูกค้าจำนวนมากที่มาจากต่างประเทศ โดยเฉพาะในสหราชอาณาจักรและแคนาดา ที่นิยมใช้มะขามเปียกเป็นส่วนประกอบสำคัญในอาหารไทย ไม่ว่าจะเป็น ต้มยำกุ้ง ต้มปลา ต้มยำไก่บ้าน และอาหารขึ้นชื่อระดับโลกอย่าง ต้มยำกุ้ง (Good life Update, 2017) การใช้มะขามเปียกแพร่หลายในอาหารทั้งในประเทศและต่างประเทศทำให้สถานะของมันกลายเป็นส่วนประกอบสำคัญในการสร้างสรรค์อาหารทั่วโลก สิ่งนี้ตอกย้ำความสำคัญทางเศรษฐกิจและความต้องการที่เพิ่มขึ้นสำหรับผลิตภัณฑ์จากมะขามเปรี้ยว ควบคู่ไปกับความสามารถในการทำกำไรและความต้องการผลิตภัณฑ์แปรรูป ทำให้มะขามเปรี้ยวเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับเกษตรกรที่แสวงหาการลงทุนด้านการเกษตรที่ยั่งยืน

ขั้นตอนการผลิตมะขามอัดก้อนในปัจจุบัน เริ่มจากนำมะขามเปรี้ยว 454 กรัม ที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง บรรจุลงถุงพลาสติก จากนั้นจึงใช้บล็อกไม้กดมะขามให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าก่อนบรรจุลงในกล่องที่บีบแสงต่อไป รวมระยะเวลาทั้งหมดของการผลิตแต่ละก้อนเฉลี่ยแล้วอยู่ที่ประมาณ 2.32 นาที แต่เฉพาะขั้นตอนการอัดก้อนอยู่ที่ 55 วินาที แต่อย่างไรก็ตามวิธีการผลิตแบบเดิมมีหลายประเด็นที่ขัดขวางประสิทธิภาพ และบ่อยครั้งทำให้เวลาการทำงานเพิ่มสูงขึ้น ปัญหาสำคัญประการหนึ่งเกิดจากรกของมะขามซึ่งมักทะลุถุงพลาสติก ทำให้ผู้ประกอบการต้อง

บรรจุหม่ใหม่ตั้งแต่ต้น นอกจากนี้กระบวนการบรรจุมักจะพบสิ่งเจือปน และมักจะประสบปัญหา  
รูปร่างไม่สม่ำเสมอเป็นประจำทำให้ยากต่อการบรรจุ

ดังนั้นเพื่อจัดการกับความท้าทายเหล่านี้ วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่อง  
อัดก้อนมะขามโดยใช้ระบบนิวแมติกส์ โดยอาศัยหลักการทำงานของระบบนิวแมติกส์หรือระบบที่ใช้  
ลมเป็นตัวกลางในการขับเคลื่อนและควบคุมเครื่องจักรและอุปกรณ์เสริมทดแทนการใช้แรงงานคนได้  
อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีจุดเด่นคือความแม่นยำ ความเร็ว สามารถทนทานต่อการกระเปิดสูง และม  
ีความสะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จากคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์เหล่านี้ ทำให้พบการใช้งานอย่าง  
กว้างขวางในความก้าวหน้าของเครื่องจักรสำหรับกระบวนการผลิตและบรรจุภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น ใน  
งานวิจัยของ อรุณ และคณะ (2560) อรุณ และวิมล (2561) และปวรุตม์ (2563) โดยอรุณ และคณะ  
(2560) และ อรุณ และวิมล (2561) ได้ประยุกต์ใช้ระบบนิวแมติกส์ กับกระบวนการบรรจุหนังปลา  
กะพงปรุงรสทอดกรอบ จากนั้น ปวรุตม์ (2563) ได้ประยุกต์ใช้ระบบนิวแมติกส์ ในการปรับปรุง  
กระบวนการบรรจุน้ำปลาร้าให้เป็นรูปแบบกึ่งอัตโนมัติ เป็นต้น ความพยายามในการวิจัยเหล่านี้ได้  
เน้นให้เห็นถึงข้อได้เปรียบโดยธรรมชาติของระบบนิวแมติกส์ เนื่องจากสามารถจัดการกับความท้าทาย  
ที่มีอยู่ในกระบวนการผลิตและบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นการประยุกต์ใช้ระบบนิวแมติกส์กับการออกแบบและ  
สร้างเครื่องอัดก้อนมะขามเปียกในงานวิจัยชิ้นนี้คาดว่าจะสามารถแก้ปัญหากระบวนการผลิตและ  
บรรจุภัณฑ์ในปัจจุบัน ซึ่งจะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและความสม่ำเสมอในผลิตภัณฑ์มะขามอัด  
ก้อน ซึ่งการระบบการผลิตนี้สามารถปรับปรุงการดำเนินงาน และลดปัญหาที่เกี่ยวข้องกับสิ่งเจือปน  
ท้ายที่สุดแล้วการนำเครื่องอัดก้อนมะขามมาใช้ในกระบวนการผลิต จะสามารถลดต้นทุนแรงงาน เพิ่ม  
คุณภาพ และสร้างมาตรฐานใหม่ในการผลิตเพื่อสร้างความมั่นใจให้กับลูกค้าและผู้บริโภค

## 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อพัฒนาเครื่องอัดก้อนมะขามเปียกโดยใช้ระบบนิวแมติกส์ สำหรับธุรกิจขนาดเล็ก
- 2.2 เพื่อทดสอบสมรรถนะในการทำงานของเครื่องจักรและประเมินประสิทธิภาพจากผู้ใช้งาน

## 3. วิธีดำเนินงานวิจัย

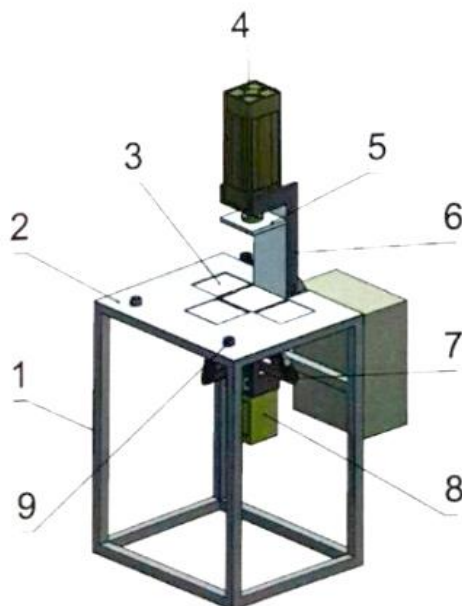
การวิจัยนี้สามารถแบ่งรายละเอียดการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย

- 1) ส่วนประกอบที่สำคัญ และหลักการทำงานของเครื่องจักร
- 2) การจัดเตรียมกลุ่มตัวอย่าง
- 3) การทดสอบสมรรถนะ
- 4) การประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้งาน

โดยสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

### 3.1 ส่วนประกอบที่สำคัญ และหลักการทำงานของเครื่องจักร

3.1.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดก้อนมะขามประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่มีความสำคัญ 9 ชิ้นส่วนหลักดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องอัดก้อนมะขามต้นแบบ

1) โครงสร้างหลัก (หมายเลข 1) ทำหน้าที่ยึดส่วนประกอบต่าง ๆ โดยใช้เหล็กกล่อง ขนาด 2 x 2" และมีขนาด 450 x 600 X 70 mm

2) แผ่นปิดด้านบนโครงสร้าง (หมายเลข 2) จากแผ่นสแตนเลส SUS304 ขนาด 1 x 20 x 450 mm

3) ชุดแผ่นเพลทส่วนล่าง (หมายเลข 3) ทำหน้าที่อัดก้อนมะขามให้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม 4 ด้าน สร้างจากเหล็กเพลทหนา 12 mm โดยด้านข้างมีขนาด 110 mm ยาว 120 mm ส่วนด้านหน้ากว้าง 140 mm ยาว 110 mm ออกแบบโดยใช้แนวคิดการกดอัดจากด้านล่างคล้ายกับระบบการทำงานของเครื่องอัดถ่านแท่งแห้งสำหรับสัปปะหลัง (ธารินี และประเทือง, 2548) ที่ขึ้นงานที่ต้องการมีรูปร่างคล้ายกัน แต่เพื่อให้ต้นทุนต่ำที่สุดจึงต้องออกแบบกลไกการควบคุมแผ่นเพลท 3 ด้านโดยใช้การเคลื่อนที่ของกระบอกสูบเพียงครั้งเดียว โดยใช้แนวคิดการออกแบบจากการทำงานของร้อมมีประกอบด้วย 2 ส่วน ด้วยขายึดแผ่นเพลท และชุดกลไกดันแผ่นเพลท ดังภาพที่ 2

4) กระบอกแรงดันระบบนิวแมติกส์ (หมายเลข 4 และหมายเลข 8) ทำหน้าที่ส่งกำลังให้แผ่นเพลทกดอัดก้อนมะขามให้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ใช้วาล์วที่มีการควบคุม 2 ทาง 2 ตำแหน่งปกติปิด (2/2 D.C. Valve Normally Closed) (เดชฤทธิ์, 2553) โดยใช้ช่องแรกเป็นท่อภายในวาล์วเป็น

ทางผ่านของลมไปในทิศทางการดันแผ่นเพลทไปยังชิ้นงาน ส่วนช่องที่ 2 ปิดกันไม่ให้ลมผ่านได้ ถ้าหากถึงแรงดันลมออกจากระบบ แผ่นเพลทก็จะกลับไปตำแหน่งเดิม โดยส่วนบนมีก้านสูบ (หมายเลข 4) กว้าง 80 mm ยาว 300 mm และส่วนล่าง (หมายเลข 8) กว้าง 20 mm ยาว 200 mm สามารถสร้างแรงดันอากาศได้สูงสุดเท่ากับ  $10.19 \text{ kg/cm}^2$

5) แผ่นเพลทอัดส่วนบน (หมายเลข 5) ทำหน้าที่อัดก้อนมะขามให้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม สร้างจากเหล็กเพลทหนา 12 mm กว้าง 140 mm ยาว 119 mm ส่วนกลางของแผ่นเจาะรูขนาด 7 mm จำนวน 2 รู และรูขนาด 20 mm 1 รู

6) โครงยึดอุปกรณ์การอัด (หมายเลข 6) ทำหน้าที่ยึดรับอุปกรณ์ส่งแรงดันอากาศ สร้างจากเหล็กเพลทหนา 12 mm กว้าง 140 mm ยาว 160 mm สูง 582 mm

7) ส่วนควบคุม (หมายเลข 7) ทำหน้าที่เป็นชุดวงจรควบคุมระบบไฟฟ้าและระบบนิวแมติกส์ในการทำงานของเครื่องอัดมะขามกึ่งอัตโนมัติ ประกอบด้วย

7.1) สวิตช์ (เปิด/ปิด) ระบบไฟฟ้า 24 V

7.2) หลอดไฟสีแดง 1 หลอดสวิตช์ควบคุมการทำงาน 24 V

7.3) ตัวแปลงและจ่ายไฟฟ้า (Power Supply) 220 VDC ADPT 24 V

7.4) รีเลย์ (Relay) 3 ตัว

7.5) โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valve) 24 V

8) เซนเซอร์ตรวจจับแม่เหล็ก (Sensor) 24 V อุปกรณ์สำคัญในการควบคุมระยะการกดอัดเพื่อให้มะขามเปียกเป็นก้อนตามที่ผู้ประกอบการต้องการ อุปกรณ์ตรวจจับแม่เหล็กจะถูกติดตั้งไว้ด้านนอกของกระบอกลม และสามารถปรับระดับขึ้นลงได้ การประยุกต์ใช้สัญญาณตรวจจับแม่เหล็กวงแหวนตรงกลางของลูกสูบ เมื่อแผ่นวงแหวนถูกดันมายังตำแหน่งที่กำหนดไว้ อุปกรณ์ตรวจจับจะตรวจพบแม่เหล็กจำนวนมาก และส่งสัญญาณไปยังส่วนควบคุมเอาต์พุตทันที

9) เกจวัดปรับแรงดันและกรองอากาศที่สามารถควบคุมแรงดันได้  $1-10.19 \text{ kg/cm}^2$  โดยควบคุมการกรองแรงดันอากาศก่อนส่งไปยังกระบอกแรงดันระบบนิวแมติกส์ ทำให้แรงดันคงที่อยู่เสมอ (บุญธรรม, 2557) ในงานวิจัยชิ้นนี้นำเอาการตั้งค่าของเกจวัดปรับแรงดันมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าแรงดันที่เหมาะสมในการอัดก้อนมะขาม

### 3.1.2 หลักการทำงานของเครื่องจักร

เครื่องจักรจำเป็นต้องอาศัยพลังงานสองรูปแบบคือ พลังงานไฟฟ้า และแรงดันอากาศผ่านระบบการทำงานของเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง เมื่อผู้ปฏิบัติงานวางชิ้นงานลงบนแผ่นเพลทอัดส่วนล่าง ขั้นตอนต่อไปคือสั่งการผ่านสวิตช์ควบคุมการทำงานเพื่อให้เครื่องอัดแรงดันอากาศ (Compressor) ส่งกำลังลมมายังเกจวัดปรับแรงดัน จากนั้นระบบกรองอากาศจะทำหน้าที่ควบคุม

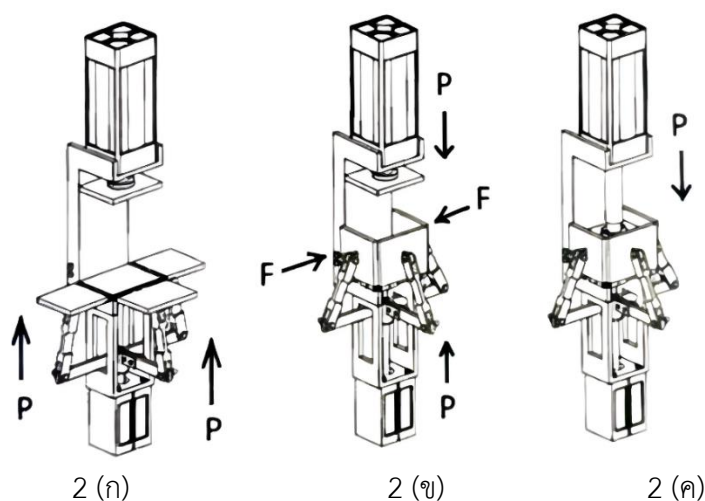
แรงดันไปยังโซลินอยด์วาล์ว (Solenoid valve) ทั้งสองตัว ซึ่งทำหน้าที่ส่งแรงดันอากาศไปยังกระบอกลมทั้งสองส่วน โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบอกลมส่วนล่างจะดันชุดกลไกดันแผ่นเพลทกับชุดแผ่นเพลทอัด ส่วนล่างขึ้นมาประกบกันให้ก้อนมะขามเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ดังภาพที่ 2 (ก)

ขั้นตอนที่ 2 กระบอกลมส่วนบนจะดันแผ่นเพลทอัดส่วนบนลงมาเพื่ออัดก้อนมะขามเป็ยตามระยะที่ตั้งค่าเอาไว้ ค้างกระบอกลมไว้สักครู่เพื่อให้ได้ก้อนมะขามตามรูปทรงและลักษณะตามที่ต้องการก่อนยกขึ้นดังภาพที่ 2 (ข)

ขั้นตอนที่ 3 หลังจากอัดก้อนมะขามเป็ยได้ตามรูปทรงและขนาดที่ต้องการแล้ว กระบอกลมทั้งสองจะชักกลับและกลไกกับแผ่นเพลทอัดจะเคลื่อนที่กลับที่เดิมดังภาพที่ 2 (ค)

ซึ่งหลังจากแผ่นเพลทอัดจะเคลื่อนที่กลับที่เดิมผู้ปฏิบัติงานสามารถนำชิ้นงานที่มีรูปทรงตามที่ต้องการออกจากเครื่องจักร และเตรียมพร้อมนำชิ้นงานที่จัดเตรียมไว้ขึ้นไปมาทำต่อได้ทันที จนกว่าจะได้มะขามอัดก้อนครบตามจำนวนที่ต้องการ



ภาพที่ 2 ระบบการของกลไกการอัดก้อนมะขาม

### 3.2 การจัดเตรียม

ลักษณะผลิตภัณฑ์ตามความต้องการของลูกค้าคือ มะขามเป็ยอัดก้อนรูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 120 x 140 x 40 mm น้ำหนัก 454 g ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4 จากนั้นปล่อยให้เย็นในอุณหภูมิห้อง ก่อนบรรจุลงถุงพลาสติก และใส่ลงในถุงพลาสติกใส ขนาด 7 x 9" ซึ่งอุณหภูมิของมะขามเป็ยไม่มีผลต่อคุณภาพมะขามก้อน ดังนั้นในการทดลองจึงสามารถใช้มะขามที่เย็นในอุณหภูมิห้องได้



ภาพที่ 3 การเตรียมชิ้นงานก่อนอัดก้อน

### 3.3 การทดสอบสมรรถนะ

การทดสอบหาสมรรถนะการทำงานของเครื่องอัดมะขามเปียกมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 การทดสอบเพื่อหาแรงดันอากาศที่เหมาะสม

เพื่อหาแรงอัดที่เหมาะสมของเครื่องอัดก้อนมะขาม การทดลองเริ่มจากการตั้งค่าแรงดันอากาศจากกระบอกแรงดันระบบนิวแมติกส์ ที่ 200 400 600 และ 700 kPa ตามลำดับ โดยในแต่ละการตั้งค่าจะทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งแรงดันอากาศที่เหมาะสมจะพิจารณาจากลักษณะของรูปทรงและความหนาแน่นของเนื้อมะขามหลังจากการอัดในแต่ละการทดลอง และเวลาที่ใช้

#### 3.3.2 การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างแรงงานคน

เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างกันระหว่างการทำงานด้วยแรงงานคนที่ใช้วิธีการทำงานแบบเดิม และเครื่องจักรพัฒนาขึ้นเพื่อเปลี่ยนแปลงวิธีการทำงานให้รวดเร็วขึ้น ดังนั้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานจะใช้เวลาพิจารณาจากระยะเวลาการทำงาน โดยต้องอัดมะขามให้ได้น้ำหนัก 454 g ให้มีขนาด กว้าง 120 x 140 x 40 mm

### 3.4 การประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้งาน

เครื่องอัดก้อนมะขามจะถูกประเมินโดยผู้ที่มีประสบการณ์ทำงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตมะขามเปียกอัดก้อนจำนวน 15 คน โดยเริ่มจากการทดสอบการทำงาน และการถ่ายทอดหลักการทำงานของเครื่องจักรแก่ผู้ประเมิน จากนั้นประเมินความพึงพอใจโดยใช้แบบสอบถามด้านประสิทธิภาพการใช้งาน โดยผู้ประเมินจะใช้เวลาพิจารณาจากหัวข้อการประเมิน 4 ด้าน ประกอบด้วย ด้านการออกแบบ สมรรถนะการทำงาน ความปลอดภัย และคุณภาพของชิ้นงาน

#### 4. ผลการวิจัย

##### 4.1 ผลการออกแบบเครื่องจักรต้นแบบ

การออกแบบและพัฒนาสามารถทำให้เครื่องจักรสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้เครื่องจักรสามารถอัดก้อนมะขามเปียกได้ตามที่คาดการณ์ไว้ ทั้งระบบนิวแมติกส์และระบบการควบคุมดังภาพที่ 4

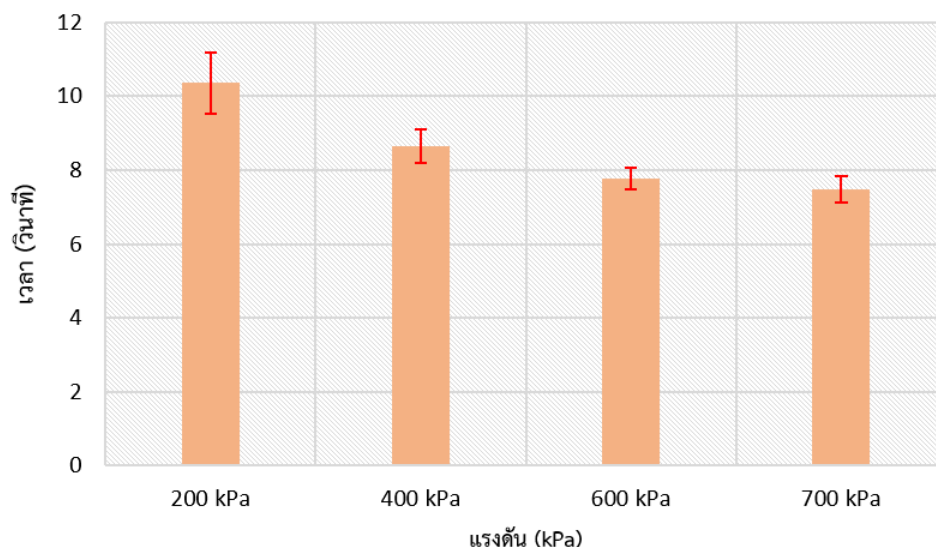


ภาพที่ 4 เครื่องอัดก้อนกึ่งอัตโนมัติ (เครื่องต้นแบบ)

##### 4.2 การทดสอบสมรรถนะเครื่องมะขามอัดก้อน

###### 4.2.1 ผลลัพธ์การทดสอบเพื่อหาแรงดันอากาศที่เหมาะสม

จากแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและเวลาในภาพที่ 5 พบว่าเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการอัดก้อนจะลดลง แต่หากใช้แรงดันมากเกินไปจะทำให้ถุงมีการฉีกขาด



ภาพที่ 5 ความแตกต่างระหว่างเวลา (วินาที) การอัดก้อนในแต่ละแรงดันอากาศ (kPa)

ผลจากการทดลองภาพที่ 6 (ก) แสดงให้เห็นว่าแรงดันอากาศที่ 400 kPa ทำให้เกิดเป็นรูปทรงแต่แรงดันยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เป็นรูปทรงตามที่ต้องการ ต่างจากความดันที่ 600 kPa ที่สามารถก้อนมะขามเป็นสี่เหลี่ยมมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุด แต่หากเพิ่มความดันไปที่ 700 kPa ดังภาพที่ 6 (ข) จะทำให้ถุงฉีกขาดจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้แรงดัน 600 kPa แรงดันอากาศที่มีความเหมาะสมมากที่สุด ดังที่แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 1



(ก)



(ข)

ภาพที่ 6 ชิ้นงานหลังจากการอัดโดยใช้แรงดันอากาศ

(ก) แรงดัน 400 kPa (ข) แรงดัน 600 kPa



**ตารางที่ 1** ตารางผลทดสอบเพื่อหาแรงอัดที่เหมาะสมของเครื่องอัดก้อนมะขามต้นแบบ

| การอัดขึ้นรูปมะขาม ปริมาณ 454 g / ครั้ง |          |               |                        |                                                                                                    |
|-----------------------------------------|----------|---------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| แรงดันอากาศ<br>(kPa)                    | ครั้งที่ | เวลา (วินาที) | เวลาเฉลี่ย<br>(วินาที) | ผลของการอัด                                                                                        |
| 200 kPa                                 | 1        | 10.98         | 10.40                  | ก้อนมะขามมีลักษณะเป็นรูปทรงที่ต้องการแต่<br>เนื้อมะขามยังไม่แน่น                                   |
|                                         | 2        | 9.97          |                        |                                                                                                    |
|                                         | 3        | 10.27         |                        |                                                                                                    |
| 400 kPa                                 | 1        | 8.97          | 8.64                   | ก้อนมะขามมีลักษณะเป็นรูปทรงที่ต้องการ<br>เนื้อมะขามแน่นกว่าการใช้แรงดัน 2 bar                      |
|                                         | 2        | 7.69          |                        |                                                                                                    |
|                                         | 3        | 9.27          |                        |                                                                                                    |
| 600 kPa                                 | 1        | 8.33          | 7.77                   | เนื้อมะขามแน่นเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมชัดเจน<br>และก้อนมะขามมีขนาดใกล้เคียงกับความ<br>ต้องการมากที่สุด |
|                                         | 2        | 7.39          |                        |                                                                                                    |
|                                         | 3        | 7.59          |                        |                                                                                                    |
| 700 kPa                                 | 1        | 7.66          | 7.40                   | เนื้อมะขามลักษณะแน่นเป็นก้อนชัดเจน แต่<br>ถุงที่บรรจุฉีกขาด                                        |
|                                         | 2        | 6.75          |                        |                                                                                                    |
|                                         | 3        | 7.81          |                        |                                                                                                    |

#### 4.2.2 ผลลัพธ์จากการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบการทำงานระหว่างแรงงานคนและเครื่องจักร

จากการทดลองเบื้องต้นในการหาแรงดันอากาศที่เหมาะสมพบว่า ควรใช้แรงดันอากาศในการอัดก้อนเท่ากับ 600 kPa และจากการทดสอบอัดก้อนโดยใช้เครื่องจักรจำนวน 10 ครั้งพบว่าใช้เวลาเฉลี่ยอยู่ที่ 7.79 วินาที ในขณะที่การใช้แรงงานมีเวลาเฉลี่ยอยู่ที่ 55 วินาทีต่อ 1 ก้อนดังที่แสดงในตารางที่ 2

ซึ่งพบว่าแรงงานคนช้ากว่าการใช้เครื่องจักร 5.87 เท่า และเมื่อพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะพบว่า เครื่องจักรสามารถทำงานได้เสถียรกว่าแรงงานคนอย่างชัดเจน และรูปทรงที่ได้จากเครื่องจักรมีความใกล้เคียงกับความต้องการของผู้ประกอบการมากกว่าการใช้แรงงานคน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องจักรมีประสิทธิภาพการทำงานดีกว่าหากเทียบกับการใช้แรงงานคน ทั้งในด้านของระยะเวลาการทำงานที่เร็วกว่า และความสวยงามของรูปทรงที่ได้หลังจากการอัดก้อนมะขามเปียก แต่อย่างไรก็ตาม การทำงานของเครื่องจักรยังต้องอาศัยแรงงานคนจำนวน 1 คน เพื่อกอปป้อนชิ้นงาน และควบคุมการทำงานให้แก่เครื่องจักร



ตารางที่ 2 ตารางผลลัพธ์การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบระหว่างแรงงานคนและเครื่องจักร

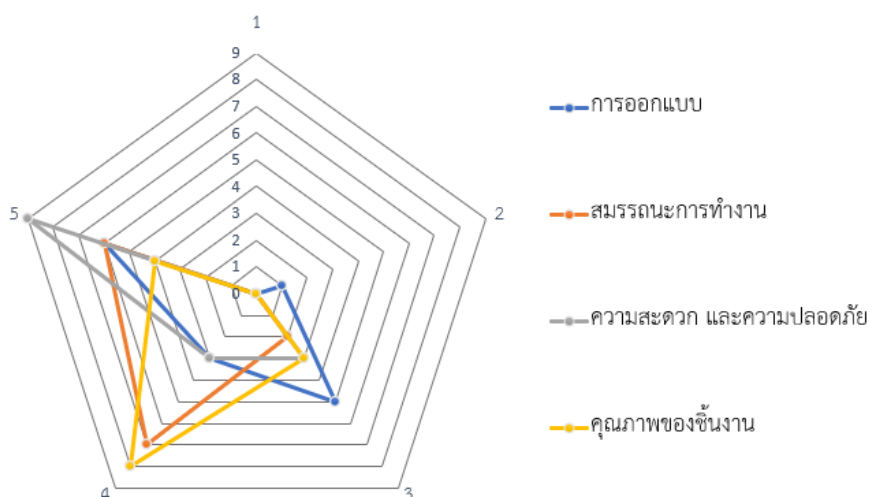
| ครั้งที่            | เวลาที่ใช้ในการอัดก้อนที่แรงดัน 600 kPa (วินาที) |             |
|---------------------|--------------------------------------------------|-------------|
|                     | แรงงาน                                           | เครื่องจักร |
| 1                   | 56.20                                            | 8.33        |
| 2                   | 53.91                                            | 7.39        |
| 3                   | 58.21                                            | 7.59        |
| 4                   | 51.57                                            | 7.64        |
| 5                   | 59.17                                            | 7.45        |
| 6                   | 52.68                                            | 7.59        |
| 7                   | 51.36                                            | 8.74        |
| 8                   | 54.72                                            | 7.13        |
| 9                   | 57.38                                            | 8.44        |
| 10                  | 53.42                                            | 7.60        |
| ค่าเฉลี่ย           | 55.00                                            | 7.79        |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 2.62                                             | 0.52        |

#### 4.3 ผลลัพธ์การถ่ายทอดเทคโนโลยีและการประเมินความพึงพอใจ

หลังจากการทดสอบการทำงาน ขั้นตอนนี้คือการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้แก่ไร่มะขามชนิกา พร้อมทั้งอธิบายขั้นตอนการทำงานอย่างละเอียด ขั้นตอนนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอัดมะขามก้อน โดยอาศัยข้อมูลจากผู้ประเมิน 15 คน และผลการประเมินพบว่า ผู้ประเมินมีความคิดเห็นไปในทิศทางเดียวกันสำหรับด้านสมรรถนะการทำงาน คุณภาพของชิ้นงาน และความสะอาด ความปลอดภัย โดยเฉลี่ยแล้ว ผู้ประเมินให้คะแนนอยู่ในระดับปานกลางจนถึงสูง แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานที่ดีของเครื่องอัดก้อน อย่างไรก็ตาม พบว่ามีผู้ประเมินบางส่วนให้คะแนนด้านการออกแบบในระดับที่ต่ำกว่าด้านอื่นๆ สาเหตุหลักอาจมาจากความคุ้นเคยกับการทำงานในรูปแบบเดิมมากกว่า ซึ่งในภาพรวมมีคะแนนประเมินเฉลี่ยอยู่ที่ 4.30 อยู่ในระดับดี และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละการทดลองค่อนข้างสูง



ภาพที่ 7 บรรยากาศการประเมินความพึงพอใจโดยผู้ใช้งาน



ภาพที่ 8 แผนภูมิแสดงผลจากการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอัดก้อน

## 5. สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลและอภิปรายผล

ในการออกแบบและพัฒนาการพัฒนาเครื่องอัดก้อนมะขามเปียกกึ่งอัตโนมัติ พบว่าเครื่องจักรสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ส่วนผลจากการทดสอบสมรรถนะในการทำงานพบว่าแรงดันที่มีความเหมาะสมกับการอัดมะขามก้อนมากที่สุด คือ 600 kPa และ ผลจากการประเมินทั้ง 4 ด้าน ในภาพรวมมีคะแนนประเมินเฉลี่ยอยู่ที่ 4.30 อยู่ในระดับดี และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.54 ถือว่าค่อนข้างต่ำ

## 5.2 อภิปรายผล

ผลจากการทดสอบสมรรถนะพบว่าแรงดันที่เหมาะสมในการอัดก้อนมะขามมากที่สุดคือ 600 kPa ผู้ปฏิบัติงานต้องกดค้างกระบอกลมไว้สักครู่เพื่อให้ได้ก้อนมะขามตามรูปทรงและลักษณะตามที่ต้องการก่อนยกขึ้น ซึ่งถึงแรงดันที่ 700 kPa จะได้รูปทรงใกล้เคียงกับความต้องการของผู้ประกอบการ และมีความเร็วในการเคลื่อนที่ของกระบอกลมเร็วที่สุดทำให้ใช้เวลาเฉลี่ยในการอัดก้อนน้อยที่สุด แต่ก็ยังพบปัญหาเรื่องการฉีกขาดของบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากการใช้แรงดันอากาศและความเร็วที่มากเกินไป ส่วนการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของคนและเครื่องจักร พบว่าเครื่องจักรใช้เวลาในการอัดขึ้นรูปเป็นเวลาเฉลี่ย 7.79 วินาทีต่อก้อน ในขณะที่การอัดขึ้นรูปด้วยแรงงานคนใช้เวลาเฉลี่ย 55 วินาที ซึ่งช้ากว่า 5.87 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การอัดก้อนโดยใช้เครื่องจักร

ผลจากการคำนวณระยะคืนทุนตามหลักการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมเบื้องต้น (Hun, 2001) พบว่า เครื่องจักรและปั๊มลมขนาด 2 HP ราคา 44,700 บาท กำลังไฟฟ้า 1.5 kW มีกำลังการผลิตเท่ากับ 225 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยมีต้นทุนเท่ากับ 0.24 บาทต่อกิโลกรัม ในขณะที่แรงงานคน 1 คน สามารถทำงานได้เพียง 32.72 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จึงต้องใช้ถึง 7 คนหากต้องการอัตราการทำงานเท่ากับเครื่องจักร ซึ่งคิดเป็นต้นทุนในการผลิตเท่ากับ 1.33 บาทต่อกิโลกรัม ในระยะเวลาการทำงาน 2,100 ชั่วโมงต่อปี ถ้าหากว่าจ้างแรงงานต้องใช้เงิน 628,424 บาท ในขณะที่เครื่องจักรมีต้นทุนเพียง 105,958.50 บาท ดังนั้นผลประโยชน์สุทธิในการใช้เครื่องจักรจะมีค่าเท่ากับ 522,467 บาท จึงมีระยะเวลาคืนทุนเพียง 1 เดือน 1 วัน และมีจุดคุ้มทุนเท่ากับ 42.83 ชั่วโมงต่อปี จึงสามารถสรุปได้ว่าการเครื่องจักรอัดก้อนมะขามเปียกถึงอัตโนมัติสำหรับธุรกิจชุมชนคุ้มค่าต่อการลงทุน และสามารถนำมาใช้ทดแทนวิธีการทำงานแบบเดิมได้เป็นอย่างดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ อรุณ และ วิมล (2561) และ ปวรุตม์ (2563) ที่สามารถประยุกต์ใช้ระบบนิวแมติกส์กับการออกแบบและพัฒนาเครื่องจักรที่สามารถนำมาใช้งานแทนแรงงานคนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเครื่องต้นแบบอัดมะขามมีบางส่วนที่ต้องปรับปรุงแก้ไข เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่เพิ่มขึ้น โดยคณะผู้ศึกษาจึงได้เสนอแนวทางไว้ดังนี้

5.2.1 ควรออกแบบบล็อกอัดก้อนมะขามให้ประกบกันให้แน่นในระหว่างการอัดขึ้นรูป เพื่อป้องกันบล็อกอัดประกบกันไม่สนิท

5.2.2 ควรออกแบบบล็อกอัดให้สามารถเปลี่ยนขนาดได้ เพื่อจะได้สามารถอัดก้อนมะขามได้ หลากหลายขนาดมากขึ้น

5.2.3 ควรมีการติดตั้งอุปกรณ์เก็บเสียงในส่วนของการระบายลมอัด เพื่อป้องกันเสียงรบกวน ระหว่างการทำงานของผู้ใช้งาน

5.2.4 ควรออกแบบให้เครื่องจักรสามารถประยุกต์ใช้กับงานอย่างอื่นๆ เพื่อเพิ่มความสามารถให้เครื่องจักรมีประโยชน์และการทำงานที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก งบประมาณอุดหนุนทุนวิจัย งบประมาณรายได้ประจำปี 2563 ประเภททุนอุดหนุนงานวิจัย งบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกว.) ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 สัญญาเลขที่ PCRU\_2562\_TSRI013 สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

## 7. เอกสารอ้างอิง

เจนจิรา อยู่พะเนียด. (2563). ผลิตภัณฑ์กะปิอัดก้อนทางเลือกใหม่ของผู้บริโภค. **วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ**, 11-13.

ชลอธร ศักดิ์มาศ, เศรษฐวัฒน์ ถนอมกาญจน์ และนศพร ธรรมโชติ. (2553). **การออกแบบและสร้างเครื่องอัดก้อนข้าวยา**. (รายงานผลการวิจัย). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, สงขลา.

ชีวจิต. (2561). **มะขามเปียก วัตถุดิบเครื่องปรุงรสเปรี้ยวอาหารไทย**. ค้นจาก <https://goodlifeupdate.com/healthy-food/77020.html>

ประเทือง อุษาบริสุทธิ์ และธารินี มหายศนันท์. (2548). การศึกษาการอัดแท่งถ่านหังามันสำปะหลัง โดยใช้เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิก. **วิศวกรรมสาร มก.**, 19(56), 32-40.

ปวรุตม์ เปี่ยมแก้ว, อภิษฐ์ ผดุงเรืองกิจ, กรณัฐ รัตนนท์, เมธา อึ้งทอง และอภิชาติ ศรีประดิษฐ์ (2565). **การออกแบบและพัฒนาเครื่องบรรจุน้ำปลาร้ากึ่งอัตโนมัติ**. **วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)**, 4(1), 25-43.

วศิน เสริมสุธี อนุวัฒน์. (2565). **มูลค่าส่งออกมะขามเปียก**. ค้นจาก <https://sites.google.com/site/artistara/makham/makham-phuch-sersthkic/mulka-ha-sng-xxk-makham-peiyk>

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2565). **วิสาหกิจชุมชนแม่บ้านเกษตรกรขึ้นาคแผนใหม่ต้นแบบการรวมกลุ่มปลูกมะขามเปรี้ยวสร้างกำไรปีละ 32.2 ล้านบาท**. ค้นจาก <https://oae.go.th/view/1รายละเอียดข่าว/ข่าว%20สศก./38535/TH-TH>.

- อรุณ สุขแก้ว และวิมล บุญรอด. (2561). การออกแบบเครื่องบรรจุหนังปลากระพงปรุงรสโดยใช้ระบบนิวแมติกส์. วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี, 9(2), 49-60.
- อรุณ สุขแก้ว, ชีรพงษ์ อยู่สุข, ชีรวัฒน์ สุขลิ้ม และธรรมรัตน์ ไชยวิจิต. (2560). การออกแบบเครื่องเปิดปากถุงสำหรับบรรจุหนังปลากระพงปรุงรสโดยใช้ระบบนิวแมติกส์. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 55: สาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม, สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์, สาขาอุตสาหกรรมเกษตร, สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.
- Hunt, D. (2001). **Farm power and machinery** (10<sup>th</sup> ed), Iowa: Iowa State University Digital Press.

## THE STUDY AND OPTIMUM DESIGN OF THE STRAINER PLATE IN THE FILTER TANK BY USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Picha Panmongkol, Thaloeng Poljaroen \*

Faculty of Engineering, Thonburi University, Nongkhaem, Bangkok, Thailand, 10160

\*Corresponding author e-mail: thaloeng@thonburi-u.ac.th

Submitted: 29 November 2023

Revision received: 10 June 2024

Accepted: 11 June 2024

### Abstract

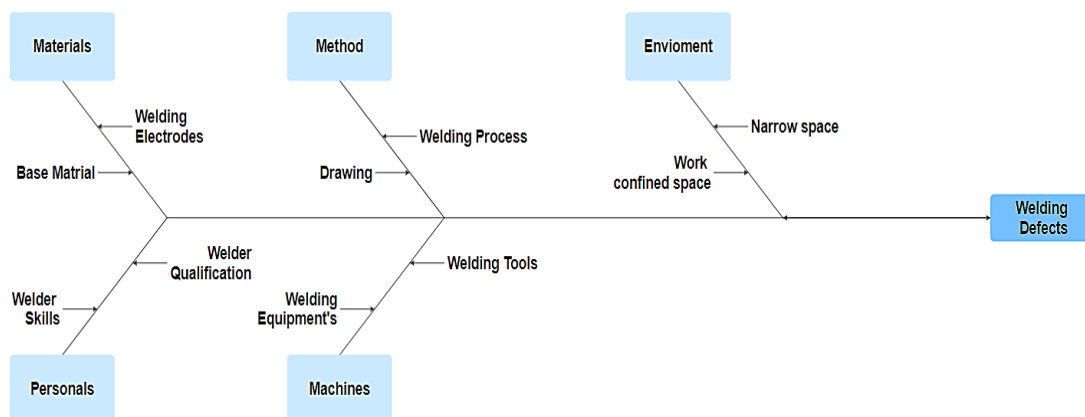
This study focused on designing water strainer plates for producing water filter tanks in the industrial sector. The main issues included difficulties in manufacturing strainer plates and problems related to incomplete welding and inadequate painting of support strainer plates. To address these challenges, the project conducted an analysis using various tools to identify and solve problems. This project employed a finite element analysis method to design strainer plates that resolved the mentioned shortcomings. The result showed that the development of strainer plates using a flat bar type (Type-3) with a beam structure had the lowest displacement value, cut production time by 12% and material costs by 25%. This project could potentially elevate the industrial sector to produce water filter tanks, resolve the identified issues, and improve their manufacture.

**Keywords:** Simulation, Strainer plate, Finite element method, Filter tank, Pressure vessel

## 1. Introduction

A case study of M.P. Phan Ltd., Part. (1987) of the tank production process revealed problems with the strainer plate component in the manufacturing of pressure vessels, steel tanks, stainless steel tanks, mixing tanks, and water filtration tanks. The problem was analyzed using Why-Why Analysis, Fishbone Diagram Analysis, and Flow Process Analysis are shown in Fig. 1. It is a tool for brainstorming to find the cause of the defect to find a solution to the problem and propose a solution to the problem and action causes of the defect in the Table1. which revealed several key findings:

- Finding 1 revealed long production times due to the complexity of the process of strengthening the water filter.
- Finding 2 revealed problems from construction due to incomplete welding.
- Finding 3 revealed problems from construction with regards to the paintwork of the strainer plate that could not be painted thoroughly because the space under the strainer plate has a limited working area.



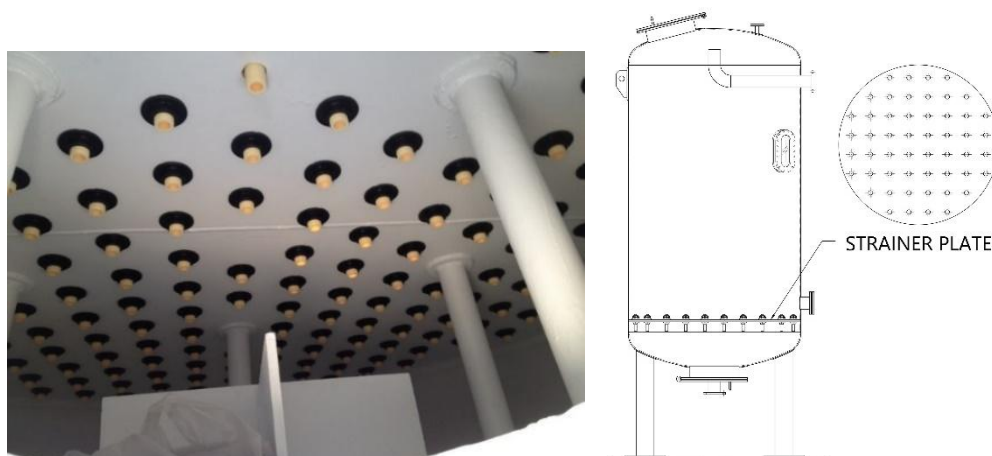
**Figure 1** Cause and effect diagram of a welding defect

As shown in Figures 2 and 3, strainer plate paintwork must be revised frequently. Therefore, this research aims to study the design of the strainer plate used inside the water filter tank (Vicharnat, 2013.). The Finite Element Method (Gao, 2007.; Wang, 2011.; Cao, 2014.; V.N., 2006.; Li, 2014.) was used to design and simulate a strainer plate that is strong through production standards resulting in quicker production, reducing production steps while still producing quality products, and passing recognized

production standards in the process of manufacturing water filter tanks. The organizing team, therefore, have produced a concept for the design of a water strainer plate to solve the identified problems. The results of this analysis and design have led to the actual production of strainer plates having a positive impact in the industrial sector.

**Table 1** Propose a solution to the problem and action causes of the defect.

| Cause                                       | Recommended Action                                             |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Welding Electrodes and Base material        | According to the WPS or project specification                  |
| Welder Skills and Qualification             | Selected welder from WPQ (Exam. passed)                        |
| Drawing and Welding Process                 | Details of weld joints drawing                                 |
| Welding Equipment and Tools                 | Preventive maintenance                                         |
| <u>Narrow space and work confined space</u> | <u>*New design of the supports of the water strainer plate</u> |



**Figure 2** Strainer Plate



**Figure 3** Defect Under the Strainer Plate

## 2. Research Objectives

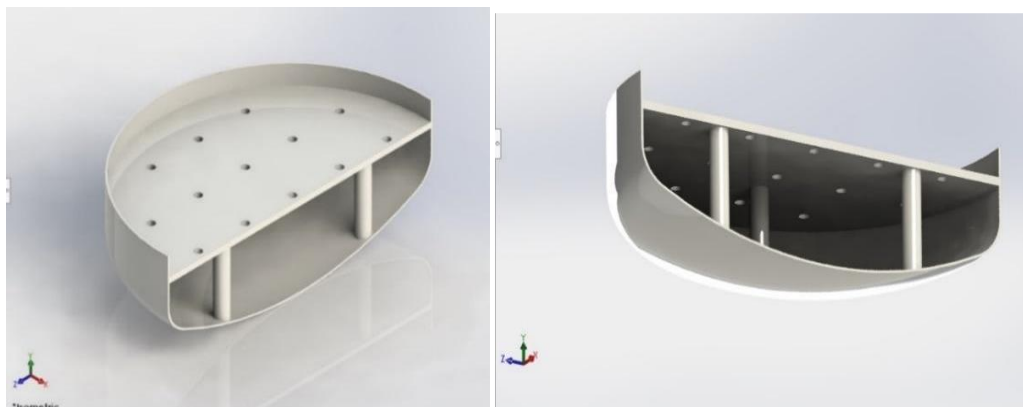
The aim is to improve the strainer plate fabrication techniques used in industrial water filter tanks and achieve high-quality production. Creating an optimized, shortened production time and optimized cost strainer plate design involves addressing manufacturing challenges, incomplete welding, and paint defects using finite element analysis and other problem-solving techniques.

## 3. Research Methodology

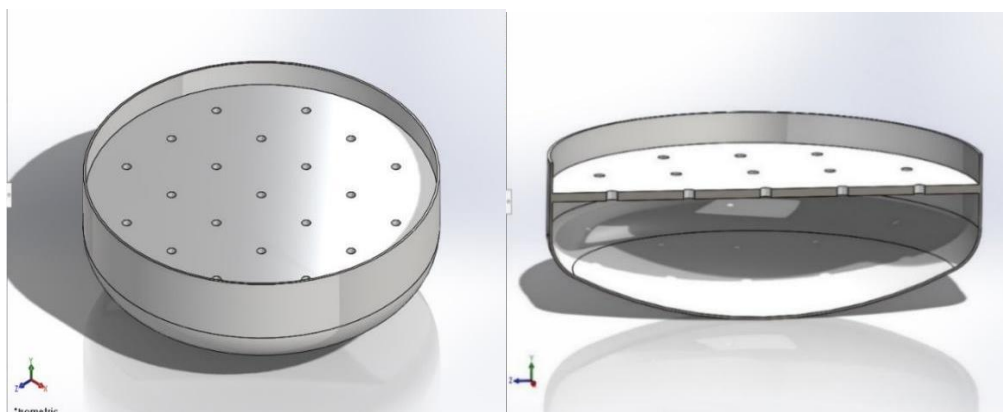
### 3.1 Type of Strainer Plate Used in Experiments

In this study, the water filter tank had a diameter of 1,000 mm. and used ASTM A36 grade materials for construction. The designs of the strainer plate used in the experiment were divided into three types. Type 1: column type strainer plate (Fig. 4) with a thickness of 12 mm. and 4 pipe columns with sizes of 1-1/2 inches × length 300 × thickness 4 mm. This type of strainer plate is currently in traditional use. Type 2: thickening type strainer plate without reinforcing beams (Fig. 5) with a thickness of 20 mm. as a new alternative design approach. The design and calculations for the thickness of this type are described in the next section. Type 3: flat bar type strainer plate with beam structure (Fig. 6) with a thickness of 12 mm., assembled with two flat bars FB75 × 15, as another new alternative design approach. The strainer plate thicknesses used in the three experiments were written as 3D models from the Solid

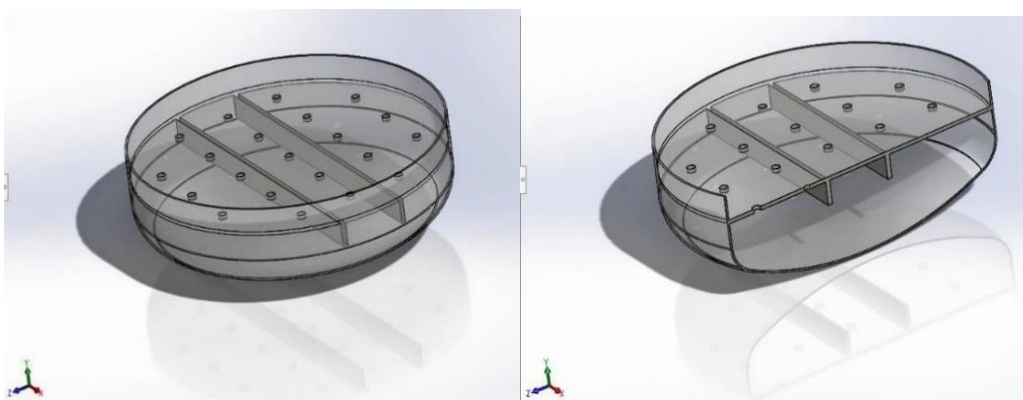
Works program (Venkatachalam, 2016.; Wang, 2011.; Zang, 2013.) to analyze the strength and deformation values using the Finite Element Method. The components from the Solid Works simulation program (Chang, 2015.; Urdea, 2018.; Shinde, 2022.) for the strainer plate are shown in Figures 4-6.



**Figure 4** Strainer Plate; Column Type (Type 1)



**Figure 5** Strainer Plate; Thickening type (Type 2)



**Figure 6** Strainer Plate; Flat Bar Type with Beams (Type 3)

### 3.2 Calculation of Strainer Plate Thickness Without Reinforced Beams

#### (Type 2)

Calculation of the thickness of the Type 2-Thickening strainer plate (without reinforcing beams) was conducted according to the standard method outlined in ASME Section VIII Division 1 UG-34 C(2) [14]. According to Equation (1), the strainer plate thickness of Type 2 can be calculated from the following variables:  $t$  = thickness,  $d$  = diameter (1,000 mm),  $C$  = 0.33 (as in Figure 7),  $P$  = internal pressure (1 kg/cm<sup>2</sup>),  $S$  = allowable stress of ASTM A36 grade material (1,167 kg/cm<sup>2</sup>),  $E$  = Joint Efficiency, (1). From the calculation according to Equation (1), the minimum thickness is 16.8 mm., and the corrosion allowance is 1.5 mm (ASME, 2011.). This will obtain a minimum thickness of 18.3 mm.; we chose a thickness of 20 mm. as materials of this thickness can be found in the general market.

$$t = d\sqrt{CP/SE} \quad (1)$$

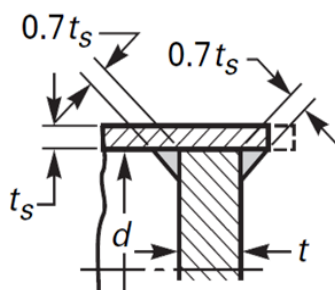
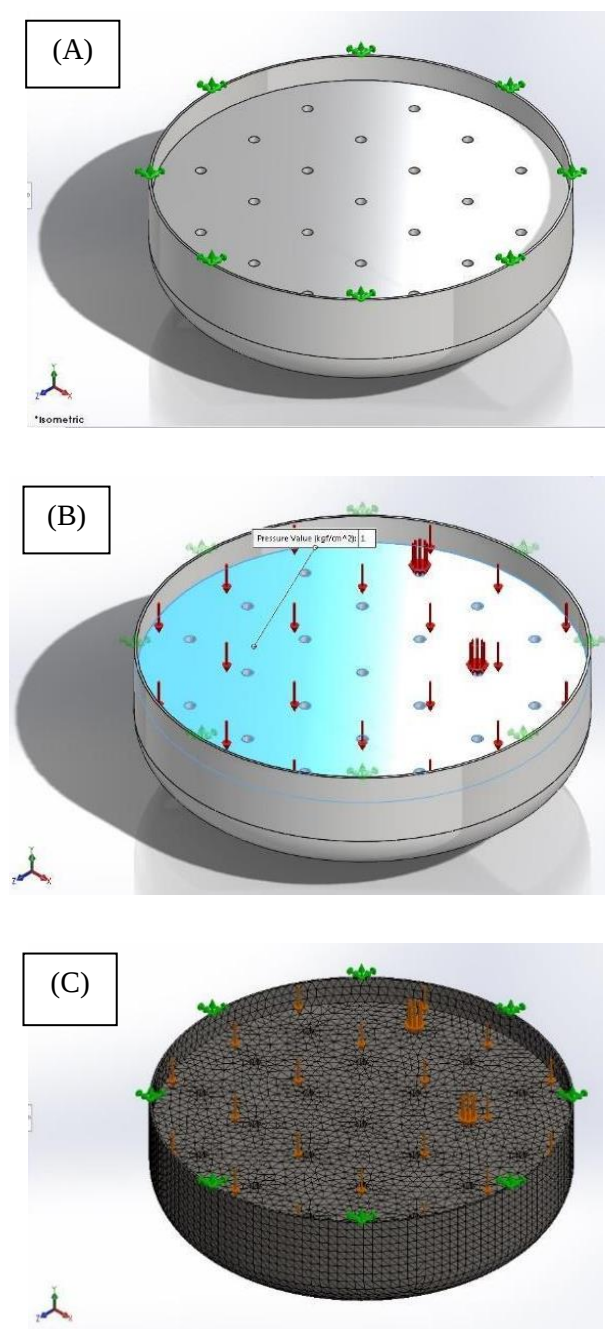


Figure 7 UG-34 Sketches Circular Covers,  $C = 0.33m$

#### 3.2 Finite Element Method (FEM)

Strength analysis of the 3D models, generated by the Solid Works simulation software (v2018) for each of the three strainer plate types, was performed using the Finite Element Analysis Method to determine static force as a case study to analyze stress (Von Mises Stress), deformation and displacement, and the safety value (Safety of Factor) that occurs with each type of strainer plate. The following steps were performed for analysis:

1. Set the properties of the Static Analysis, 2. Determine the properties of the workpiece material. (Applied Material) ASTM A36, 3. Set fixed variables such as the geometry of the tank wall and body as well as a solid composition and solid body type of the components. This condition of Fixed Geometry the actual installation is shown in Figure 8(A). The model and the physical strainer plate are fabricated using ASTM A36 Steel, known for its 3,314.08 kg/cm<sup>2</sup> yield strength and 7,870 kg/m<sup>3</sup> mass density. Acting on the strainer plate in the filter section, a perpendicular force of 1 kgf/cm<sup>2</sup> is applied. The model considers the earth's gravity to be applied to be 9.81 m/s<sup>2</sup>, as shown in Figure 8(B). The analysis type is set to static, and a standard solid mesh is applied, utilizing four Jacobian points and an element size of 21.9, 21.5, and 22.2 mm, respectively. The tolerance is configured at 1.09, 1.07, and 1.11 mm, respectively. The mesh quality plot indicates the high quality. The model is comprised of 72,843, 65,849, and 65,452 nodes and 38,558, 33,752, 32,870 elements, respectively, and the maximum aspect ratio is 29.9, 17.5, and 18.8, respectively, the created mesh was shown in Figure 8(C). The program automatically executes the processing after the element decomposition is completed and displays the results of the model's calculations in colored bands.

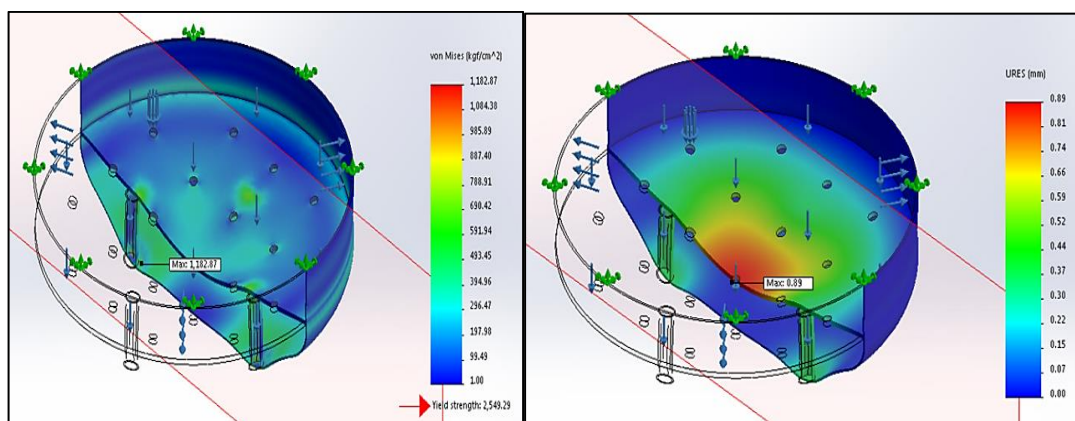


**Figure 8** (A) Fixed Geometry, (B) Pressure, and (C) Create Mesh.

### 3. Results and discussion

The experiment results obtained from the Solid Works simulation software include, for each type of strainer plate, values for stress (Von Mises Stress), deformation (displacement), and safety (Safety of Factor). These results are summarized in Table 2.

For the Type 1-Column type strainer plate, it was found that maximum stress occurred at the area of support and the tank lid with a force of  $1,182 \text{ kgf/cm}^2$ , and maximum deformation occurred at the center of the strainer plate with a value of  $0.89 \text{ mm}$ , as shown in Figure 9. For the Type 2-Thickening type strainer plate, results showed that the strainer plate's maximum stress occurred at the tank wall with a force of  $919 \text{ kgf/cm}^2$  and the maximum deformation occurred at the center of the strainer plate with a value of  $1.41 \text{ mm}$ , as shown in Figure 10. For Type 3- Flat bar type strainer plate with beam structure, results showed that the maximum stress occurred at the beam under the strainer plate with a force of  $1,189 \text{ kgf/cm}^2$  and the maximum deformation occurred at the center of the strainer plate with a value of  $0.60 \text{ mm}$ , as shown in Figure 11. In analyzing the experiment results, it was found that the highest stress force that occurs in all three types of strainer plates does not exceed the yield strength of  $2549.29 \text{ Kg/cm}^2$ , indicating that the plates could bear safe loads; the deformation value was highest at the center point of the Type 2-Thickening type strainer plate and the lowest deformation value was in the Type 3-Flat bar type strainer plate with beam structure.



**Figure 9** Type 1-Column Type; Von Mises Stress (Left) and Displacement (Right)

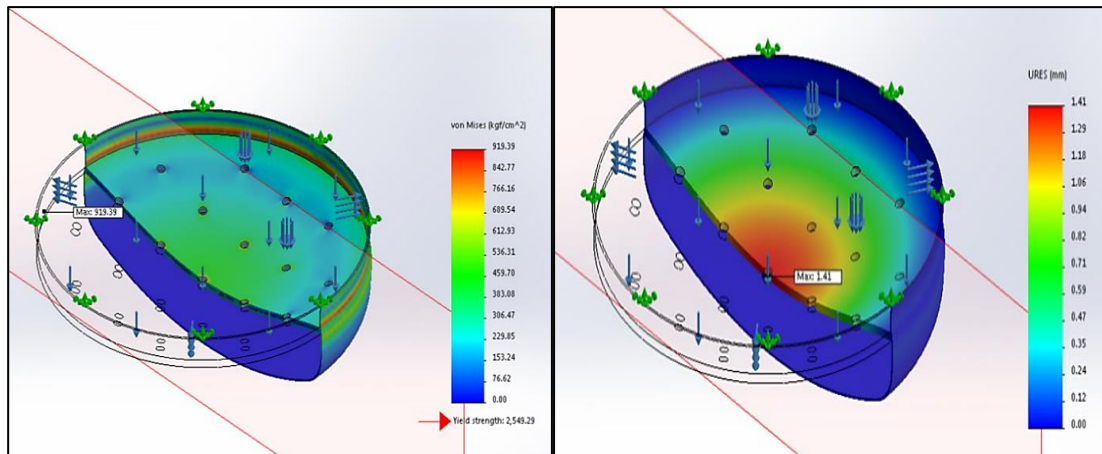


Figure 10 Type 2-Thickening Type; Von Mises Stress (Left) and Displacement (Right)

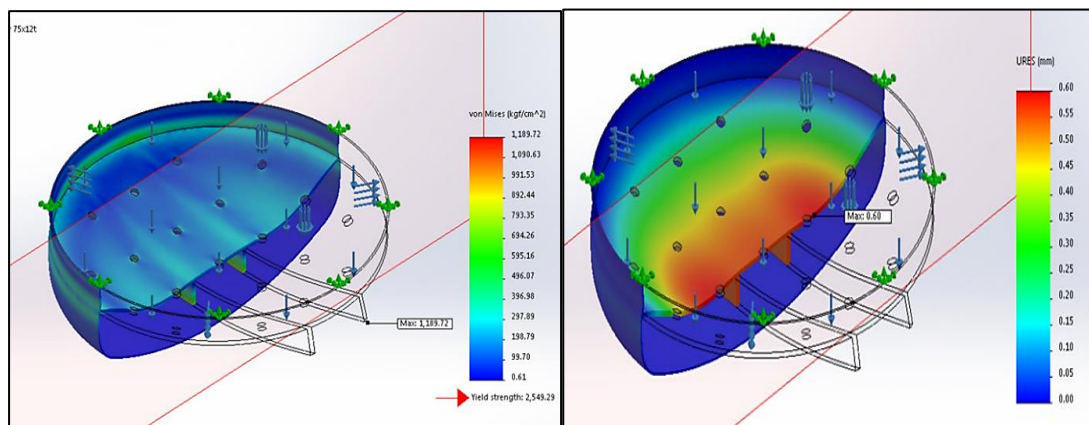


Figure 11 Type 3-Flat Bar Type with Beams; Von Mises Stress (Left) and Displacement (Right)

Table 2 Summary of Experiment Results

| Strainer Plate                   | Von Mises Stress<br>(Kg/cm <sup>2</sup> ) | Displacement<br>(mm) | Factor<br>of<br>Safety |
|----------------------------------|-------------------------------------------|----------------------|------------------------|
| Type 1-Column type               | 1,182                                     | 0.89                 | 2.16                   |
| Type 2-Thickening type           | 919                                       | 1.41                 | 2.78                   |
| Type 3- Flat bar type with beams | 1,189                                     | 0.60                 | 2.14                   |

The experiment results, as seen in Table 2, showed high stress force on the Type 1 strainer plate and Type 3 strainer plate; it was found that the p-value was equal to 0.51, greater than the alpha level of 0.05 (p-value > 0.05). There was no significant

difference at 95% confidence and the Type 2 strainer plate had the least occurring maximum stress. When considering the effect of the deformation value, it was found that the Type 2 strainer plate had the highest deformation value. This may be attributed to the fact that there is no support point to help strengthen the strainer plate. From the experiment results of the safety values on the test specimen using one-way ANOVA analysis, it was found that maximum stress was on the Type 1 strainer plate and Type 3 strainer plate with the p-value equal to 0.25, greater than the alpha level of 0.05 ( $p\text{-value} > 0.05$ ).

The process involves implementing improvement guidelines through meetings with pertinent production process working groups, conducting improvement trials with a focus on the production process, and maintaining ongoing monitoring of operations. Therefore, evidence suggests that the Type 3 strainer plate is safe to use and can be applied for use in real production in the industrial sector to create water filtration tanks (Figure 12).



**Fig. 12** Type 3- Flat Bar Type with Beams Used in Real Production in the Industrial Sector

However, the results indicate that the Type 2-Thickening type has a material weight of 200 kilograms, while the Type 3-Flat bar type with beams has a material weight of 150 kilograms; this represents a 25% reduction in material weight costs. When comparing the production time of the Type 1-Column type with Type 2-Thickening type using 33 working days compared to the Type 3-Flat bar type with beams using 29 working days, the results show that the production time was reduced by 12%.

## 5. Conclusion

Using the Finite Element Analysis Method on all three models, the maximum stress (Von Mises Stress) force, deformation value, and safety value were computed for each of the three types of strainer plates. The Type 3 strainer plate, with the beam structure, was determined to be the optimal new alternative design approach for strainer plates, with a minimal deformation value and reasonable maximum stress force and safety values. The experiment results showed that there was not a significant difference in the computed values between the traditional Type 1 strainer plate and the alternative design of the Type 3 strainer plate, used in the production of water filter tanks. There is evidence from the experiment and real applications that the Type 3 strainer plate can reduce cost in materials by 25%, help avoid messy work, and allow faster production times due to the area under the strainer plate being much more sufficient for work. These solutions can lead to better work quality and quicker delivery. The production time was reduced by 12%. The Type 3 strainer plate can be readily applied in the industrial sector, producing strainer plates of high quality that still pass production standards for the manufacturing of water filter tanks.

## 6. Acknowledgment

Mr. Naris Sonprapai and Mr.Khet Burakorn, M.P. Phan (1987) Ltd., Part. and AEC INDUSTRIAL SERVICES Co., Ltd. Support data and software for the study of this project. The authors thank Mr. Josh Beatty for reviewing and proofreading the paper for grammatical accuracy.

## 7. References

- ASME. (2011). **The American Society of Mechanical Engineers Boiler & Pressure Vessel Committee on Pressure Vessels Section VIII Division (1<sup>st</sup> ed.)**. Addenda 2011a.
- Cao, X.J., & Miao, D.H. (2014). Research the Application of Elliptic Filter Plate to Horizontal Filtering Tank. **Advanced Materials Research**, 1004-1005, 1275–1280.
- Chang, K.H. (2015). **Design Optimization**. Massachusetts: Academic Press. Doi: 10.1016/b978-0-12-382038-9.00017-x

- Gao, B.J., Shi, X.P., Liu, H.Y., & Li, J.H. (2007). Separation of Primary Stress in Finite Element Analysis of Pressure Vessel with the Principle of Superposition. **Key Engineering Materials**, 353-358, 373–376.
- Li, W.J., Liu, G.P., Li, D.H., & Yu, T. (2014). Finite Element Analysis and Optimum Design for Pressure Vessel Based on ANSYS Workbench. **Applied Mechanics and Materials**, 687-691, 290–293. Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.687-691.290
- Shinde, J., Kharade, S., Mulani, A., Kokare, K., Tapase, C., & Terani, A. (2022). Design and analysis of front axle using Solidworks simulation. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, 9(5), 3477-3483.
- Skopinskyand, V.N., & Smetankin, A.B. (2006). Modelling and Stress analysis of nozzle connections in Ellipsoidal heads of Pressure vessels under External loading. **International Journal of Applied Mechanics and Engineering**, 11(4), 965- 979.
- Urdea, M. (2018). **Static linear analysis for trusses structure for supporting pipes**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Doi: 10.1088/1757-899X/399/1/012051
- Venkatachalam, G., Nishanth, J., Mukesh, M., & Pavan Kumar, D.S. (2016). Investigations on Influence of Geometric Parameters in Drawing of Perforated Sheet Metals. **Applied Mechanics and Materials**, 852, 229–235.
- Vicharnat, P. (2013, May). **Study and Design of Pressure Vessel Thickness and Anthracite Filter Tray in the Pressure Vessel Using Finite Element Method**. RSU Research Conference 2013, Sangsit University, Bangkok.
- Wang, J., Huang, X.Y., & Sang, S.J. (2011). Using Multiple Methods for Rapid Programming in SolidWorks. **Applied Mechanics and Materials**, 48-49, 1337–1340.
- Wang, W., Shi, J.B., Luo, M.F., Wang, Y.F. (2011). Study on a Large Opening in a Pressure Vessel. **Advanced Materials Research**, 308-310, 58–61.
- Zhang, C.L., & Yang, F. (2011). Pressure Vessel Optimization Design Based on the Finite Element Analysis. **Applied Mechanics and Materials**, 65, 281–284. Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.65.281
- Zhang, J. (2013). **EFD Fluid Simulation of Ball Valve on SolidWorks**. **Advanced Materials Research**, 823, 13–16.

การพัฒนาบรรจุภัณฑ์มะขามเปรี้ยวอัดก้อนโดยใช้เทคนิควิศวกรรมคั่นเซ  
สำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน

DEVELOPMENT OF TAMARIND BRIQUETTE PACKAGING  
USING KANSEI ENGINEERING TECHNIQUES  
FOR COMMUNITY ENTERPRISES

มานะ อินพรมมี<sup>1</sup>, ธนภัทร มะณีแสง<sup>1\*</sup>, ปรรณนา ศิริสานต์<sup>2</sup>

Mana Inpromme<sup>1</sup>, Thanapat Maneesaeng<sup>1\*</sup>, Prattana Sirisan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์ ประเทศไทย 67000

<sup>2</sup>คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

<sup>1</sup>Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University,  
Muang, Phetchabun, Thailand, 65000

<sup>2</sup>Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

\*Corresponding author e-mail: nazzdex.man@pcru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 10 ธันวาคม 2566

วันที่แก้ไขบทความ 6 มิถุนายน 2567

วันที่ตอบรับบทความ 9 กรกฎาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อมุ่งแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์รูปแบบเดิมที่ผลิตจากถุงพลาสติก ทำให้มะขามสัมผัสกับแสงแดด อากาศ ส่งผลต่อสีและคุณภาพของมะขาม ผู้วิจัยและชุมชนได้ร่วมกันพัฒนาบรรจุภัณฑ์มะขามเปียกอัดก้อนให้มีมาตรฐาน ควบคู่ไปกับการปรับเปลี่ยนรูปลักษณะให้มีมาตรฐาน น่าสนใจ มีฉลากที่แสดงรายละเอียดสินค้าอย่างชัดเจน และสะดวกในการใช้ หลักการวิศวกรรมคั่นเซถูกนำมาใช้เพื่อระบุโครงสร้างและคุณลักษณะเชิงกายภาพของผลิตภัณฑ์จากข้อมูลของผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ และผู้บริโภค ผลจากการวิจัยพบว่าผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ได้รับการคัดเลือกมีระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามของบรรจุภัณฑ์ โดยที่ ประชากรส่วนใหญ่ให้ทิศทางเชิงบวกต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยม ใช้พอยต์ในการห่อหุ้มผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายใน ส่วนด้านนอกใช้วัสดุจากกระดาษที่มีโทนสีเข้ม ตกแต่งลวดลายเป็นภาพวาด ภาพประกอบอาหารใช้ภาพจริงโดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณกำลังสองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 54.34 จึงสามารถนำคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้มาใช้ออกแบบและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ได้อย่างเป็นรูปธรรม ผลลัพธ์ที่ได้คือ บรรจุภัณฑ์มะขามเปียกอัดก้อนที่ไม่เพียงตอบโจทย์ผู้บริโภค แต่ยังสร้างความโดดเด่นในตลาด สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของวิศวกรรมคั่นเซ ในการยกระดับบรรจุภัณฑ์ให้มากกว่าแค่ภาชนะ แต่เป็นกลยุทธ์สำคัญที่ช่วยผลักดันธุรกิจชุมชนให้ประสบความสำเร็จ

**คำสำคัญ:** วิศวกรรมคั่นเซ, มะขามเปรี้ยวอัดก้อน, การออกแบบบรรจุภัณฑ์

### Abstract

This research aims to address the problems caused by the original plastic bag packaging, which exposes tamarinds to sunlight and air, affecting their color and quality. Researchers in collaboration with the community have collaborated to develop standardized packaging for compressed wet tamarinds. This includes a standardized attractive appearance, clear product labeling, and user-friendliness. The Kansei engineering principles are to identify the product's structure and physical characteristics. Based on information from experts' product design and consumers, the selected prototype packaging design demonstrated a strong relationship between the independent variables and the dependent variables of the packaging. The majority of the population expressed positive attitudes towards the product's characteristics, including a rectangular shape, the use of foil to wrap the inner product, and the use of dark-toned paper with food-related illustrations on the exterior. The average multiple correlation coefficient was 54.34, indicating that these characteristics could lead to design and develop packaging in a tangible manner. The compressed wet tamarind packaging outcome not only satisfies consumer needs but also stands out in the market. This highlights the potential of Kansei engineering to upraise packaging beyond mere containers and establish it as a crucial strategy for community business success.

**Keywords:** Kansei engineering, Sour tamarind cubes, Packaging design

### 1. บทนำ

มะขามเป็นผลไม้เมืองร้อนและพืชเศรษฐกิจที่สามารถเพาะปลูกได้มากในประเทศไทย โดยเฉพาะมะขามเปรี้ยว ผลไม้ร้อนทั่วไปแต่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ด้วยรสชาติเปรี้ยวจัดจ้าน มะขามเปรี้ยวกลายเป็นส่วนประกอบสำคัญในอาหารไทย ซึ่งได้ปรากฏอยู่ในหลากหลายเมนูยอดนิยม เช่น ต้มยำ ต้มปลา และต้มโคล้ง ประเทศไทยครองอันดับสองของเอเชีย รองจากอินเดีย ในฐานะผู้ผลิตมะขามเปรี้ยว ในแต่ละปีมะขามเปรี้ยวจากไทยส่งออกไปทั่วโลก ตลาดหลักคือ จีน ญี่ปุ่น เวียดนาม แคนาดา สหภาพยุโรป และสหรัฐอเมริกา (กรมวิชาการเกษตร) สหรัฐอเมริกา ถือเป็นตลาดส่งออกมะขามไทยที่สำคัญ โดยเฉพาะมะขามเปรี้ยวฝักบรรจุกล่อง ทั้งแบบสดและแบบแห้ง นอกจากนี้ยังมีมะขามแปรรูป เช่น น้ำมะขามเปียกเข้มข้น มะขามเปียกแห้ง และน้ำมะขาม โดยในปี 2567 บริษัท McCormick & Co. ยักษ์ใหญ่เครื่องเทศและเครื่องปรุงรสจากสหรัฐฯ ประกาศให้

"มะขาม" เป็นรสนชาติยอดนิยมแห่งปี เหตุผลหลักคือ รสเปรี้ยวของมะขามช่วยกระตุ้นประสาทรับรส กระตุ้นความอยากอาหาร (สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครซิดนีย์, 2566)

มะขามเปรี้ยวผลไม้ทนแล้งที่สามารถปลูกได้ในทุกสภาพดิน ตั้งแต่พื้นที่ราบจนถึงบนภูเขาสูง ให้ผลผลิตจำนวนมาก และสามารถจำหน่ายได้หลากหลายรูปแบบ ทั้งฝักดิบ ฝักสุก หรือแปรรูปเป็น มะขามแช่อิ่ม สามารถสร้างรายได้ให้เกษตรกรเฉลี่ย 24,364 บาทต่อไร่ ด้วยต้นทุนการผลิตเพียง 11,023.83 บาท โดยคิดเป็นอัตราผลตอบแทนการลงทุนสูงถึงร้อยละ 121.01 (นพดล และคณะ, 2565) แม้มะขามเปรี้ยวจะสร้างรายได้ให้เกษตรกรสูง แต่โดยทั่วไปเกษตรกรนิยมจำหน่ายมะขามในรูปแบบฝักดิบ ข้อมูลจากวิสาหกิจชุมชนกลุ่มอาชีพแปรรูปมะขามเพชรน้ำพุ หนึ่งในผู้ประกอบการผู้ปลูกมะขามเปรี้ยวรายใหญ่ในจังหวัดเพชรบูรณ์ เผยให้เห็นว่า ผลผลิตมะขามเปรี้ยวส่วนใหญ่ ร้อยละ 70 จำหน่ายในรูปแบบฝักดิบ ในราคาเฉลี่ย 17-20 บาทต่อกิโลกรัม ส่วนร้อยละ 20 จำหน่ายในรูปแบบมะขามฝักสุก ในราคาเฉลี่ย 23-30 บาทต่อกิโลกรัม ที่เหลือ ร้อยละ 10 เป็นมะขามที่ตกเกรด ไม่สามารถจำหน่ายได้ เนื่องจากมีขนาดเล็กไม่เป็นที่ต้องการของตลาด

เกษตรกรได้นำเนื้อมะขามเปรี้ยวที่ตกเกรดมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลายรูปแบบ หนึ่งในนั้นคือมะขามเปียก ซึ่งเป็นการแปรรูปมะขามเปรี้ยวสดที่สุกแล้ว นำเมล็ดออกแล้วปั่นเป็นก้อน จากนั้นนำไปรมควันบนเตาไฟเพื่อป้องกันมอดทำให้มะขามเก็บได้นานยิ่งขึ้น แต่ในปัจจุบันผู้ประกอบการผู้ปลูกมะขามเปรี้ยวได้มองเห็นโอกาสในการนำผลผลิตมะขามเปรี้ยวฝักเล็กที่ตกเกรดมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์มะขามเปียกอัดก้อนเพื่อเพิ่มมูลค่า โดยนำเนื้อมะขามเปรี้ยวที่ผ่านการนำเมล็ดออกแล้วไปอบฆ่าเชื้อโรค และแมลงที่อุณหภูมิ 50 °C ก่อนนำไปปั่นให้เป็นก้อน ซึ่งข้อดีของมะขามเปียกก้อนที่พัฒนาขึ้นมีขนาดใกล้เคียงกับซูปก้อนที่จัดจำหน่ายในท้องตลาด สะดวกต่อการใช้งาน ผู้ใช้สามารถนำมะขามเปียกอัดก้อนเคี้ยวในน้ำเดือด ใช้เวลาเพียง 5-10 นาที สามารถนำไปปรุงอาหารได้ทันที ลดความยุ่งยากในการเตรียมวัตถุดิบแต่ปัญหาในปัจจุบันมะขามอัดก้อนมีอายุการเก็บรักษาที่สั้น เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ปัจจุบันเป็นถุงพลาสติกห่อ ทำให้มะขามสัมผัสกับแสงแดด อากาศ และความชื้นโดยตรง ส่งผลต่อสีและคุณภาพของมะขาม ทำให้มะขามเปลี่ยนสีและทำให้มะขามเปลี่ยนสีเสื่อมคุณภาพเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งในบางครั้งมะขามอัดก้อนอาจสูญเสียความชื้น เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้รสชาติเปลี่ยนไป รวมถึงบรรจุภัณฑ์ปัจจุบันไม่มีมาตรฐาน ไม่สามารถป้องกันมะขามจากการกระแทกหรือความเสียหายอื่นๆ ได้ ลดโอกาสในการนำไปจำหน่ายยังพื้นที่ห่างไกล และที่สำคัญบรรจุภัณฑ์ปัจจุบันมีรูปลักษณะที่เรียบง่ายไม่สามารถดึงดูดความสนใจของลูกค้าได้

จากปัญหาดังกล่าวกลุ่มวิสาหกิจฯ จึงมีความต้องการเปลี่ยนรูปแบบบรรจุภัณฑ์มะขามให้พัฒนาบรรจุภัณฑ์มะขามอัดก้อนให้มีมาตรฐาน รูปลักษณะบรรจุภัณฑ์น่าสนใจ สามารถดึงดูดความสนใจกับลูกค้ากลุ่มใหม่ เพื่อขยายโอกาสและช่องทางการจำหน่าย เช่น ร้านขายของฝากสถานที่ท่องเที่ยว ร้านค้าปลีก หรือห้างสรรพสินค้า จากความต้องการดังกล่าวคณะผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการ

ออกแบบโดยประยุกต์ใช้วิศวกรรมคั่นเซ เป็นระเบียบวิธีพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญวิธีหนึ่งโดยเริ่มจากการแปลความหมายของความรู้สึกของผู้ใช้เพื่อแปลให้เป็นตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบซึ่งตัวแปรที่ได้นี้จะเชื่อมโยงกับการตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ ถูกเสนอขึ้นครั้งแรกโดย Nagamachi (1999) นักวิชาการชาวญี่ปุ่น โดยงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคั่นเซกับการออกแบบบรรจุภัณฑ์มีจำนวนมาก ตัวอย่างเช่นในงานของ นพรัตน์ และ ชมพูนุท (2555) ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้วิศวกรรมคั่นเซในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวพารบอยล์เพื่อขยายตลาดภายในประเทศ Amirul (2018) นำเสนองานวิจัยที่มุ่งยกระดับความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต ผ่านการวิเคราะห์การออกแบบบรรจุภัณฑ์ ผลการวิจัยขึ้นนี้ชี้ให้เห็นว่า การปรับเปลี่ยนดีไซน์บรรจุภัณฑ์ให้ดึงดูดสายตา ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคเพิ่มขึ้น ต่อมา Prastawa & Mahachandra (2021) ได้เสนอการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคั่นเซกับผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ของ Carica โดยมุ่งเน้นไปที่การออกแบบเพื่อกระตุ้นการซื้อผลิตภัณฑ์ของลูกค้า ผลงานชิ้นนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิศวกรรมคั่นเซในการสร้างบรรจุภัณฑ์ที่ดึงดูดความสนใจและกระตุ้นพฤติกรรมซื้อของผู้บริโภค Fatchurrohman *et al.* (2020) นำเสนองานวิจัยที่มุ่งออกแบบบรรจุภัณฑ์ใหม่สำหรับ SMEs ท้องถิ่น ผ่านการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคั่นเซในการพัฒนารูปลักษณ์บรรจุภัณฑ์ที่ดึงดูดความสนใจ ส่วนในงาน Smith & Jones (2003) นำเสนองานวิจัยที่รวบรวมความต้องการทางอารมณ์ของผู้บริโภค ผ่านระเบียบวิธีวิศวกรรมคั่นเซ เพื่อใช้ออกแบบบรรจุภัณฑ์น้ำมันปรุงอาหาร ผลงานชิ้นนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิศวกรรมคั่นเซในการเข้าใจความต้องการของผู้บริโภคและแปลเป็นองค์ประกอบการออกแบบที่ตอบสนองความต้องการทางอารมณ์ของลูกค้า

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเผยให้เห็นถึงพลังของวิศวกรรมคั่นเซ ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่ไม่เพียงดึงดูดสายตา แต่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค กระตุ้นพฤติกรรมซื้อ และสร้างความประทับใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ เปรียบเสมือนเครื่องมือทรงพลังที่ช่วยแปลความรู้สึกของผู้บริโภคให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบการออกแบบที่จับต้องได้ การศึกษาวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาบรรจุภัณฑ์มะขามเปียกอัดก้อนของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มอาชีพแปรรูปมะขามเพชรน้ำพุ ให้มีมาตรฐาน ควบคู่ไปกับการปรับเปลี่ยนรูปลักษณ์ให้มีความน่าเชื่อถือ น่าสนใจ และใช้งานสะดวก ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้หลักการวิศวกรรมคั่นเซ นำข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้บริโภคมาวิเคราะห์ กำหนดเป็นคุณลักษณะของบรรจุภัณฑ์ที่ดึงดูดความสนใจ กระตุ้นการซื้อ นอกจากนี้ ยังคำนึงถึงความเหมาะสมของวัสดุที่ใช้ บรรจุภัณฑ์จะต้องปลอดภัยต่อผู้บริโภค และมีฉลากที่แสดงรายละเอียดสินค้าอย่างชัดเจน ครบถ้วน ผลลัพธ์ที่ได้คือ บรรจุภัณฑ์มะขามเปียกอัดก้อนที่ไม่เพียงตอบโจทย์ผู้บริโภค แต่ยังสร้างความโดดเด่นในตลาด สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของวิศวกรรมคั่นเซในการยกระดับบรรจุภัณฑ์ให้มากกว่าแค่ภาชนะ แต่เป็นกลยุทธ์สำคัญที่ช่วยผลักดันธุรกิจให้ประสบความสำเร็จ

## 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อสำรวจคุณลักษณะของบรรจุกภัณฑ์มะขามเปรี้ยวอัดก้อนที่สัมพันธ์กับความต้องการของผู้บริโภคและกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดเพชรบูรณ์
- 2.2 เพื่อพัฒนาบรรจุกภัณฑ์มะขามเปรี้ยวอัดก้อนของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดเพชรบูรณ์ด้วยเทคนิควิศวกรรมคั่นเซ
- 2.3 เพื่อประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อบรรจุกภัณฑ์มะขามเปรี้ยวอัดก้อนของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดเพชรบูรณ์

## 3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 3 ระยะ ระยะแรกเป็นการสำรวจกลุ่มตัวอย่างและพฤติกรรมของผู้บริโภค ส่วนในระยะที่ 2 เป็นส่วนของการพัฒนาวิธีการออกแบบบรรจุกภัณฑ์โดยเทคนิควิศวกรรมคั่นเซ และระยะที่ 3 คือ การประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อบรรจุกภัณฑ์ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสังเขปดังนี้

### 3.1 การสำรวจพฤติกรรมผู้บริโภคกลุ่มเดิมและการทดสอบสมมุติฐาน

#### 3.1.1 ประชากร

- 1) ประชากรคือกลุ่ม ผู้บริโภคที่ให้ความสนใจผลิตภัณฑ์ของร้านจำหน่าย มะขามแปรรูป ในจังหวัดเพชรบูรณ์ จำนวน 15 คน
- 2) ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์จำนวน 15 คน ที่มีประสบการณ์ด้านการออกแบบไม่น้อยกว่า 5 ปี มีคุณวุฒิระดับปริญญาตรี ขึ้นไป ทั้งจากหน่วยงานราชการ และบริษัทเอกชน

#### 3.1.2 กลุ่มตัวอย่าง

มะขามเปรี้ยวอัดก้อนในบรรจุกภัณฑ์รูปแบบเดิม และรูปแบบปรับปรุง

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือแผ่นตรวจสอบ (Check sheet) ออกแบบมาเพื่อสังเกตพฤติกรรมของผู้บริโภค หลีกเลียงไม่ไห้กลุ่มตัวอย่างต้องกรอกแบบสอบถามเอง ป้องกันการถูกปฏิเสธโดยแบบสอบถามแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือข้อมูลส่วนตัวของผู้ที่ถูกสังเกตประกอบด้วย เพศ และอายุ อายุของผู้บริโภค ส่วนที่ 2 คือระดับความสนใจของผู้บริโภค สถานที่ในการเก็บข้อมูลคือ ตลาดสด ร้านค้าปลีก และร้านจำหน่ายของฝาก

3.1.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ในวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อยืนยันสมมุติฐานที่ตั้งไว้ ซึ่งการบรรยายลักษณะของกลุ่มตัวอย่าง ใช้การตีความออกมาเป็นระดับของความสนใจของผู้บริโภค ประกอบด้วย 7 ระดับ โดยที่แต่ละระดับจะให้ความหมายที่แตกต่างกันไป ผู้ปฏิบัติงานจะสังเกตตั้งแต่ผู้บริโภคเริ่มให้ความสนใจจนถึงตัดสินใจซื้อ

หรือไม่ซื้อผลิตภัณฑ์ ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์จากแบบสังเกต ถ้าหากกระบวนการซื้อขายสิ้นสุดในระดับที่แตกต่างกันความหมายที่ถูกตีความก็จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของแต่ละระดับ เช่น เมื่อลูกค้าออกจากกระบวนการในระดับที่ 1 คือหยุดมอง ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการซื้อขายจะสิ้นสุดที่ “ไม่ซื้อ” นั้นหมายความว่า จะเกิดความสัมพันธ์ระหว่าง “หยุดมอง” และ “ไม่ซื้อ” อาจแปลความหมายได้ว่า คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อาจจะไม่ใช่รูปแบบ สี ขนาด หรือฟังก์ชันการใช้งานที่ผู้บริโภคต้องการ ดังนั้นผู้ประกอบการอาจจะปรับเปลี่ยนรูปแบบให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภคมากขึ้น หรือหากมีสัมพันธ์ระหว่าง “สัมผัสผลิตภัณฑ์” “ถามราคา” “ต่อรองราคา” และมาสิ้นสุดที่ “ไม่ซื้อ” นั้นหมายความว่า ผู้บริโภคพึงพอใจต่อตัวผลิตภัณฑ์ เพียงแต่ว่าราคาอาจจะไม่เหมาะสม จากนั้นตรวจสอบด้วยความถี่เพื่อสรุปผลการประเมิน

### 3.2 ขั้นตอนการปรับปรุงผลิตภัณฑ์โดยใช้วิศวกรรมคันเซ

เป็นขั้นตอนการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้ผลิตภัณฑ์ที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่ต้องการค้นหาผลิตภัณฑ์ที่ตรงกับความรู้สึกของตัวเอง ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซเพื่อหาแนวทางในการพัฒนาวิธีการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนฯ โดยสามารถอธิบายขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

#### 3.2.1 การเลือกขอบเขต (Choice of domain) ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มเป้าหมายคือกลุ่มวัยทำงาน จนไปถึงผู้สูงอายุ ที่ชื่นชอบในการปรุงอาหารเอง มากกว่าการซื้อจากด้านนอกเขามารับประทาน และผู้ประกอบการร้านอาหาร

#### 3.2.2 การกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึก (Span the semantic space)

ในการกำหนดขอบเขตการคัดเลือกคำแสดงความรู้สึก ที่ใช้เชื่อมโยงกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ จำเป็นต้องเลือกคำที่แสดงขอบเขตความรู้ของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ (กุศล, 2554) เพื่อนำไปใช้ระบุคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ให้สอดคล้องกับความรู้สึกที่ผู้บริโภคต้องการ

#### 3.2.3 การรวบรวมและคัดเลือกคำแสดงความรู้สึก

ในการรวบรวมคำแสดงความรู้สึก ผู้วิจัยใช้การคัดเลือกคำวิเศษณ์ (Adjective) ที่แสดงถึงความรู้สึกต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับการออกแบบ และเกี่ยวข้องกับบรรจุภัณฑ์มะขามอัดก้อนสามารถสื่อความรู้สึกถึงผู้บริโภคได้

#### 3.2.4 การคัดเลือกและจัดกลุ่มคำแสดงความรู้สึก

คำแสดงความรู้สึก (Kansai words : KW) จะถูกประเมินและคัดเลือกโดยผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์จำนวน 15 ท่าน ด้วยการหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of item objective congruence: IOC) โดยคัดเลือกคำที่มีค่า IOC มากที่สุด จากนั้นใช้แบบสอบถามเพื่อสำรวจความคิดเห็นจากกลุ่มเป้าหมาย โดยใช้แบบสอบถามโดยใช้วิธีการวัดความหมายเชิงความแตกต่าง (Semantic differential : SD) โดย SD ใช้ประเมินความหมายเชิงความแตกต่างของคำ ซึ่ง

เป็นเครื่องมือวัดที่นิยมใช้ในเทคนิคการออกแบบโดยเน้นผู้ใช้ เพื่อประเมินคุณค่าทางด้านอารมณ์ของผลิตภัณฑ์ (Osgood *et al.*, 1957) ดังตารางที่ 1 ว่าท่านเห็นด้วยเพียงใดที่คำค้นไชนั้นส่งผลกระทบต่อความรู้ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ (กุศล ,2554)

ตารางที่ 1 แสดงระดับการประเมินผลกระทบต่อความรู้ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ของคำแสดงความรู้สึก

| Kansei word-1    |    |    |    |   |   |   |   |           |
|------------------|----|----|----|---|---|---|---|-----------|
| Beautiful - Ugly |    |    |    |   |   |   |   |           |
| Not at all       | -1 | -2 | -3 | 0 | 1 | 2 | 3 | Very much |

โดยได้ประยุกต์ใช้วิธีการ Semantic differential 7 ระดับ เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา (Hsu *et al.*, 2000) จากนั้นใช้วิธีการสกัดองค์ประกอบ (Factor extraction) ด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis) เพื่ออาศัยความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรทางองค์ประกอบที่สามารถใช้แทนตัวแปรได้ทุกตัว และนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ร่วมกับ รูปแบบและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนต่อไป (ศิริชัย, 2553)

### 3.2.5 การกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้รวบรวมผลิตภัณฑ์ตัวอย่างจากนิตยสารหรือหนังสือที่เกี่ยวข้อง และข้อมูลเชิงเทคนิคของผลิตภัณฑ์เดิมที่มีอยู่เพื่อระบุคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ (Product properties) จากนั้นใช้วิศวกรรมค้นเซกต์คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลกระทบต่อความรู้สึกของกลุ่มตัวอย่างที่ส่งผลไปสู่การพัฒนาให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) รวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ (Collection) ในขั้นตอนนี้เป็นการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลไปยังความรู้สึกของผู้บริโภค

2) คัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์สำคัญ (Selection) ซึ่งจะถูกประเมินโดยผู้มีความรู้ในด้านออกแบบผลิตภัณฑ์ หัวข้อในการประเมิน โดยใช้แบบสอบถามที่มีระดับความแข็งแรงของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์สำคัญ 7 ระดับ ตั้งแต่ -3 ถึง 3 โดยที่ -3: หมายถึง คำคุณลักษณะ ไม่มีความสำคัญต่อการตัดสินใจในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์เลย ส่วน 3 หมายถึง คำคุณลักษณะ มีความสำคัญต่อการตัดสินใจในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์มากที่สุด

3) การกำหนดชุดคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ (Compiling) ขั้นตอนนี้เป็นการคัดเลือกและรวมคุณลักษณะที่ส่งผลต่อความรู้สึกของผู้บริโภคเข้าไว้ด้วยกันเพื่อใช้เป็น ตัวแทนในการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ ระหว่างกลุ่มคำแสดงความรู้สึกที่ได้รับจากการสกัดองค์ประกอบ (Factor extraction) และคุณลักษณะย่อย (Category score: CS) ที่แสดงถึงโครงสร้าง และคุณลักษณะเชิงกายภาพของ

ผลิตภัณฑ์ (Schütte & Eklund, 2005) ผู้วิจัยใช้คำถามอ้างอิงจากกรอบแนวคิดในการออกแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์หลักการออกแบบของ อุดมศักดิ์ (2550). และลวดลายผลิตภัณฑ์ ของ สิทธิศักดิ์ (2559) จำนวน 5 องค์ประกอบ คือ ขนาด การใช้สี ลวดลาย วัสดุที่ใช้ผลิต และประโยชน์ใช้สอย

3.2.6 วิเคราะห์ข้อมูลขั้นตอนการสังเคราะห์นี้เป็นการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ ระหว่างคำ แสดงความรู้สึกและคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ (Relationship identification) ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ จะช่วยให้เห็นกรอบแบบทราบได้ว่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ใดที่มีผลต่อการรับรู้ของผู้บริโภคในความรู้สึก ต่าง ๆ ขั้นตอนนี้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ (Partial correlation coefficient : PCC) เพื่อแสดงค่าระดับความสัมพันธ์หรือน้ำหนักความสำคัญ (Magnitude) ระหว่าง คำแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ที่บ่งชี้ว่าคุณลักษณะใดส่งผลต่อ การรับรู้ จากนั้นวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย จากทฤษฎีการ วิเคราะห์เชิงปริมาณรูปแบบที่ 1 (Quantification theory type 1 analysis : QT1)) ซึ่งเป็นวิธีการ วิเคราะห์ทางสถิติที่ใช้เพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเชิงคุณภาพ เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิง ปริมาณระหว่างค่าคะแนนและองค์ประกอบการออกแบบ โดยแปลงตัวแปรเชิงคุณภาพเป็นตัวเลข จาก เทคนิคที่เรียกว่า การแปลงคะแนน คะแนนเหล่านี้ถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้สถิติเชิงเส้นตรง (Linear regression) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (Nagamachi, 2011)

#### 4. ผลการวิจัย

##### 4.1 ผลการสำรวจความต้องการเบื้องต้น

ผลลัพธ์จากการสำรวจพฤติกรรมของผู้กลุ่มในสถานที่จำหน่ายผลิตภัณฑ์เป้าหมาย โดย สังเกตจากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ 3 รูปแบบ ได้แก่ ขนาดเล็ก  $2 \times 13 \times 16$  mm ขนาดกลาง  $60 \times 70 \times 20$  mm และขนาดครึ่งกิโลกรัมรูปสี่เหลี่ยมขนาด  $120 \times 140 \times 40$  mm ผลลัพธ์จากการลง พื้นที่สำรวจแสดงให้เห็นว่าจากผู้ให้ข้อมูลทั้งหมด 92 คน เพศหญิงให้ความสนใจมากกว่าเพศชาย โดยมีเพศชายให้ความสนใจเพียงร้อยละ 4 ส่วนเพศหญิงให้ความสนใจ 88 คน หรือร้อยละ 96 ส่วนใหญ่มี อายุ 50 ปีขึ้นไป รองลงมาคือช่วงอายุประมาณ 34 - 40 ปี และ 41 - 50 ปี ส่วนในช่วงอายุประมาณ 15-20 ปี มีเพียงร้อยละ 1 เท่านั้น จึงสรุปได้ว่าผู้บริโภคคือกลุ่มช่วงอายุระหว่าง 21-40 ปี หรือกลุ่มวัย ทำงาน จนถึงกลุ่มวัยกลางคนถึงร้อยละ 40 แต่กลุ่มใหญ่ก็ยังเป็นกลุ่มที่มีอายุระหว่าง 41-50 ปีขึ้นไป

##### 4.2 ขั้นตอนการปรับปรุงผลิตภัณฑ์โดยใช้วิศวกรรมคันเซ

###### 4.2.1 การคัดเลือกกลุ่มประชากร

ผลลัพธ์จากการสำรวจในหัวข้อ 4.1 สามารถระบุกลุ่มเป้าหมายได้ว่าเป็นวัยทำงาน จน ไปถึงผู้สูงอายุ โดยมีความเกี่ยวข้องกับการประกอบอาหาร และมีอายุระหว่าง 35-50 ปี รูปแบบ

มะขามอัดก้อนที่กลุ่มตัวอย่างเลือกมากที่สุดคือขนาดเล็ก ที่สามารถใช้อย่างง่ายมากกว่ากล่องใหญ่ที่มีราคาถูกกว่า



ภาพที่ 1 รูปแบบของผลิตภัณฑ์ตัวแทน

#### 4.2.2 การกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึก

ผู้วิจัยได้รวบรวมคำค้นไ้จากการค้นคว้า แหล่งการค้าแหล่งต่างๆ ที่มีอยู่ในท้องตลาด จำนวน 6 คู่ จากการทบทวนวรรณกรรม 14 คู่ และจากหนังสือออกแบบผลิตภัณฑ์ 2 คู่ ซึ่งลักษณะผลิตภัณฑ์ได้ค้นเซ่ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 22 คู่ทั้งในด้านลบและบวก หรือ 44 คำจากทั้งหมด ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 การกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึก

| ลำดับ | Main Word         | Kansei said positive         | Kansei said negative               |
|-------|-------------------|------------------------------|------------------------------------|
| 1     | Colored packaging | Classic (นิยมมาตลอด)         | Fashionable (กำลังเป็นที่นิยม)     |
| 2     |                   | Upper class (มีระดับ)        | Plain(เรียบ/ธรรมดา)                |
| 3     |                   | Natural(เป็นธรรมชาติ)        | Artificial (ประดิษฐ์)              |
| 4     |                   | Clean (ดูสะอาด)              | Dirty (ดูสกปรก)                    |
| 5     |                   | Fresh (สดใหม่ดู/สดชื่น)      | Dry (แห้งแล้ง)                     |
| 6     | Texture           | Translucent (โปร่งแสง)       | Opaque (ทึบแสง)                    |
| 7     |                   | Glossy (มันวาว)              | Matte (ผิวด้าน)                    |
| 8     |                   | Smooth (เรียบ)               | Rough (ขรุขระ)                     |
| 9     | Patterned         | Modern (ทันสมัย)             | Old(โบราณ/เก่า)                    |
| 10    |                   | Formal (ดูเป็นทางการ)        | Casual (สบาย/ลำลอง)                |
| 11    |                   | Traditional (ประเพณีนิยม)    | Progressive (หัวก้าวหน้าคนหัวใหม่) |
| 12    |                   | Domestic (ดูเป็นของพื้นถิ่น) | Urban (ดูเกี่ยวกับเมือง)           |



| ลำดับ | Main Word   | Kansei said positive       | Kansei said negative      |
|-------|-------------|----------------------------|---------------------------|
| 13    | Interesting | Unique (เป็นเอกลักษณ์)     | General(ทั่วไป)           |
| 14    |             | Look different (ดูแตกต่าง) | look alike (ดูเหมือน)     |
| 15    | Information | Confident (มั่นใจ)         | Unconvinced(ไม่มั่นใจ)    |
| 16    |             | Exact (ถูกต้อง แน่นนอน)    | Unsure(ไม่แน่นอน)         |
| 17    |             | Reliable (น่าเชื่อถือ)     | Unworthy (ไม่น่าเชื่อถือ) |
| 18    | Size        | Rectangular (สี่เหลี่ยม)   | Rounded (โค้งมน)          |
| 19    |             | Compact (กะทัดรัด)         | Large (ใหญ่โต)            |
| 20    | Use         | Handy (พกพาง่าย)           | Heavy (หนัก)              |
| 21    |             | Simple (ง่าย)              | Complex (ซับซ้อน)         |
| 22    |             | Minimalist (น้อยชิ้น)      | Maximum (จำนวนมากที่สุด)  |

หากนำมาแบ่งออกเป็นกลุ่มสามารถแบ่งได้เป็น 7 ด้านประกอบด้วย สีของบรรจุภัณฑ์ ลักษณะ รูปแบบ ความน่าสนใจ ขนาด ข้อมูลและการใช้งาน

ในการแบ่งกลุ่มคำแสดงความรู้สึกโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ สามารถแบ่งออกเป็น 7 กลุ่มดังตารางที่ 3 ซึ่งยังมีมากเกินไป ดังนั้นจึงคัดเลือกอีกครั้งโดยผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์จำนวน 15 ท่าน จากการหาคำดัชนีความสอดคล้องตัวอย่างดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 แบ่งออกเป็นกลุ่มคำแสดงความรู้สึก

| Colored packaging      | Texture                | Patterned             | Interesting                | Size                     | Information             | Use               |
|------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------|
| Classic (ดั้งเดิม)     | Translucent (โปร่งแสง) | Formal (ดูเป็นทางการ) | Unique (เอกลักษณ์)         | Rectangular (สี่เหลี่ยม) | Confident (มั่นใจ)      | Handy (พกพาง่าย)  |
| Upper class (มีระดับ)  | Opaque (ทึบแสง)        | ทันสมัย (Modern)      | Strange (แปลก)             | Rounded (โค้งมน)         | Exact (ถูกต้อง แน่นนอน) | Simple (ง่าย)     |
| Natural (เป็นธรรมชาติ) | Glossy (มันวาว)        | Domestic (พื้นถิ่น)   | Look different (ดูแตกต่าง) | Compact (กะทัดรัด)       | Reliable (น่าเชื่อถือ)  | Complex (ซับซ้อน) |



| Colored packaging          | Texture            | Patterned                    | Interesting               | Size | Information | Use                      |
|----------------------------|--------------------|------------------------------|---------------------------|------|-------------|--------------------------|
| Clean<br>(ดูสะอาด)         | Sleek<br>(มันเงา)  | Traditional<br>(ประเพณีนิยม) | Eye catching<br>(สะดุดตา) |      |             | Minimalist<br>(น้อยชิ้น) |
| Fresh<br>(สดใหม่ดู/สดชื่น) | Rough<br>(ขรุขระ)  |                              |                           |      |             |                          |
|                            | Matte<br>(ผิวด้าน) |                              |                           |      |             |                          |

ตารางที่ 4 ตัวอย่างตารางหาค่าดัชนีความสอดคล้องของกลุ่มคำค้นเซ

| กลุ่มคำค้นเซ : Colored packaging |          |          |
|----------------------------------|----------|----------|
| ไม่สอดคล้อง                      | ไม่แน่ใจ | สอดคล้อง |
| -1                               | 0        | +1       |

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์กลุ่มคำที่ได้รับการคัดเลือกเพื่อไปใช้ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์

| กลุ่มคำค้นเซ      | ค่าดัชนีความสอดคล้อง |
|-------------------|----------------------|
| Colored packaging | 0.53                 |
| Texture           | 0.73                 |
| Patterned         | 0.53                 |
| Interesting       | 0.80                 |
| Size              | 0.45                 |
| Information       | 0.87                 |
| Use               | 0.27                 |

ผลที่ได้คือกลุ่มคำแสดงความรู้สึกที่มีค่า IOC มากกว่าที่สุดทั้งหมด 3 กลุ่ม ประกอบด้วยกลุ่มคำค้นเซ Texture Interesting และ Information ผลลัพธ์ (กุศล, 2554) ดังที่แสดงผลลัพธ์ไว้ในตารางที่ 5 เนื่องจากได้รับคะแนนการประเมินสูงสุดจากผู้เชี่ยวชาญ ด้านการออกแบบ โดยกลุ่มคำ 3 กลุ่มจะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการออกแบบร่วมกับคุณลักษณะสำคัญของตัวแทนผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนต่อไป

#### 4.2.3 การกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

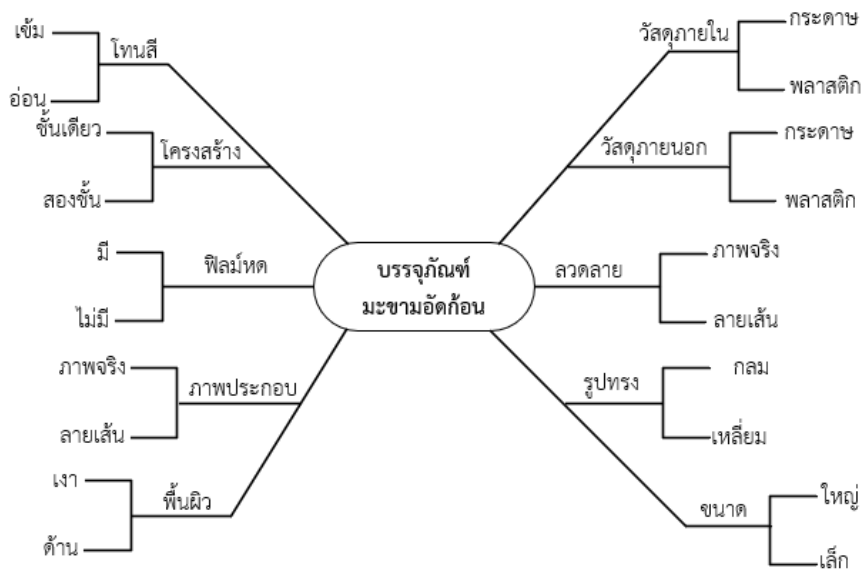
เป็นขั้นตอนการสกัดคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์จากข้อมูลผลิตภัณฑ์เดิมที่มีอยู่แล้วเพื่อส่งผลกระทบต่อความรู้สึกของผู้บริโภคที่ส่งผลไปสู่การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ให้ตรงกับความต้องการ ซึ่งผลิตภัณฑ์ 5 รูปแบบได้รับการคัดเลือกเพื่อนำมาใช้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะผลิตภัณฑ์และคำแสดงความรู้สึกภายใต้กรอบแนวคิดในการออกแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ และลดทอน โดยได้ออกแบบจากข้อมูลที่รวบรวมได้เบื้องต้นดังภาพที่ 2 และรูปลักษณะการออกแบบจากผู้ประกอบการที่อยู่ในท้องตลาด ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 ตัวอย่างรูปลักษณะการออกแบบจากข้อมูลที่รวบรวมได้เบื้องต้น



ภาพที่ 3 ตัวอย่างรูปลักษณะการออกแบบจากผู้ประกอบการที่อยู่ในท้องตลาด

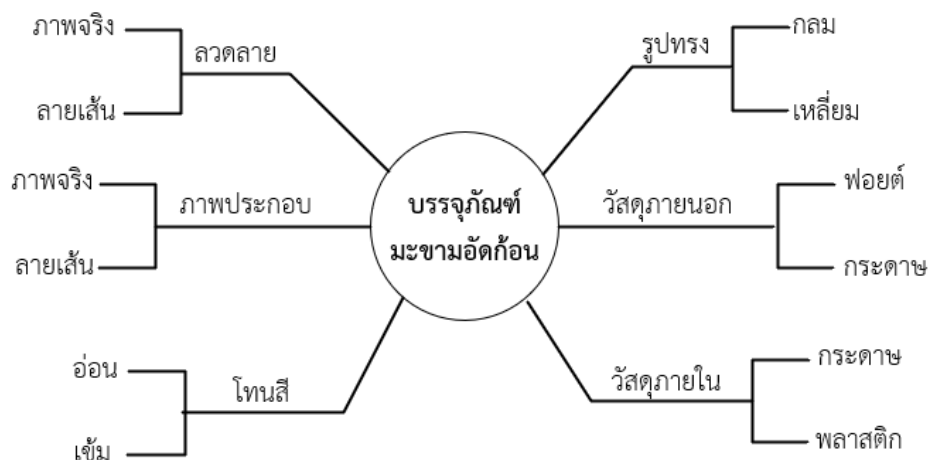


ภาพที่ 4 คุณลักษณะสำคัญของตัวแทนบรรจุภัณฑ์ทั้งหมด

ตารางที่ 6 แสดงการคัดเลือกคำคุณลักษณะสำคัญสำหรับการออกแบบบรรจุภัณฑ์ด้วย Semantic Differential (SD) Scale

| หมวดค่าแสดงคุณลักษณะ : รูปทรง |    |    |    |   |   |   |   |           |
|-------------------------------|----|----|----|---|---|---|---|-----------|
| Not at all                    | -1 | -2 | -3 | 0 | 1 | 2 | 3 | Very much |

การคัดเลือกคำคุณลักษณะสำคัญทั้งหมด 10 หมวด จากคุณลักษณะผลิตภัณฑ์และคำแสดงความรู้สึกภายใต้กรอบแนวคิดในการออกแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ของ อุดมศักดิ์ (2550) และ ลวดลายของสิทธิศักดิ์ (2559) ซึ่งประกอบด้วย คุณลักษณะย่อยของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 20 คำ ดังภาพที่ 4 ซึ่งในการคัดเลือกคำกำหนดคุณลักษณะสำคัญที่เกี่ยวข้องที่สุด คณะผู้วิจัยใช้ Semantic differential (SD) scale ร่วมกับรูปแบบบรรจุภัณฑ์ที่มีในท้องตลาดที่ได้รับการคัดเลือกมา 5 รูปแบบ โดยผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 5 คุณลักษณะสำคัญของตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการคัดเลือก

ซึ่งผลลัพธ์การคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 6 หมวด ดังภาพที่ 5 ซึ่งประกอบด้วย ลวดลาย ( $X_1$ ) รูปทรง ( $X_2$ ) ภาพประกอบ ( $X_3$ ) วัสดุภายนอก ( $X_4$ ) โทนสี ( $X_5$ ) และวัสดุภายใน ( $X_6$ ) ดังนี้

$X_{11}$ = ภาพจริง

$X_{12}$ = ลายเส้น

$X_{21}$ = กลม

$X_{22}$ = เหลี่ยม

$X_{31}$ = ภาพจริง

$X_{32}$ = ลายเส้น

$X_{41}$ = ฟอยด์

$X_{42}$ = กระดาษ

$X_{51}$ = อ่อน

$X_{52}$ = เข้ม

$X_{61}$ = กระดาษ

$X_{62}$ = พลาสติก

เมื่อได้รูปแบบบรรจุกัณฑ์ คำคุณลักษณะสำคัญ และคุณลักษณะย่อยของบรรจุกัณฑ์ ขั้นตอนต่อไปคือการสำรวจความคิดเห็นของกลุ่มเป้าหมายซึ่งก็คือกลุ่มผู้บริโภค มีความเกี่ยวข้องการประกอบอาหาร และผู้ประกอบการร้านอาหาร จำนวน 15 คน โดยมีระดับการประเมินความเห็นด้วยทั้งหมด 5 ระดับ คือ 1-5 ผลลัพธ์จากแบบสอบถามจะถูกนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้ (Square multiple correlation coefficient:  $MCC^2$ ) หรือ ค่า  $R^2$  ในสมการถดถอย (Regression model) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กำลังสองระหว่างคุณลักษณะผลิตภัณฑ์และกลุ่มค่าแสดงความรู้สึก ซึ่งถ้าหากค่า  $MCC^2$  ยิ่งมาก นั้นหมายถึงความสามารถที่ตัวแปรสามารถอธิบายความเชื่อมั่นว่าสินค้าจะเป็นที่นิยมในกลุ่มเป้าหมายทั้งในทางลบและทางบวก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือผู้คนส่วนใหญ่มีความคิดเห็นไปในทิศทางเดียวกัน (Jiao & Qu, 2019)

#### 4.2.4 ผลการตอบแบบสอบถามด้วยค่าที่แสดงความรู้สึกที่แตกต่างกัน

จากการสำรวจข้อมูลด้วยแบบสอบถามได้มีผู้ตอบแบบสอบถามจาก กลุ่มผู้บริโภคที่ให้ความสนใจผลิตภัณฑ์ จำนวนตัวอย่างละ 15 คน ซึ่งเป็นผู้ประกอบการร้านขายกลุ่มร้านอาหารและผู้ที่ทำงานที่เกี่ยวข้องกับการทำอาหาร นักท่องเที่ยว อายุระหว่าง 35-50 สามารถนำมาสรุปผลการประเมินความรู้สึกแต่ละตัวอย่างผลิตภัณฑ์ได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยของความรู้สึกแต่ละตัวอย่างบรรจุภัณฑ์ของกลุ่มตัวอย่าง

| คำค้นเซ     | รูปแบบ 1 | รูปแบบ 2 | รูปแบบ 3 | รูปแบบ 4 | รูปแบบ 5 |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Texture     | 3.60     | 3.80     | 3.73     | 4.47     | 3.60     |
| Interesting | 3.93     | 4.07     | 3.93     | 4.53     | 3.87     |
| Information | 3.80     | 4.07     | 3.87     | 4.47     | 3.93     |
| คะแนนเฉลี่ย | 3.78     | 3.98     | 3.84     | 4.49     | 3.80     |

จากตารางที่ 7 ค่าที่แสดงความรู้สึกผิวสัมผัส (Texture) ของทุกรูปแบบมีระดับคะแนนเฉลี่ยอยู่ในกลุ่มเดียวกันยกเว้น รูปแบบที่ 4 ที่มีค่าเฉลี่ยสูงกว่ารูปแบบอื่น เช่นเดียวกับในกลุ่มของความรูสึกด้านความน่าสนใจ (Interesting) รูปแบบที่ได้รับคะแนนเฉลี่ยสูงสุดจะอยู่ในรูปแบบที่ 4 แต่ในรูปแบบที่ 2 ก็เป็นรูปแบบที่กลุ่มตัวอย่างให้ความสนใจไม่แพ้กัน ส่วนกลุ่มของความรูสึกด้านข้อมูลและรายละเอียดของบรรจุภัณฑ์ (Information) ก็ยังเป็นรูปแบบที่มีค่าเฉลี่ยคะแนนสูงที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ารูปแบบที่ 4 เป็นรูปแบบที่กลุ่มตัวอย่างให้ความสนใจมากที่สุด จากการวิเคราะห์เบื้องต้นจะนำค่าเฉลี่ยทั้งหมดไปประเมินร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $MCC^2$ ) ตรวจสอบคล้อยกับค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประเมินหรือไม่

#### 4.2.5 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภท 1 (Quantification theory type 1 analysis)

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากสมการถดถอย ในตารางที่ 8 แสดงให้เห็นว่าระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามของบรรจุภัณฑ์รูปแบบ 1 และกลุ่มของความรูสึกด้านข้อมูลและรายละเอียดของบรรจุภัณฑ์ มีความสัมพันธ์กันมากที่สุด โดยมีค่า  $MCC^2$  สูงถึง 0.75 ส่วนรูปแบบที่ 2 กลุ่มของความรูสึกด้านความน่าสนใจมีความสัมพันธ์กันมากที่สุดโดยมีค่า  $MCC^2$  ร้อยละ 60.49 ในรูปแบบที่ 3 และ 4 มีค่า  $MCC^2$  สูงที่สุดในทั้ง 3 กลุ่มหากเทียบกันทั้ง 5 รูปแบบ ซึ่งมีค่าร้อยละ 55.32 และ 54.34 ตามลำดับ ส่วนรูปแบบที่ไม่มีค่า  $MCC^2$  สูงกว่าร้อยละ 50 และยังมีค่า  $MCC^2$  เฉลี่ยน้อยที่สุดคือ รูปแบบที่ 5

แต่อย่างไรก็ตาม ถึงค่า  $MCC^2$  จะสูงแต่ก็ยังไม่สามารถบอกได้ว่าความคิดเห็นจะมีความสอดคล้องกันไปในทิศทางบวกหรือไม่ดังนั้นการค้นหาคูณสมบัติของผลิตภัณฑ์ผู้วิจัยใช้การวิเคราะห์เชิงปริมาณประเภท 1 ซึ่งเป็นวิธีที่เป็นที่นิยมใช้กันมากในการค้นหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความรู้สึก และคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ เพื่อคำนวณหาค่า PCC และ CS จากโปรแกรม Rstudio เวอร์ชัน 1.2.5033 (Nagamachi, 2011) เพื่อใช้พิจารณาในการพัฒนาผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ต่อไป

**ตารางที่ 8** ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากสมการถดถอย

| รูปแบบ | คำค้นเซ     | $MCC^2$ | ลวดลาย | รูปทรง | ภาพประกอบ | วัสดุภายใน | โทนสี | วัสดุภายนอก |
|--------|-------------|---------|--------|--------|-----------|------------|-------|-------------|
| 1      | Texture     | 21.20   | 0.08   | 0.21   | 0.37      | 0.19       | 0.23  | 0.10        |
|        | Interesting | 13.36   | 0.17   | 0.05   | 0.08      | 0.05       | 0.04  | 0.05        |
|        | Information | 75.51*  | 0.08   | 0.09   | 0.17      | 0.30       | 0.05  | 0.10        |
| 2      | Texture     | 17.44   | 0.02   | 0.06   | 0.28      | 0.00       | 0.26  | 0.15        |
|        | Interesting | 61.78*  | 0.57   | 0.56   | 0.51      | 0.66       | 0.03  | 0.50        |
|        | Information | 36.92   | 0.19   | 0.48   | 0.12      | 0.00       | 0.13  | 0.48        |
| 3      | Texture     | 60.49*  | 0.57   | 0.52   | 0.57      | 0.07       | 0.63  | 0.27        |
|        | Interesting | 59.07*  | 0.07   | 0.68   | 0.58      | 0.47       | 0.11  | 0.11        |
|        | Information | 46.40   | 0.14   | 0.18   | 0.20      | 0.11       | 0.06  | 0.53        |
| 4      | Texture     | 64.03*  | 0.19   | 0.10   | 0.28      | 0.34       | 0.56  | 0.42        |
|        | Interesting | 42.77   | 0.08   | 0.06   | 0.08      | 0.43       | 0.38  | 0.33        |
|        | Information | 56.23*  | 0.44   | 0.40   | 0.42      | 0.44       | 0.63  | 0.11        |
| 5      | Texture     | 35.29   | 0.22   | 0.03   | 0.32      | 0.18       | 0.02  | 0.45        |
|        | Interesting | 26.34   | 0.22   | 0.47   | 0.03      | 0.04       | 0.38  | 0.20        |
|        | Information | 34.40   | 0.08   | 0.20   | 0.34      | 0.29       | 0.09  | 0.47        |

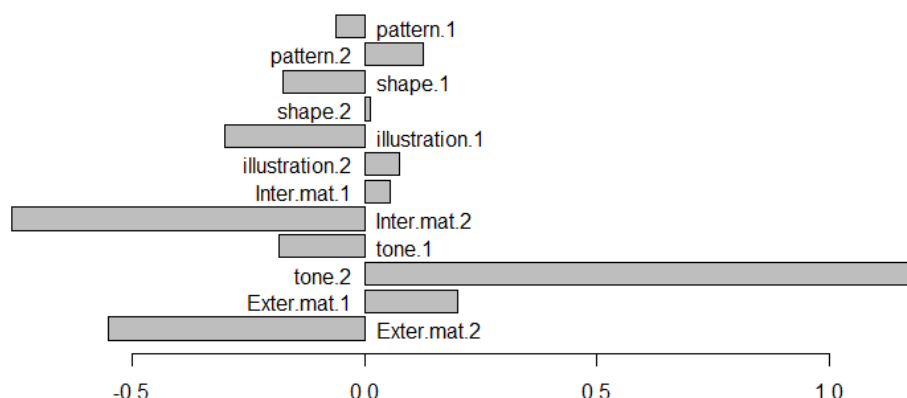
แนวทางการกำหนดคุณลักษณะบรรจุภัณฑ์จะอาศัยค่า CS ของรูปแบบบรรจุภัณฑ์ที่ได้จากผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภท 1 มาใช้ เพื่อระบุโครงสร้างและคุณลักษณะเชิงกายภาพของผลิตภัณฑ์ควรเป็นรูปแบบใด ซึ่งหาค่า CS ในทิศทางบวกและมีค่ามากสามารถอธิบายได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่นำมาพิจารณาสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้เป็นอย่างดี และส่วนใหญ่มีความคิดเห็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่ถ้าหาค่า CS ไปในทิศทางลบแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่พิจารณาความสอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคในทางลบ ดังนั้นไม่



ควรนำความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบ (ศิริชัย, 2553) โดยตารางสรุปค่า CS บรรจุภัณฑ์มะขามอัดก้อนแสดงดังตารางที่ 9 และตัวอย่างแผนภูมิแสดงค่าคุณลักษณะย่อยดังภาพที่ 6

ตารางที่ 9 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความรู้สึกและคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย Category score (CS)

| รูปแบบ | คำค้น           | ลวดลาย          |                 | รูปทรง          |                 | ภาพประกอบ       |                 | วัสดุภายใน      |                 | โพนสี           |                 | วัสดุภายนอก     |                 |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|        |                 | X <sub>11</sub> | X <sub>12</sub> | X <sub>21</sub> | X <sub>22</sub> | X <sub>31</sub> | X <sub>32</sub> | X <sub>41</sub> | X <sub>42</sub> | X <sub>51</sub> | X <sub>52</sub> | X <sub>61</sub> | X <sub>62</sub> |
| 1      | Texture         | -<br>0.04       | 0.11            | 0.14            | -<br>0.24       | 0.07            | -<br>2.14       | -<br>0.11       | 0.27            | -<br>0.10       | 0.50            | -0.08           | 0.09            |
|        | Interesti<br>ng | -<br>0.09       | 0.36            | 0.04            | -<br>0.06       | -<br>0.07       | 0.09            | -<br>0.03       | 0.09            | 0.03            | -<br>0.04       | 0.05            | -0.05           |
|        | Informat<br>ion | -<br>0.05       | 0.18            | 0.10            | -<br>0.12       | 0.19            | -<br>0.19       | 0.16            | -<br>0.81       | 0.03            | -<br>0.12       | 0.11            | -0.11           |
| 2      | Texture         | -<br>0.00       | -0.00           | -<br>0.00       | -<br>0.00       | -<br>1.21       | -<br>0.00       | -<br>0.00       | -<br>0.00       | -<br>0.00       | -<br>0.00       | -0.00           | -0.00           |
|        | Interesti<br>ng | 0.29            | -0.80           | 2.81            | -<br>0.20       | -<br>0.27       | 0.54            | 0.30            | -<br>1.99       | 0.01            | -<br>0.04       | 0.28            | -0.77           |
|        | Informat<br>ion | 0.09            | -0.25           | -<br>1.50       | 0.10            | -<br>0.10       | 0.08            | -<br>0.00       | 0.00            | -<br>0.04       | 0.19            | 0.31            | -0.62           |
| 3      | Texture         | -<br>0.51       | 0.77            | -<br>1.22       | 0.44            | -<br>0.27       | 1.81            | 0.04            | -<br>0.07       | 0.50            | -<br>0.75       | 0.39            | -0.14           |
|        | Interesti<br>ng | -<br>0.03       | 0.06            | -<br>2.28       | 0.16            | 0.27            | -<br>0.76       | 0.13            | -<br>0.87       | 0.06            | -<br>0.09       | 0.07            | -0.08           |
|        | Informat<br>ion | 0.11            | -0.17           | -<br>0.62       | 0.04            | 0.16            | -<br>0.19       | 0.09            | -<br>0.10       | 0.02            | -<br>0.14       | 1.14            | -0.28           |
| 4      | Texture         | -<br>0.06       | 0.12            | -<br>0.39       | 0.01            | 0.03            | -<br>0.00       | 0.06            | -<br>0.42       | -<br>0.04       | 0.20            | 0.02            | -0.08           |
|        | Interesti<br>ng | 0.01            | -0.08           | -<br>0.20       | 0.01            | -<br>0.06       | 0.01            | 0.01            | -<br>0.12       | -<br>0.06       | 0.22            | 0.06            | -0.10           |
|        | Informat<br>ion | -<br>0.07       | 0.49            | -<br>0.38       | 0.01            | 0.13            | -<br>0.02       | -<br>0.14       | 0.56            | 0.07            | -<br>0.65       | 0.05            | -0.18           |
| 5      | Texture         | -<br>0.39       | 0.14            | 0.06            | -<br>0.01       | -<br>0.37       | 0.55            | -<br>0.23       | 0.20            | 0.02            | -<br>0.02       | 1.20            | -0.30           |
|        | Interesti<br>ng | -<br>0.30       | 0.15            | 1.96            | -<br>0.14       | -<br>0.02       | 0.04            | 0.02            | -<br>0.08       | 0.38            | -<br>0.43       | 0.55            | -0.08           |
|        | Informat<br>ion | 0.11            | -0.04           | 0.68            | -<br>0.04       | -<br>0.24       | 0.36            | 0.26            | -<br>0.23       | -<br>0.04       | 0.13            | 0.85            | -0.21           |



ภาพที่ 6 ตัวอย่างแผนภูมิแสดงค่าคุณลักษณะย่อยที่ส่งผลต่อความต้องการของกลุ่มเป้าหมาย

4.2.6 ผลลัพธ์จากการพิจารณาเพื่อกำหนดคุณลักษณะสำคัญหลักและองค์ประกอบย่อยของบรรจุภัณฑ์มะขามอัดก้อน

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ในการกำหนดคุณลักษณะสำคัญหลักของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบย่อยๆ ทั้ง 6 ประการสามารถนำมาสรุปได้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการสรุปคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ตัวแทนตามความต้องการของผู้บริโภค

| รูปแบบ | คำค้นเซ     | ลวดลาย |    | รูปทรง |    | ภาพประกอบ |    | วัสดุภายใน |    | โพนสี |    | วัสดุภายนอก |    |
|--------|-------------|--------|----|--------|----|-----------|----|------------|----|-------|----|-------------|----|
|        |             | x1     | x2 | x1     | x2 | x1        | x2 | x1         | x2 | x1    | x2 | x1          | x2 |
| 1      | Texture     |        | ✓  | ✓      |    | ✓         |    |            | ✓  |       | ✓  |             | ✓  |
|        | Interesting |        | ✓  | ✓      |    |           | ✓  |            | ✓  |       | ✓  |             |    |
|        | Information |        | ✓  | ✓      |    | ✓         |    | ✓          |    | ✓     |    | ✓           |    |
| 2      | Texture     | ✓      | ✓  | ✓      | ✓  | ✓         | ✓  | ✓          | ✓  | ✓     |    | ✓           |    |
|        | Interesting | ✓      |    | ✓      |    |           | ✓  | ✓          |    | ✓     |    | ✓           |    |
|        | Information | ✓      |    |        | ✓  |           | ✓  |            | ✓  |       | ✓  | ✓           |    |
| 3      | Texture     |        | ✓  |        | ✓  |           | ✓  | ✓          |    | ✓     |    | ✓           |    |
|        | Interesting |        | ✓  |        | ✓  | ✓         |    | ✓          |    | ✓     |    | ✓           |    |
|        | Information | ✓      |    |        | ✓  | ✓         |    | ✓          |    | ✓     |    | ✓           |    |
| 4      | Texture     |        | ✓  |        | ✓  | ✓         |    | ✓          |    |       | ✓  | ✓           |    |
|        | Interesting | ✓      |    |        | ✓  |           | ✓  | ✓          |    |       | ✓  | ✓           |    |
|        | Information |        | ✓  |        | ✓  | ✓         |    |            | ✓  | ✓     |    | ✓           |    |
| 5      | Texture     |        | ✓  | ✓      |    |           | ✓  |            | ✓  | ✓     |    | ✓           |    |
|        | Interesting |        | ✓  | ✓      |    |           | ✓  | ✓          |    | ✓     |    | ✓           |    |
|        | Information | ✓      |    | ✓      |    |           | ✓  | ✓          |    |       | ✓  | ✓           |    |
| รวม    |             | 6      | 10 | 8      | 8  | 6         | 9  | 10         | 6  | 10    | 5  | 14          | 1  |

1) รูปแบบที่ 1 เป็นรูปแบบที่ได้รับคะแนนเฉลี่ยน้อยที่สุด โดยกลุ่มเป้าหมายเห็นไปในทิศทางเดียวกันว่าบรรจุภัณฑ์ต้องมีความน่าเชื่อถือ มีฉลาก ตราสินค้า และวิธีการใช้งานอย่างชัดเจน ควรเป็นทรงกลม ส่วนขวดควรเป็นภาพวาด ภาพประกอบสามารถเป็นได้ทั้ง 2 รูปแบบ วัสดุด้านในอาจมีกระดาษห่อหุ้มเพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ส่วนโถนสีควรเป็นโถนอ่อน และวัสดุภายนอกควรทำมาจากกระดาษ

2) รูปแบบที่ 2 กลุ่มเป้าหมายมุ่งเน้นไปด้านความน่าสนใจของตัวบรรจุภัณฑ์ รูปทรงสามารถเป็นได้ทั้งทรงกลมหรือสี่เหลี่ยมก็ได้ ส่วนขวดควรเป็นภาพวาด ภาพประกอบเป็นภาพจริง วัสดุด้านในอาจใช้กระดาษหรือฟอยด์ในการห่อหุ้มเพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ก็ได้ ส่วนโถนสีควรเป็นโถนอ่อน และวัสดุภายนอกควรทำมาจากกระดาษ

3) รูปแบบที่ 3 กลุ่มเป้าหมายมุ่งเน้นไปด้านผิวสัมผัสของตัวบรรจุภัณฑ์ และความน่าสนใจ ควรมีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยม ส่วนขวดและภาพประกอบสามารถเป็นได้ทั้งภาพวาดและภาพจริง วัสดุด้านในควรใช้ฟอยด์ในการห่อหุ้มเพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ส่วนโถนสีควรเป็นโถนอ่อน และวัสดุภายนอกควรทำมาจากกระดาษ

4) รูปแบบที่ 4 เป็นรูปแบบที่ได้รับคะแนนเฉลี่ยมากที่สุด กลุ่มเป้าหมายมุ่งเน้นไปที่ผิวสัมผัส และผลิตภัณฑ์ควรมีความน่าเชื่อถือ ต้องมีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมขวดและภาพประกอบสามารถเป็นได้ทั้งภาพวาดและภาพจริง ส่วนวัสดุภายในสามารถเป็นได้ทั้งฟอยด์หรือกระดาษ โถนสีควรเป็นสีเข้ม ส่วนวัสดุภายนอกควรทำมาจากกระดาษ

5) รูปแบบที่ 5 เป็นรูปแบบที่ได้รับคะแนนเฉลี่ยน้อยที่สุดรองลงมาจากรูปแบบที่ 1 แต่ไม่มีกลุ่มคำไหนมีค่า  $MCC^2$  มากกว่าร้อยละ 50 จึงไม่สามารถระบุได้ว่าการมุ่งเน้นไปในทิศทางใด แต่สามารถระบุคุณลักษณะทางกายภาพได้โดย บรรจุภัณฑ์ต้องมีลักษณะเป็นทรงกลม ขวดควรเป็นภาพวาด ส่วนภาพประกอบควรเป็นภาพจริง วัสดุภายในสามารถเป็นได้ทั้งฟอยด์หรือกระดาษ โถนสีควรเป็นสีอ่อน และวัสดุภายนอกควรทำมาจากกระดาษเช่นเดียวกันกับทั้ง 5 รูปแบบ

จากผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์มะขามอัด ก้อนรูปแบบใหม่เพื่อให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมาย ควรเลือกรูปแบบที่ 4 โดยกำหนดให้ผลิตภัณฑ์เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมคล้ายกับรูปทรงต้นแบบ ใช้ฟอยด์ในการห่อหุ้มผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายใน เพื่อให้ลูกค้าเชื่อมั่นในด้านความสะอาด ส่วนบรรจุภัณฑ์ด้านนอกใช้วัสดุจากกระดาษ มีรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีโถนสีเข้มที่มีการตกแต่งขวดเป็นภาพวาด ส่วนภาพประกอบอาหารควรใช้ภาพจริง เพื่อทำหน้าที่ในการห่อหุ้มไม่ให้ผลิตภัณฑ์ได้รับแรงกระแทกจากภายนอก ซึ่งผลลัพธ์จากการนำข้อมูลดังกล่าวมาออกแบบสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์คุณลักษณะสำคัญของตัวแทนผลิตภัณฑ์ของกลุ่มเพชรน้ำพุ

#### 4.4 ผลการประเมินความพึงพอใจ

หลังจากการดำเนินการพัฒนารูปแบบบรรจุภัณฑ์มะขามก๊อมนโดยใช้เทคนิควิศวกรรมคั่นเซ ขึ้นตอนต่อไปคือการประเมินความพึงพอใจของกลุ่มผู้บริโภค ซึ่งเป็นกลุ่มเป้าหมายเดิมที่มีอายุมากกว่า 40 ปีที่เป็นผู้ประกอบการร้านค้า ร้านอาหาร ในจังหวัดเพชรบูรณ์มาเป็นผู้ประเมินจำนวน 15 คน โดยแบ่งการประเมินออกเป็น 4 ด้าน ประกอบด้วย ด้านการป้องกันผลิตภัณฑ์ ด้านความเหมาะสมของขนาดโครงสร้าง ความสะดวกในการใช้งาน และด้านการส่งเสริมการจำหน่าย (ธัญญา และคณะ, 2555)

ตารางที่ 11 ผลลัพธ์การประเมิน ความพึงพอใจของกลุ่มผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

| หัวข้อการประเมิน                | คะแนนเฉลี่ย | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|---------------------------------|-------------|---------------------|
| ด้านการป้องกันผลิตภัณฑ์         | 4.18        | 0.13                |
| ด้านความเหมาะสมของขนาดโครงสร้าง | 4.19        | 0.05                |
| ความสะดวกในการใช้งาน            | 4.31        | 0.03                |
| ด้านการส่งเสริมการจำหน่าย       | 4.48        | 0.01                |

ซึ่งพบว่าคะแนนในภาพรวมมีคะแนนประเมินเฉลี่ยอยู่ที่ 4.30 อยู่ในระดับดี และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหัวข้อค่อนข้างต่ำ ดังตารางที่ 11 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้เทคนิควิศวกรรมคั่นเซในการออกแบบบรรจุภัณฑ์สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายได้เป็นอย่างดี

## 5. สรุปผล อภิปรายผล

### 5.1 สรุปผล

ผลลัพธ์จากการใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซ ในการออกแบบและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์มะขามอัดก้อนให้ตรงกับความต้องการของกลุ่มอายุระหว่าง 35 – 50 ปี ที่ต้องประกอบอาหาร หรือมีความเกี่ยวข้องกับการประกอบอาหาร รวมถึงเกี่ยวข้องกับการทำธุรกิจอาหาร จากการสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อกำหนดให้เป็นรูปแบบทางกายภาพของรูปแบบบรรจุภัณฑ์ สามารถสรุปได้ว่าควรเลือกรูปแบบที่ 4 เป็นต้นในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากมีค่าคะแนนเฉลี่ยสูงสุด และเมื่อพิจารณาจากค่า  $MCC^2$  พบว่ามีค่าเฉลี่ยสูงสุดใน 5 รูปแบบ

### 5.2 อภิปรายผล

ผลจากงานวิจัยแสดงให้เห็น คุณลักษณะสำคัญของตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่สามารถอธิบายความเชื่อมั่นว่าสินค้าจะเป็นที่นิยมในกลุ่มเป้าหมายทั้งในทางลบและทางบวกที่กลุ่มเป้าหมายส่วนใหญ่มีความคิดเห็นไปในทิศทางเดียวกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Jiao & Qu, 2019) โดยรูปแบบที่ประชากรส่วนใหญ่ให้ทิศทางเชิงบวกต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์คือ กำหนดให้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมคล้ายกับรูปทรงต้นแบบ ใช้ฟอยต์ในการห่อหุ้มผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายใน เพื่อให้ลูกค้าเชื่อมั่นในด้านความสะอาด ส่วนบรรจุภัณฑ์ด้านนอกใช้วัสดุจากกระดาษ มีรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีโทนสีเข้มที่มีการตกแต่งลวดลายเป็นภาพวาด ส่วนภาพประกอบเป็นรูปอาหารใช้ภาพจริง เพื่อทำหน้าที่ในการห่อหุ้มไม่ให้ผลิตภัณฑ์ได้รับแรงกระแทกจากภายนอก ซึ่งหลังจากได้ผลิตภัณฑ์ต้นแบบแล้ว คณะผู้วิจัยได้นำไปประเมินความพึงพอใจโดยกลุ่มเป้าหมาย ซึ่งพบว่าผลการประเมินความพึงพอใจพบว่าอยู่ในระดับดี โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.25 จึงสามารถอนุมานได้ว่าวิศวกรรมคันเซสามารถตีความความรู้สึกของผู้ใช้เพื่อใช้เป็นตัวแปรหรือพารามิเตอร์ในการออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อเชื่อมโยงกับผู้บริโภคผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี (Nagamachi, 2011) ยิ่งไปกว่านั้นยังแสดงถึงการบูรณาการด้านวิศวกรรมและการออกแบบภายใต้กรอบวิศวกรรมคันเซ ที่มีการทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ

## 6. ข้อเสนอแนะ

6.1 จากการศึกษาในครั้งนี้ทำให้ทราบว่า ข้อคำถามจำนวนมากจำเป็นต้องใช้เวลานานในการให้ข้อมูล ผู้ให้ข้อมูลอาจเกิดความเมื่อยล้าในระหว่างการตอบแบบสอบถาม ซึ่งอาจส่งผลต่อความเที่ยงตรงของผลลัพธ์ ดังนั้นขั้นตอนการกำหนดขอบเขตคุณลักษณะให้ชัดเจนจึงเป็นเรื่องที่สำคัญมาก ลดความซับซ้อนของขั้นตอนลง

6.2 หากนำวิธีการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) หรือ เหมืองข้อมูล (Data mining) ในขั้นตอนการลดจำนวนรูปแบบหรือคุณลักษณะที่ไม่สำคัญเหล่านั้นลง นอกจากจะสามารถ

ลดความขั้นตอนและความซับซ้อนในการดำเนินงานวิจัยแล้ว ยังสามารถลดเวลาการตอบแบบสอบถามของผู้ให้ข้อมูลอีกด้วย

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก งบประมาณอุดหนุนทุนวิจัย งบประมาณรายได้ประจำปี 2562 ประเภททุนอุดหนุนงานวิจัย งบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกว.) ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 สัญญาเลขที่ PCRU\_2562\_TSRI013 สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

## 8. เอกสารอ้างอิง

- กุศล พิมานันธุ์ศรี. (2554). การประยุกต์วิศวกรรมคั่นเซเพื่อการประเมินการรับรู้ของผู้บริโภคต่อแบบผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์: กรณีศึกษาการออกแบบเฟอร์นิเจอร์ตู้เสื้อผ้า. (รายงานผลการวิจัย). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.
- จินดา พัฒนวิทย์. (2562). ความพึงพอใจต่อรูปแบบบรรจุภัณฑ์ชาใบชูลู่ กลุ่มชุมชนท่าเมรุ ตำบลบางกล้า อำเภอบางกล้า จังหวัดสงขลา. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ, 13(2), 189-204.
- ฉันทยาภรณ์ คำจตุ, พิเชษฐ์ พรหมใหม่ และสุริยา นิตยมี. (2562, กรกฎาคม). ความพึงพอใจต่อรูปแบบบรรจุภัณฑ์ชาใบชูลู่ กลุ่มชุมชนท่าเมรุ ตำบลบางกล้า อำเภอบางกล้า จังหวัดสงขลา. การประชุมหาญใหญ่วิชาการระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 10. มหาวิทยาลัยหาญใหญ่, สงขลา.
- นพดล ศรีพันธุ์, เฉลิมศักดิ์ ตุ่มหิรัญ, จินดา ขลิบทอง และภูมิศักดิ์ ราศรี. (2565). โมเดลการส่งเสริมการผลิตมะขามเปรี้ยวเชิงธุรกิจ. วารสารการพยาบาลมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 38(3), 23-35.
- นพรัตน์ คุ่มพงษ์ และชมพูพูน เกษมเศรษฐ์. (2555, ตุลาคม). กรอบแนวคิดการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคั่นเซในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร: กรณีศึกษาข้าวพาร์บอยล์. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม. ชะอำ, เพชรบุรี.
- ศิริชัย ยศวังใจ. (2553). การประยุกต์ใช้วิศวกรรมคั่นเซในการออกแบบผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.
- สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครซิดนีย์. (2562). มะขามรสชาติมาแรงในปีหน้า. ค้นจาก <https://www.ditp.go.th/post/157060>
- สิทธิศักดิ์ ธัญศรีสวัสดิ์กุล. (2559). การออกแบบขวด. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

- อุดมศักดิ์ สาริบุตร. (2550). **การออกแบบเฟอร์นิเจอร์**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- Fatchurrohman, N., Yetrina, M., Muhida, R., & Hidayat, A. (2020). Product Development using Kansei Engineering to Re-design New Food Packaging. **Jurnal Teknologi**, 12(1), 8-13. DOI: <https://doi.org/10.35134/jitekin.v12i1.60>
- Ghiffari, M., Djatna, T., & Yuliasih, I. (2018). Kansei Engineering Modelling for Packaging Design Chocolate Bar. **Sustainable Environment Agricultural Science**, 2(1), 10-17. DOI: 10.22225/seas.2.1.539.10-17
- Hsu, S.H., Chuang, M.C., & Chang, C.C. (2000). A semantic differential study of designers' and users' product form perception. **International Journal of Industrial Ergonomics**, 25(4), 375-391. DOI: 10.1016/S0169-8141(99)00046-X
- Jiao, Y., & Qu, W. (2019). A proposal for Kansei knowledge extraction method based on natural language processing technology and online product reviews. **Computers in Industry**, 108, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.02.011>
- Nagamachi, M. (1999). Kansei Engineering and its Applications in Automotive Design. **SAE Technical Papers**, 108(6), 2275-2282.
- Nagamachi, M. (2011). **Kansei/Affective Engineering** (1<sup>st</sup> ed). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Osgood, C.E., Suci, G.J., & Tannenbaum, P.H. (1957). **The measurement of meaning**. United States: University of Illinois Press.
- Prastawa, H., & Mahachandra, M. (2021). Kansei engineering application in redesigning Carica packaging to support local-small industry in Central Java. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 1072(1), 012060. DOI: 10.1088/1757-899X/1072/1/012060
- Schütte, S., & Eklund, J. (2005). Design of rocker switches for work-vehicles – an application of Kansei Engineering. **Applied Ergonomics**, 36(5), 557-567.
- Smith, A., & Jones, B. (2023). Application of Kansei Engineering to Capture Consumer Demand for Cooking Oil Product Packaging. **Journal of Food Packaging Science**, 5(2), 12-21. DOI: <https://doi.org/10.33005/ijeise.v4i1.113>

## การวิเคราะห์พลังงานของระบบการอบลมร้อนสำหรับมันสำปะหลังทอด

### ENERGY ANALYSIS OF HOT AIR DRYING SYSTEM FOR FRIED CASSAVA CHIPS

ฐานวิทย์ แนนไส\*, อธิโรจน์ มะโน, สหพงศ์ สมวงศ์, วรพงศ์ บุญช่วยแทน

Thanwit Naemsai\*, Athirot Mano, Sahapong Somwong, Worapong Boonchouytan

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อ.เมือง จ.สงขลา ประเทศไทย 90000

Faculty of engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla, Thailand, 90000

\*Corresponding author e-mail: Thanwit.n@rmuts.ac.th

วันที่ได้รับระบบ 28 กุมภาพันธ์ 2567

วันที่แก้ไขบทความ 9 กรกฎาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 15 กรกฎาคม 2567

#### บทคัดย่อ

กระบวนการบรรจุขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดแบบดั้งเดิมสำหรับส่งขายต้องใช้เวลาถึงประมาณ 12 h ในการดูดซับน้ำมันหลังจากการทอด แนวทางการอบลมร้อนจึงมีความน่าสนใจในการนำมาใช้ไล่น้ำมันเพื่อลดเวลาและเพิ่มผลผลิต ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบค่าอุณหภูมิการอบแห้งที่มีต่อค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดด้วยเครื่องอบแห้งแบบใช้เตาแก๊สอินฟราเรด นอกจากนี้ยังหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการประหยัดพลังงานของกระบวนการอบแห้งขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดเช่นกัน เครื่องอบแห้งประกอบด้วย ห้องอบแห้งรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $120 \times 120 \times 120$  cm สำหรับบรรจุขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดได้ 5 kg พัดลมระบายอากาศ ขนาด 22.86 cm และเตาแก๊สอินฟราเรด ในการทดลองจะปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในการอบแห้ง 3 ค่าได้แก่ 50 60 และ 70 °C โดยทุกกรณีใช้เวลาในการอบแห้ง 2 h จากการทดลองพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งห้องมีความสม่ำเสมอและผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างด้านบนและด้านล่างของเครื่องอบแห้งมีค่าเพียง 1.3 °C เมื่อวิเคราะห์ทางด้านพลังงานพบว่าค่าความสิ้นเปลืองจำเพาะของกรณีที่มีค่าอุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C มีค่า 351 282 และ 323 kW/kg ตามลำดับ ดังนั้นค่าอุณหภูมิอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดคือ 60 °C และให้ค่าระยะเวลาคืนทุนเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมประมาณ 3 month

**คำสำคัญ:** พลังงาน, ลมร้อน, อบแห้ง, มันสำปะหลังทอด

### Abstract

The conventional method of packaging fried cassava chips before shipping takes about 12 hours for oil absorption in fried foods; therefore, the hot air-drying system to remove excess oil is interesting for time reduction with an increase in productivity. The aim is therefore to experimentally investigate the effect of the drying temperature on the energy consumption when drying the fried cassava chips using the dryer with an infrared oven. In addition, the appropriate energy-saving condition when drying the fried cassava chips was also determined. The dryer consisted of a cubic drying chamber measuring 120 x 120 x 120 cm to hold the 5 kg of fried cassava chips, a fan with a diameter of 22.86 cm, and an infrared burner. The drying temperature was examined at three different experimental values, for example, 50, 60, and 70 °C. The drying time in all cases was controlled to be less than two hours. According to the experimental results, the temperature distribution in the drying chamber was consistent, and the temperature difference between the top and bottom of the chamber was only 1.3 °C. For the energy analysis, it was found that the specific consumption for the drying temperatures of 50, 60, and 70 °C was 450, 256, and 352 kW/kg, respectively. Therefore, the appropriate drying temperature was 60 °C, and the payback time compared to the traditional method was about three months.

**Keywords:** Energy, Hot air, Drying, Fried cassava chips

### 1. บทนำ

กระบวนการทำขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดที่ผลิตโดยกลุ่มแม่บ้านหมู่ที่ 8 บ้านเขากลอยตก ตำบลท่าข้าม อำเภอกาฬสินธุ์ จังหวัดสกลนคร ภายใต้โครงการแนวทางการช่วยเหลือเกษตรกร และคนยากจนตามมาตรการเร่งด่วนในการแก้ไขเสริมสร้างความเข้มแข็งอย่างยั่งยืนนั้น พบปัญหาหลักที่ส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อุปทานของกระบวนการทำขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดนั้นคือ ขั้นตอนการไล่น้ำมันออกจากผลิตภัณฑ์ขนมแผ่นมันสำปะหลังทอด ซึ่งปัจจุบันชาวบ้านใช้วิธีการนำขนมบรรจุใส่ปิ๊บไว้เป็นเวลาค่าเฉลี่ยประมาณ 12 h จึงจะสามารถนำมาบรรจุใส่แพ็คเกจขายได้ซึ่งนิยามว่าเป็นวิธีการผลิตแบบดั้งเดิม ทำให้ขนมไม่สามารถนำจำหน่ายได้ทันเวลาที่โดยเฉพาะในกรณีที่มียอดจำหน่ายสั่งซื้อในปริมาณมาก กระบวนการบรรจุใส่แพ็คเกจนั้นทำให้มีความล่าช้าเพราะต้องรอเวลาเพื่อให้ขนมแห้งเสี้น้ำมันดีก่อน เพราะน้ำมันจากการทอดนั้นอาจจะทำให้ขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดเก็บรักษาไว้ได้ไม่นานเนื่องจากอาจจะมีกลิ่นเหม็นหืนของน้ำมันจากการทอดขนมตกค้างอยู่ แนวทางใน

การแก้ไขคือ การใช้กระบวนการอบลมร้อน (Sabarez, 2021; Zielinska *et al.*, 2019) เพื่อลดระยะเวลาในขั้นตอนการเสเด้น้ำมันในแต่ละครั้งของการผลิตให้น้อยลง สำหรับกระบวนการอบผลิตภัณฑ์อาหารด้วยลมร้อนโดยส่วนใหญ่เป็นการไล่น้ำออกจากตัวผลิตภัณฑ์ซึ่งบางครั้งจะเรียกว่ากระบวนการอบแห้ง (Drying process) ซึ่งมีงานวิจัยที่นำมาใช้กับผลิตภัณฑ์อาหาร ดังนี้ Debowski *et al.* (2021) ได้เปรียบเทียบการใช้พลังงานของเครื่องอบเมล็ดพืชแบบต่อเนื่องสองชนิดที่ใช้แก๊สหุงต้ม และถ่านหินอัด โดยใช้แนวทางที่ครอบคลุมในการคำนวณประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เสริมด้วยการใช้ไฟฟ้า การวัดการไหล และการควบคุมความชื้นของเมล็ดพืช วิธีนี้อาจมีประโยชน์สำหรับผู้ผลิตที่สามารถใช้ข้อมูลนี้เพื่อสร้างข้อมูลเชื่อถือได้มากขึ้นในแผ่นข้อมูลผลิตภัณฑ์ของตน และยังสามารถควบคุมด้วยกฎหมายให้เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณการใช้พลังงานของเครื่องอบเมล็ดพืชภาคเกษตรกรรม ตามแนวทางที่นำเสนอในบทความนี้การใช้แก๊สหุงต้มลดลง 6.14% เมื่อเทียบกับเครื่องอบที่ใช้ถ่านหิน Masud *et al.* (2020) ได้พัฒนาระบบอบร้อนโดยอาศัยความร้อนทิ้งมาใช้ในการอบอาหารแบบสัมผัสโดยอ้อมใช้ในการอบมันฝรั่งแผ่น ฟักทองแผ่น แอปเปิ้ลแผ่น แครอทแผ่นและหัวไชเท้าแผ่น ซึ่งควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 60 °C ผลที่ได้พบว่าความร้อนทิ้งสามารถนำมาใช้เป็นพลังทดแทนในกระบวนการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่อมามีการพัฒนาระบบดังกล่าวในเชิงของการใช้แรงดันของ CO<sub>2</sub> ที่สูงแทนการเพิ่มค่าอุณหภูมิในการอบแห้งแผ่นแอปเปิ้ล ระบบอบแห้งดังกล่าวนี้เรียกว่า (Vacuum drying) (Yuan *et al.*, 2020) ซึ่งมีงานวิจัยที่ใช้ระบบแบบเดียวกันนี้ในการอบแห้งมันฝรั่งทอด (Liu *et al.*, 2020) ซึ่งสามารถลดเวลามากกว่า 50% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบลมร้อน ถึงกระนั้นค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะยังมีค่าที่สูง เมื่อพิจารณาในแง่เวลาอบแห้งสำหรับกรณีที่มีปริมาณอาหารมีไม่มากและมีค่าความหนาแน่นที่น้อยจะนิยมใช้กระบวนการอบแห้งอาหารด้วยระบบคลื่นไมโครเวฟ (Zielinska *et al.*, 2019; Duan *et al.*, 2020) และมีการพัฒนาต่อยอดใช้ออบอาหารที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นก็คือระบบอบแห้งอาหารด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonics) ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การสั่นของโมเลกุลภายในแทนที่การกระตุ้นจากพลังงานความร้อนจากภายนอกนั่นเอง ข้อดีของระบบนี้คือประเด็นด้านสีและการสูญเสียคุณค่าทางอาหาร (Huang *et al.*, 2020) ต่อมามีการนำประเด็นด้านการวิเคราะห์ทางด้านพลังงานซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากมารายงานในงานวิจัยของ Menon *et al.* (2020) ได้ใช้ค่าประสิทธิภาพการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการพิจารณาระบบอบแห้งในแต่ละรูปแบบ ผลที่ได้บ่งบอกได้ว่าระบบลมร้อนเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความชื้นสูง นอกเหนือจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ Nainggolan *et al.* (2024) ได้สรุปแนวทางการแปรรูปห้วมันสำปะหลังโดยเน้นถึงความสำคัญของการเก็บรักษาและการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์เนื่องจากห้วมันสำปะหลังมีความชื้นสูงและเน่าเสียง่าย กระบวนการก่อนการอบแห้ง การอบแห้ง และหลังการอบแห้งมีบทบาทสำคัญในการรักษาคุณภาพและการใช้งานของผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง ซึ่งระบบอบแห้งโดยใช้เชื้อเพลิง LPG ยังคงมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงที่สุด เร็ว ๆ นี้มีการศึกษาถึง

การทำให้แห้งของแผ่นมันสำปะหลังแบบหนา โดยมีการประเมินถึงค่าอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านผลิตภัณฑ์ ซึ่งพบว่าค่าอุณหภูมิที่ให้ความประสิทธิภาพทางความร้อนที่ดีที่สุดคือ  $90^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลา 180 นาที (3 ชั่วโมง) ด้วยการไหลของ  $133\text{m}^3/\text{s}$  ประสิทธิภาพของกลไกการแห้งและอุปกรณ์วัดการไหลมีค่า 70% และ 65% ตามลำดับ ตัวอย่างที่แห้งด้วยเครื่องวัดการไหลยังคงรักษาสีขาวของตัวเอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีการเจริญเติบโตของเชื้อรา (Ashaolu *et al.*, 2024)

จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาการวิเคราะห์ทางด้านพลังงานเป็นสิ่งสำคัญในการนำมาใช้วัดระบบการอบแห้ง และเมื่อพิจารณาถึงการใช้ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการอบแห้งแผ่นมันสำปะหลังทอดนั้นยังไม่มีมีการรายงานถึงเรื่องนี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของค่าอุณหภูมิการอบแห้งที่มีต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ หลังจากนั้นนำค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมไปใช้ในการวิเคราะห์หาระยะคืนทุนโดยเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม โดยระบบการอบแห้งที่ใช้จะเป็นเครื่องอบแห้งระบบลมร้อนอาศัยพลังงานความร้อนจากแก๊สอินฟราเรดเนื่องจากต้องการให้ระบบสอดคล้องกับแหล่งพลังงานเดิมของกระบวนการทอด ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในครั้งนี้ พร้อมทั้งประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อเป็นแนวทางให้กลุ่มผู้ผลิตแผ่นมันสำปะหลังทอดได้นำความรู้ไปใช้ในการประหยัดพลังงานในขั้นตอนการผลิตต่อไป

## 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาเงื่อนไขค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบไล่ไอน้ำมันสำปะหลังทอด

2.2 เพื่อวิเคราะห์วิเคราะห์พลังงานและเศรษฐศาสตร์ของระบบการอบลมร้อนสำหรับมันสำปะหลังทอด

## 3. วิธีดำเนินงานวิจัย

### 3.1 วัตถุดิบ

มันสำปะหลังทอดทอดที่ใช้ในงานวิจัยมาจากกลุ่มแม่บ้านหมู่ที่ 8 บ้านเขากลอยตก ตำบลท่าข้าม อำเภอบางใหญ่ จังหวัดสงขลา มีความหนาประมาณ 1.5 mm โดยแผ่นมันสำปะหลังแผ่นมีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 100 (%d.b.) และอบจนกระทั่งตัวอย่างเหลือความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 25 (%d.b.) ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายวิเคราะห์ตามวิธี AOAC (1995) 934.06 (Association of official analytical chemists official, 1995) การอบแห้งตัวอย่างแต่ละครั้งใช้ปริมาณ 5 kg สำหรับอัตราส่วนความชื้นฐานแห้งของแผ่นมันสำปะหลังทอด (Moisture content; MC) หาได้จากสมการที่ (1) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงแนวโน้มการแห้งตัวของ การอบแห้งแผ่นมันสำปะหลังทอดในแต่ละกรณีศึกษา

$$MC = \frac{M_w}{M_d} \times 100 \quad (1)$$

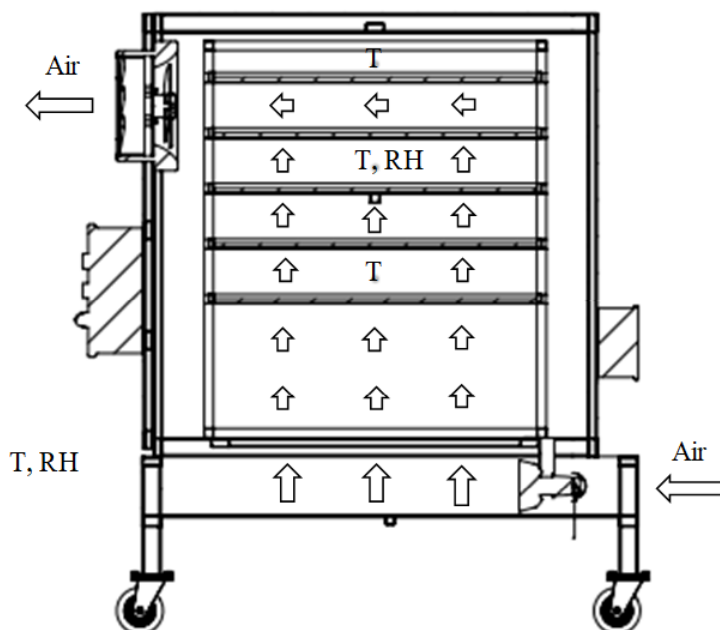
โดยที่  $M_w$  คือ มวลของน้ำในปริมาตรที่พิจารณา (kg) และ  $M_d$  คือ มวลของของแข็งในปริมาตรที่พิจารณา (kg)

### 3.2 การติดตั้งการทดลอง

การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบใช้เตาแก๊สอินฟราเรด ตัวเครื่องต้องใช้เตาแก๊สอินฟราเรด รวบรวมแก๊สที่ต้มเป็นตัวให้ความร้อน ในการอบขนมแผ่นมันสำปะหลังทอด โดยใช้พัดลมดูดอากาศเป็นตัวหมุนเวียนอากาศภายในเครื่องอบแห้ง เนื่องจากเครื่องอบแห้งต้องใช้พลังงานความร้อนจากแก๊สที่ต้มร่วมกับเตาแก๊สอินฟราเรด รุ่น Infrared burner K-1602 เครื่องอบแห้งมีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด  $120 \times 120 \times 120$  cm สำหรับบรรจุมันสำปะหลังทอดทอดได้ 5 kg ผนังเครื่องอบจะใช้แผ่นอะลูมิเนียมพร้อมหุ้มฉนวนกันความร้อน มีความหนา 75 mm ซึ่งแสดงดังภาพที่ 1 ภายในตู้อบจะมีการสร้างแผ่นกันอากาศร้อนที่เจาะรู เพื่อให้อากาศนำความร้อนจากหัวเผามาไหลผ่านไปยังห้องอบแห้งและระบายความชื้นของผลิตภัณฑ์ออกทางด้านบนด้วยพัดลมดูดอากาศที่มีขนาด 22.86 cm ซึ่งวัดค่าความเร็วลมได้ค่าประมาณ 4 m/s ดังแสดงดังภาพที่ 2 ในการจัดระบบเผาไหม้นั้นจะใช้ตัวควบคุมแก๊สอินฟราเรดเปิด-ปิด ชุดโซลินอยล์จะอยู่ด้านล่างตู้อบแห้งเป็นตัวควบคุมระบบ และถังแก๊สจะติดตั้งอยู่ด้านหลังของตู้อบแห้ง



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งเตาแก๊สอินฟราเรด



ภาพที่ 2 ลักษณะการไหลของอากาศร้อนผ่านแผ่นมันสำปะหลังทอด

ค่าความไม่แน่นอนของการทดลองนี้ประกอบด้วย 1) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งต่อกับชุดเก็บข้อมูล รุ่น Yokogawa Fx100 ซึ่งให้ค่าความคลื่อนในการวัดคือ  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  2) ค่าความชื้นสัมพัทธ์จะใช้เซ็นเซอร์รุ่น Primus HM005 ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 1\%\text{RH}$  3) การชั่งน้ำหนักของขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดจะใช้เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลยี่ห้อ Ohaus รุ่น R21PE30 (Ranger 2000) พิกัด 0-30 kg ซึ่งมีค่าอยู่ที่  $\pm 2\%\text{kg}$

ขั้นตอนการทดลองของการศึกษาค่าผลกระทบของค่าอุณหภูมิที่มีต่อค่าสมรรถนะทางพลังงาน มีดังนี้ 1) นำเครื่องอบแห้งไว้ในพื้นที่ที่จัดเตรียมไว้ ติดตั้งชุดเซ็นเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ในเครื่องอบแห้ง โดยนำเซ็นเซอร์วัดความชื้นวางไว้ในตำแหน่งตรงกลางของถาดที่ 3 และอีกตัวอยู่ข้างนอกเครื่องอบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 2 2) ติดตั้งอุปกรณ์บันทึกค่าอุณหภูมิติดตั้งอุปกรณ์บันทึกค่าอุณหภูมิ นำขนมทั้งหมดมาชั่งน้ำหนักก่อนเข้าเครื่องอบจำนวน 5 กิโลกรัม 3) นำกระดาษซับมันและขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดจัดเรียงลงในถาดอะลูมิเนียมทั้งหมด 5 ชั้นโดยเว้นช่องว่างตรงกลางเพื่อให้เกิดการไหลผ่านของอากาศในแต่ละชั้นและให้เกิดการไหลเวียนของอากาศครอบคลุมทั้งห้องอบแห้ง 4) เริ่มทำการทดลองใช้แก๊สอินฟราเรดในการควบคุมอุณหภูมิห้องอบ ในการทดลองจะปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในการอบแห้ง 3 ค่าได้แก่ 50 60 และ 70  $^{\circ}\text{C}$  โดยทุกกรณีใช้เวลาในการอบแห้ง 3 h ตั้งแต่เวลา 9.00 ถึง 12.00 น. 5) ทำการตรวจสอบสีของขนมที่วางอยู่บนถาดว่าได้ลักษณะใกล้เคียงกับที่มี

ขายตามท้องตลาดและบันทึกช่วงเวลาที่สีใกล้เคียงกันของแต่ละค่าอุณหภูมิทุกการทดลองจะต้องทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ซ้ำ เพื่อความแม่นยำทางด้านสถิติ

สำหรับการประเมินทางคุณภาพ ในงานวิจัยนี้จะใช้การทดสอบคุณภาพด้านสีของแผ่นมันสำปะหลังทอดหลังผ่านการอบแห้งวัดโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer (Hunter Lab, Color Flex, UK) และใช้ระบบสีเป็นแบบ CIE  $L^*$ ,  $a^*$  and  $b^*$  โดยค่า  $L^*$  คือ ความสว่างของวัตถุ (0 ดำ, 100 ขาว)  $a^*$  คือ ค่าสีแดง/เขียว (+ แดง, - เขียว) และค่า  $b^*$  คือ ค่าสีเหลือง/น้ำเงิน (+ เหลือง, - น้ำเงิน) ก่อนการวัดสีของตัวอย่างอบแห้งต้องสอบเทียบกับแผ่นสีมาตรฐานทั้งแผ่นสีดำและแผ่นสีขาว

### 3.3 การวิเคราะห์ทางพลังงานและเศรษฐศาสตร์

ความสิ้นเปลืองทางพลังงานเป็นสิ่งที่สะท้อนไปถึงการนำเครื่องอบแห้งไปใช้งานจริง กระบวนการวิเคราะห์ทางด้านพลังงานในงานวิจัยนี้เริ่มจากการคำนวณความชื้นในวัสดุที่ระเหยในระหว่างกระบวนการอบแห้งคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$m_{out} = m_i - m_f \quad (2)$$

โดยที่  $m_{out}$  คือ ความชื้นที่ออกจากวัสดุในระหว่างกระบวนการอบแห้ง  $m_i$  คือ มวลของวัสดุก่อนกระบวนการอบแห้ง และ  $m_f$  คือ มวลของวัสดุหลังกระบวนการอบแห้ง พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในระบบอบแห้งคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$E_t = (m_{fuel} C_{fuel})t \quad (3)$$

โดยที่  $E_t$  คือ พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในระบบอบแห้ง  $m_{fuel}$  คือ มวลเชื้อเพลิง  $C_{fuel}$  คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง และ  $t$  คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ในระบบอบแห้งต่อความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุในระหว่างกระบวนการอบแห้ง (Menon *et al.*, 2020) คำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$SEC = \frac{E_t}{m_{out}} \quad (4)$$

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เป็นสิ่งที่สำคัญในการออกแบบระบบบอบแห้ง ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระยะเวลาคืนทุน (PP) เป็นตัวชี้วัด ระยะเวลาคืนทุนจะขึ้นอยู่กับค่าใช้จ่ายในการลงทุน และผลกำไรซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (5)

$$PP = \frac{CC}{PR} \quad (5)$$

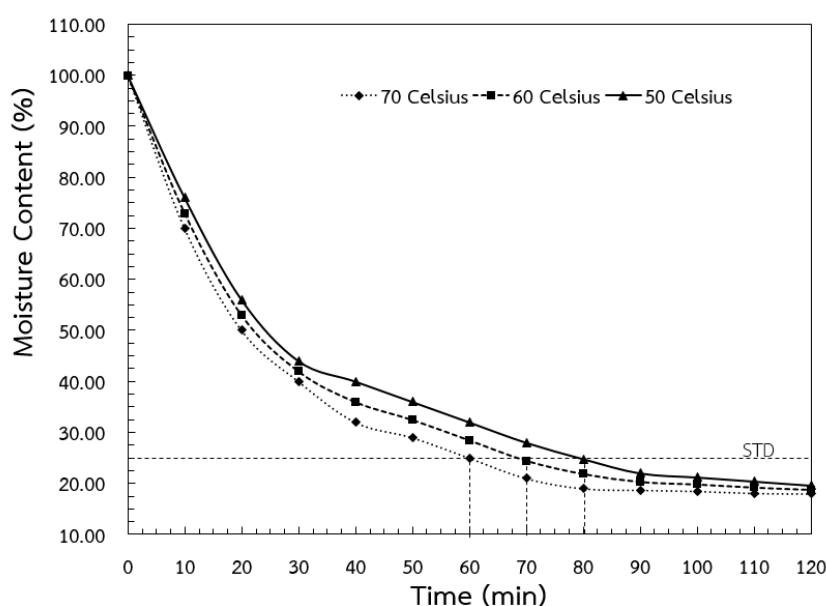
โดยที่ CC คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนซึ่งประกอบไปด้วย ค่าวัสดุและค่าจ้างสร้าง PR คือ กำไรจากการขายสินค้าหรือผลิตภัณฑ์

#### 4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

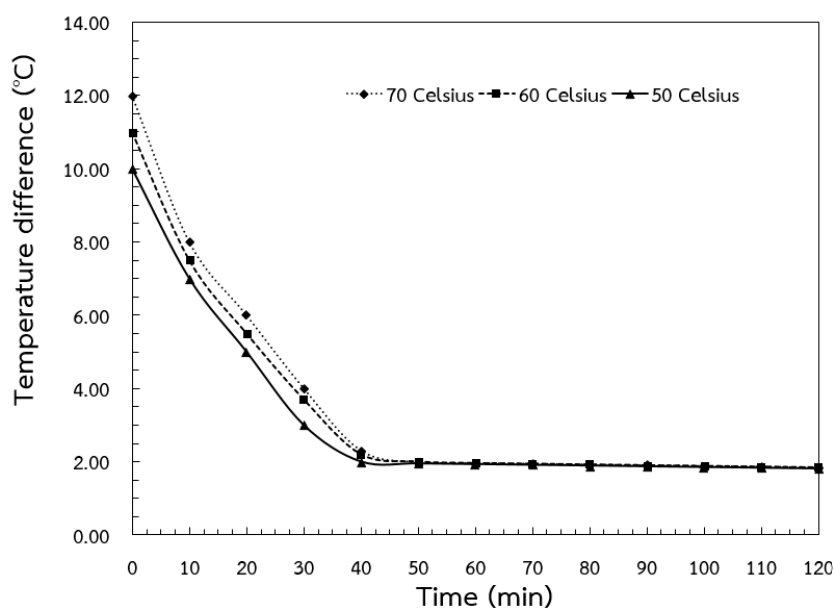
ในการวิเคราะห์ทางด้านพลังงานเริ่มจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความชื้นที่ตามเวลาการอบแห้งของแต่ละค่าอุณหภูมิควบคุมดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งผลที่ได้พบว่าค่าอัตราส่วนความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 30 min หลังจากนั้นในช่วงเวลา 40 จนถึง 90 min ค่าความชื้นของค่าอัตราส่วนความชื้น จะมีค่าลดลง และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลในช่วงหลังจาก 90 จนถึง 120 min เนื่องจากการเข้าสู่ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ (Sabarez, 2021) ผลจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความชื้นที่เข้าสู่ค่ามาตรฐานของผลิตภัณฑ์ (25 %d.b.) ตามเวลาการอบแห้ง ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงระยะเวลาในการอบแห้งของค่าอุณหภูมิควบคุม 50 60 และ 70 °C คือ 40 50 และ 60 min ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวก็สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Sabarez, 2021; Debowski *et al.* 2021; Menon *et al.* 2020) โดยงานวิจัยที่ 3 ได้บ่งบอกว่าระยะเวลาการอบแห้งจะแปรผกผันกับค่าอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามค่าอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้ลายการการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ซึ่งสามารถตรวจสอบได้การกระบวนกรวัดสีของผลิตภัณฑ์ ในประเด็นค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มค่าอัตราการอบแห้ง เหตุผลที่จะนำมาใช้อธิบายทางกายภาพสามารถศึกษาได้จาก การประเมินผลต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านบนและล่างของห้องอบแห้งในแต่ละค่าอุณหภูมิควบคุม ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4 พบว่าประเมินผลต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านบนและล่างของห้องอบแห้งจะลดลงเมื่อเวลาอบแห้งมากขึ้นเนื่องจากเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ซึ่งสภาวะคงตัวจะเริ่มที่เวลาการอบแห้ง 40 min โดยสามารถสรุปได้ว่าการกระจายตัวของค่าอุณหภูมิทั้งห้องอบแห้งนั้นจะสม่ำเสมอเมื่ออบแห้งมาจนถึง 40 min นั้นเอง โดยค่าผลต่างเฉลี่ยมากที่สุดอยู่ที่การเลือกใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 70 °C และค่าผลต่างเฉลี่ยน้อยสุดอยู่ที่อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 50 °C

เมื่อพิจารณาผลต่างของค่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างด้านทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้ง ในแต่ละค่าอุณหภูมิควบคุมจะแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งพบว่าผลต่างของค่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างด้าน

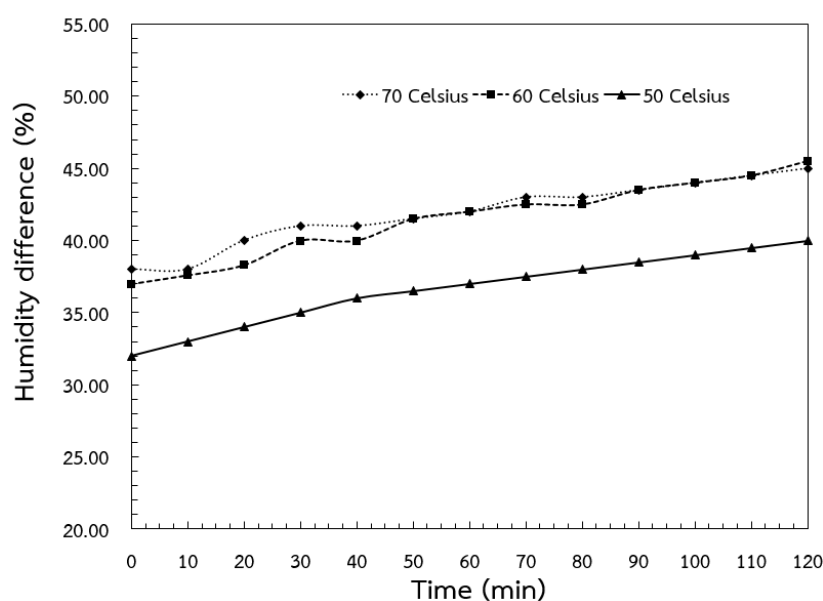
ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น มองอีกนัยหนึ่งคือ ความชื้นของน้ำมันจากแผ่นมันสำปะหลังทอดถูกนำพาออกไปโดยอากาศร้อนที่พัดผ่านพื้นผิวของขนมแผ่นมันสำปะหลังทอดนั่นเอง เมื่อผลต่างของค่าความชื้นเพิ่มขึ้นจะสะท้อนไปยังน้ำหนักของแผ่นมันสำปะหลังทอดที่กำลังลดลงเช่นกัน โดยค่าผลต่างเฉลี่ยมากที่สุดอยู่ที่การเลือกใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 70 °C และค่าผลต่างเฉลี่ยน้อยสุดอยู่ที่อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 50 °C อย่างไรก็ตามค่าผลต่างของความชื้นสัมพัทธ์ของการเลือกใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 60 °C และ 70 °C แทบจะไม่ได้ต่างกันตั้งแต่เวลาในการอบแห้ง 60 min เป็นต้นไป ซึ่งประเด็นดังกล่าวนี้ต้องมีการพิจารณาเพิ่มเติมในการหาค่าอัตราส่วนความชื้นของแผ่นมันสำปะหลังทอดและนำค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมาวิเคราะห์ระบบอบแห้ง โดยประเด็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องอบแห้งนั้นมีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบแปรผกผันตรงกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Ashaolu *et al.*, 2024) ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นจะไปนำพาให้ปริมาณน้ำมันและไอน้ำที่ผิวของผลิตภัณฑ์ออกไปสู่บรรยากาศ จึงส่งผลให้ความชื้นที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์จะเข้ามาแทนที่ตรงบริเวณผิวผลิตภัณฑ์เพื่อรักษาสมดุลทางความชื้น



ภาพที่ 3 ค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในแต่ละค่าอุณหภูมิควบคุม



ภาพที่ 4 ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านบนและล่างของห้องอบแห้งในแต่ละค่าอุณหภูมิควบคุม

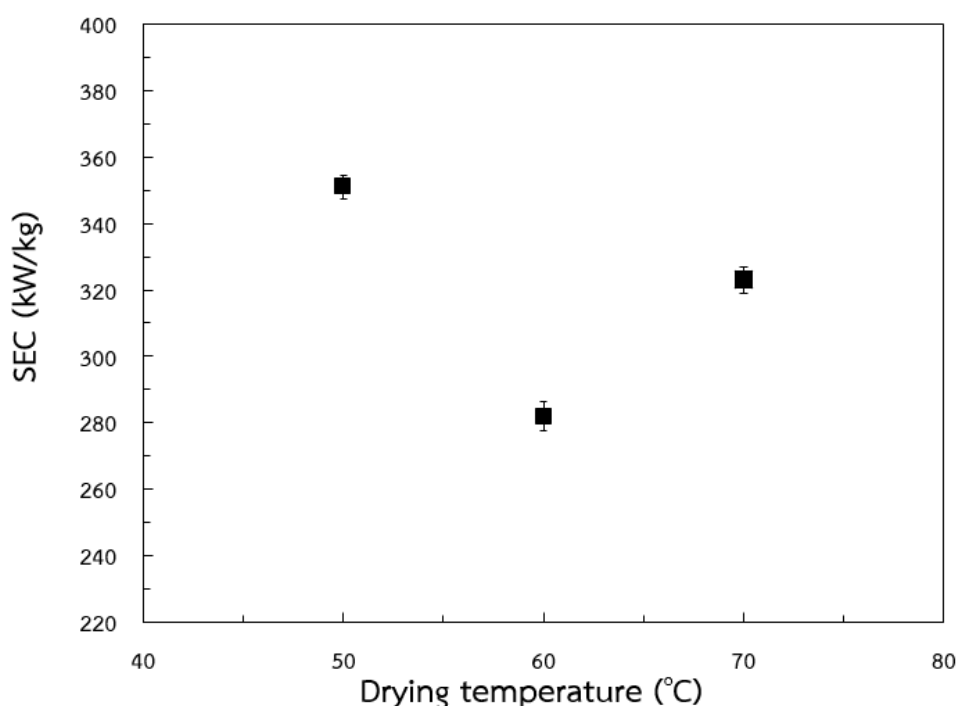


ภาพที่ 5 ผลต่างของค่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างด้านทางเข้าและทางออก  
ของห้องอบแห้งในแต่ละค่าอุณหภูมิควบคุม

ผลของค่าอุณหภูมิอบแห้งต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะแสดงดังภาพที่ 6 ซึ่งพบว่า ค่าความสิ้นเปลืองจำเพาะของกรณีที่ใช้ค่าอุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C มีค่า 351 282 และ 323 kW/kg ตามลำดับ ผลที่ได้นี้บ่งบอกให้ทราบว่า กรณีใช้อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C สามารถประหยัดพลังงาน

ได้มากที่สุด ถึงแม้ว่าในการวิเคราะห์ประเด็นการกระจายตัวสม่ำเสมอของค่าอุณหภูมิทั้งห้องและค่าความสามารถในการไล่น้ำมันออกจากแผ่นมันสำปะหลังทอดจะไม่ได้บ่งชี้ไปถึงการเลือกค่าอุณหภูมินี้ก็ตาม เหตุผลที่ค่าอุณหภูมิดังกล่าวนี้นี้สามารถให้ค่า SEC น้อยที่สุดนั้นมาจากค่า  $m_{out}$  ที่ซึ่งมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 0.10 kg ขณะที่ค่า  $m_{out}$  ของค่าอุณหภูมิมอบแห้ง 50 °C และ 70 °C มีค่า 0.05 kg และ 0.08 kg ตามลำดับ นอกจากนี้ปริมาณการใช้พลังงานจากแก๊สหุงต้มของกรณีที่ค่าอุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C มีค่า 1.2 1.5 และ 2.0 kg ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการใช้พลังงานจากแก๊สหุงต้มของค่าอุณหภูมิมอบแห้ง 60 °C มีค่าแตกต่างจากกรณีค่าอุณหภูมิมอบแห้ง 50 °C เพียงแค่ 0.3 kg

เมื่อพิจารณาค่า SEC ของการอบแห้งผลิตภัณฑ์แผ่นทางการเกษตร ของงานวิจัยที่ผ่านมา (Yuan *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020) พบว่าค่า SEC มีค่าสูงกว่าประมาณ 20 % เนื่องจาก ระบบการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เข้ามาช่วยในการอบแห้งสำหรับระบบการอบแห้งแบบผสม (Hybrid dryer) สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ อย่างไรก็ตามระยะเวลาในการอบแห้งจะมีค่าสูงกว่าของงานวิจัยนี้เช่นกัน เนื่องจากการมีเสถียรภาพและศักยภาพของการใช้พลังงานอย่างต่อเนื่องของระบบเตาแก๊สอินฟราเรดจะส่งผลต่อการเพิ่มผลผลิตและการควบคุมคุณภาพของการผลิต



ภาพที่ 6 ผลของค่าอุณหภูมิมอบแห้งต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

เมื่อพิจารณาสีของแผ่นมันสำปะหลังทอดทั้งสามค่าอุณหภูมิอบแห้งพบว่า สีของแผ่นมันสำปะหลังทอดมีความสว่าง ( $L^*$ ) อยู่ที่ 51 และมีค่าสีเขียว ( $-a^*$ ) อยู่ที่ 49 ค่าสีเหลือง ( $+b^*$ ) อยู่ที่ 48 ซึ่งมากกว่าสีแผ่นมันสำปะหลังทอดจากผลิตภัณฑ์ทางการค้าเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีค่าต่างกันเพียง 7% เนื่องจากกระบวนการอบแห้งผ่านความร้อนจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลขึ้น อย่างไรก็ตามของแผ่นมันสำปะหลังทอดทั้งสามค่าอุณหภูมิอบแห้งยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ทางวิสาหกิจชุมชนใช้ในการค้าขายดังแสดงในภาพที่ 7 ดังนั้นในการเลือกค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งจึงพิจารณาเพียงประเด็นด้านการใช้พลังงาน ซึ่งพบว่าค่าอุณหภูมิอบแห้งที่  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  มีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากประหยัดพลังงานมากที่สุด โดยให้ค่า SEC อยู่ที่  $282\text{ kW/kg}$



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 7 การเปรียบเทียบสีขนมแต่ละอุณหภูมิ: (ก)  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , (ข)  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , (ค)  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$

จากผลการวิเคราะห์ทางด้านพลังงานที่ผ่านมา ข้อมูลการอบแห้งของค่าอุณหภูมิอบแห้งที่  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะถูกนำมาทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์โดยใช้ระยะคืนทุนเป็นตัวชี้วัดและเปรียบเทียบข้อมูลกับกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมที่ใช้การบรรจุแผ่นมันสำปะหลังทอดหลังจากการทอดพร้อมกระดาษซับมันในภาชนะปิดสุญญากาศ ซึ่งต้องใช้เวลาดูดซับความชื้นถึง 12 h ผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเงื่อนไขการอบแห้งที่ค่าอุณหภูมิ  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งผลที่ได้พบว่า ระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 3 month เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขควบคุม ราคาขายแผ่นมันสำปะหลังทอด 150 THB/kg ค่าจ้างพนักงาน 300 THB /day และวันทำงาน 180 day/year อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวยังคงต้องได้รับการพิสูจน์เพิ่มเติมในของการทำงานระยะยาวต่อไป



ตารางที่ 1 ข้อมูลการรอบแท่งสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

| พารามิเตอร์                               | เครื่องอบ | ดั้งเดิม |
|-------------------------------------------|-----------|----------|
| น้ำหนักเริ่มต้นแผ่นมันสำปะหลังทอด (kg)    | 5.00      | 5.00     |
| น้ำหนักสุดท้ายแผ่นมันสำปะหลังทอด (kg)     | 2.55      | 2.55     |
| เวลาในการอบ (h)                           | 1         | 12       |
| ราคาอุปกรณ์และเครื่องมือในการอบแท่ง (THB) | 25,000    | 3,000    |
| ค่าเชื้อเพลิง (THB)                       | 60        | -        |
| ค่าซ่อมบำรุง (%)                          | 5         | -        |
| ค่าเสื่อมสภาพ (%)                         | 10        | -        |
| ระยะเวลาคืนทุน (month)                    | 3         | -        |

## 5. สรุปผล

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบค่าอุณหภูมิการอบแท่งที่มีต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เพื่อจะหาค่าอุณหภูมิอบแท่งที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานอบแท่งแผ่นมันสำปะหลังทอดในแง่ของงานด้านประหยัดพลังงาน ซึ่งในการทดลองจะทำการแปรเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ 3 ค่าได้แก่ 50, 60 และ 70 °C ซึ่งผลการทดลองบ่งชี้ถึงการหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยพิจารณาจาก ค่าอัตราส่วนความชื้น ค่าผลต่างของอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ สีของผลิตภัณฑ์ และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลที่ได้พบว่าค่าอุณหภูมิ 60 °C ให้ค่าเหมาะสมที่สุดเนื่องจากให้ผลต่างค่าความชื้นในอากาศที่สูง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดเนื่องจากสามารถไล่น้ำมันออกจากแผ่นมันสำปะหลังทอดได้สูงในขณะที่การใช้พลังงานความร้อนจากแก๊สหุงต้มน้อย หลังจากนั้นนำผลการทดลองนี้ไปเปรียบเทียบกับกระบวนการไล่น้ำมันแบบดั้งเดิม ซึ่งผลการคำนวณค่าระยะคืนทุนอยู่ที่ 3 เดือน ซึ่งแสดงถึงความคุ้มค่าในด้านการลงทุนของงานวิจัย

## 6. กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental fund; FF) ปี พ.ศ.2566 สัญญาเลขที่ FRB660020/0172 และได้รับการสนับสนุนจาก สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

## 7. เอกสารอ้างอิง

- Ashaolu, M.O., Kolapo, F., Lamidi, S., & Oluchukwu, A. (2024). Design and Performance Evaluation of an Air Flow Meter for Drying Cassava Chips. **Saudi Journal of Engineering and Technology**, 9(2), 44-50. DOI: 10.36348/sjet.2024.v09i02.003
- Association of Official Analytical Chemists Official. (1995). **Methods of Analysis of the AOAC International** (16<sup>th</sup> ed.). Gaithersburg, MD: [n.p.].
- Debowski, M., Bukowski, P., Kobel, P., Bieniek, J., Romanski, L., & Knutel, B. (2021). Comparison of Energy Consumption of Cereal Grain Dryer Powered by LPG and Hard Coal in Polish Conditions. **Energies**. 14(14), 4340. DOI: 10.3390/en14144340
- Duan, L., Duan, X., & Ren, G. (2020). Structural characteristics and texture during the microwave freeze drying process of Chinese yam chips. **Drying Technology**. 38(7), 1-12. DOI: 10.1080/07373937.2019.1600142
- Huang, D. Men, K., Li, D., Wen, T., Gong, Z., Sunden, B., & Wu, Z. (2020). Application of ultrasound technology in the drying of food products. **Ultrasonics – Sonochemistry**, 63, 104950. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.104950
- Liu, C., Grimi, N., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2020). Impacts of preliminary vacuum drying and pulsed electric field treatment on characteristics of fried potatoes. **Journal of Food Engineering**. 276, 109898. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109898
- Masud, M.H., Ananno, A.A., Ahmed, N., Dabnichki, P., & Salehin, K.N. (2020). Experimental investigation of a novel waste heat based food drying system. **Journal of Food Engineering**. 281, 110002. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110002
- Menon, A., Stojcesk, V., & Tassou, S.A. (2020). A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. **Trends in Food Science & Technology**. 100, 67–76. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.03.014
- Nainggolan, E.A., Banout, J., & Urbanova, K. Recent Trends in the Pre-Drying, Drying, and Post-Drying Processes for Cassava Tuber: A Review. **Foods**. 2024; 13(11), 1778. DOI: 10.3390/foods13111778



- Sabarez, H., (2021). Advanced Drying Technologies of Relevance in the Food Industry. **Innovative Food Processing Technologies**, 64-81. DOI: 10.1016/B978-0-08-100596-5.23042-4
- Yuan, Y., Zhao, Z., Wang, L., Xu, Y., Chen, H., Kong, L., & Wang, D. (2020). Process optimization of CO<sub>2</sub> high-pressure and low-temperature explosion puffing drying for apple chips using response surface methodology. **Drying Technology**. 40(1), 100-115. DOI: 10.1080/07373937.2020.1771361
- Zielinska, M., Ropelewska, E., Xiao, H.W., Mujumdar, A.S., & Law, C.L. (2019). Review of recent applications and research progress in hybrid and combined microwave assisted drying of food products: Quality properties. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 60(13), 1-53. DOI: 10.1080/10408398.2019.1632788

## การศึกษาสมบัติด้านวิศวกรรมของคอนกรีตบล็อกผสมเปลือกหอยนางรมบด

### A STUDY OF ENGINEERING PROPERTIES OF CONCRETE BLOCKS MIXED WITH OYSTER SHELL WASTE

ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล<sup>1</sup>, ปิยะพงศ์ กี่สวัสดิ์คอน<sup>1</sup>, อภิเสกฐ์ สุวรรณสะอาด<sup>2\*</sup>

Thaweesak Rungsaktaweekul<sup>1</sup>, Piyapong Kesawadkorn<sup>2</sup>, Apised Suwansaard<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล อ.หัวหิน

จ.ประจวบคีรีขันธ์ ประเทศไทย 77110

<sup>2</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ อ.พุทธรณีสทล จ.นครปฐม ประเทศไทย 73170

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus,  
Hua Hin, Prachuap Khiri Khan, Thailand, 77110

<sup>2</sup>Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Phutthamonthon,  
Nakhon Pathom, Thailand, 73170

\*Corresponding author e-mail: apised.suw@rmutr.ac.th

วันที่เข้ารับ 7 กุมภาพันธ์ 2567

วันที่แก้ไขบทความ 9 พฤษภาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 27 มิถุนายน 2567

#### บทคัดย่อ

การศึกษาสมบัติด้านวิศวกรรมของคอนกรีตบล็อกผสมเปลือกหอยนางรมบด โดยการนำขยะเปลือกหอยนางรมบดแทนที่หินปูนด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปคอนกรีตบล็อก ขนาด  $7 \times 19 \times 39$  เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ : หินปูนเท่ากับ 1 : 6 โดยน้ำหนัก และอายุบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอยนางรมบด 2) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของคอนกรีตบล็อกที่ใช้เปลือกหอยนางรมบดแทนที่หินปูนตาม มอก.58-2560 และ 3) ศึกษาวิเคราะห์ต้นทุนของการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงแบบไม่รับน้ำหนักที่ใช้เปลือกหอยนางรมบดแทนที่หินปูนตาม มอก.58-2560

ผลการวิจัยพบว่า 1) เปลือกหอยนางรมบด มีองค์ประกอบหลักเป็น Calcium oxide โดยมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 48.85 ซึ่งสูงเมื่อเปรียบเทียบกับหินปูนเพียงร้อยละ 1.8 เนื่องจากเปลือกหอยนางรมบดไม่ได้ผ่านกระบวนการเผาทำให้ความชื้นและปริมาณคาร์บอนอิสระในเปลือกหอยนางรมบดยังคงมีอยู่มากส่งผลให้วัสดุมีความต้องการน้ำสูงขึ้น 2) การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของหินปูนและเปลือกหอยนางรมบด มีค่าเท่ากับ 2.67 และ 2.50 และ มีค่าเท่ากับ 3.2 และ 9.3 ตามลำดับ และการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด พบว่าอัตราส่วนที่ร้อยละ 20 มีค่าต้านทานกำลังอัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 84 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่มสูงสุด 28 วัน 3) ต้นทุนของการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงแบบไม่รับน้ำหนักที่ใช้เปลือกหอยนางรมบดแทนที่หินปูนที่อัตราส่วน

ร้อยละ 20 ของการแทนที่ตาม มอก.58-2560 สามารถลดต้นทุนราคาต่อก้อนได้ถึง 0.49 บาทต่อก้อน คิดเป็นร้อยละ 9.58 ของคอนกรีตบล็อกต่อก้อน

**คำสำคัญ:** คอนกรีตบล็อก, เปลือกหอยนางรม, ค่ากำลังรับแรงอัด

### Abstract

This research paper studied the engineering properties of concrete blocks mixed with oyster shell waste by substituting the crushed oyster shell waste for rock dust at a rate of 0, 20, 40, 60, 80, and 100 percent by weight, respectively. Concrete blocks were formed in the size of 7 x 19 x 39 centimeters with a 1:6 mixing ratio of cement to rock dust by weight. The blocks were taken into study after 7, 14, and 28 days of curing periods. The objectives of this study are 1) to investigate the physical properties and chemical composition of the crunched oyster shells; 2) to study the physical and mechanical properties of the concrete blocks using crunched oyster shells substituted with rock dust in alignment with the TIS 58-2017 regulation; and 3) to study and analyze the cost of producing non-load-bearing hollow concrete blocks substituted with the oyster shell waste as per the TIS 58-2017 regulation.

The research results showed that the oyster shell waste consisted of 48.85 percent calcium oxide, a high percentage compared to only 1.8 percent of the rock dust. Since the oyster shell waste had not gone through the firing process, the moisture and free carbon content inside were still high, causing a higher water demand. The specific gravity of rock dust and oyster shell waste was 2.67 and 2.50, while the water absorption values were 3.2 and 9.3, respectively. As for compressive strength values, the concrete blocks with the 20 percent mixing rate, cured for 28 days at the maximum, had the highest compression resistance value of 84 kilograms per square centimeter. The research suggested that producing non-load-bearing hollow concrete blocks with oyster shell waste substitution at a rate of 20 percent, which is in alignment with the TIS 58-2017 regulation, can reduce the cost by 0.49 baht per block, equivalent to a 9.58 percent reduction of each concrete block.

**Keywords:** Concrete blocks, Oyster shells, Compressive strength

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันจำนวนประชากรของประเทศไทยมีปริมาณ 66 ล้านคน ทำให้มีความต้องการในการอุปโภคและบริโภคเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ประกอบกับในปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีที่ทันสมัยและสิ่งอำนวยความสะดวกในการผลิตเกิดขึ้นมากมาย ทำให้ภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมต้องมีการผลิตอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีปริมาณขยะหรือของเสียจากกระบวนการผลิตต่างๆ ทั้งที่มีอันตรายและไม่อันตรายจำนวนมาก ทำให้ต้องมีการวางแผนในการจัดการของเสียเหล่านั้น

จังหวัดประจวบคีรีขันธ์เป็นจังหวัดทางภาคใต้ฝั่งตะวันตกซึ่งเป็นสถานที่ท่องเที่ยวที่ได้รับความนิยมจากนักท่องเที่ยวทั้งชาวไทยและต่างชาติ เดินทางเข้ามาท่องเที่ยวเป็นจำนวนมาก ส่งผลต่อการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจในพื้นที่ สำหรับภาคอุตสาหกรรมอาหารทะเลที่ได้รับความนิยมต่อการบริโภคของนักท่องเที่ยวแล้ว โดยเฉพาะอาหารทะเลจำพวกหอยต่างๆ ที่นักท่องเที่ยวมีความต้องการบริโภคอย่างมาก เมื่อมีการบริโภคเสร็จจะมีเศษเปลือกหอยที่เหลือทิ้งจากร้านอาหารในอำเภอหัวหินมีปริมาณ 20 กิโลกรัม ต่อ 1 ร้านอาหารในช่วงเวลา 1 เดือนและไม่มีการกำจัดให้เป็นรูปธรรมก็จะให้เกิดเป็นของเสียและเป็นขยะรบกวนต่อชุมชนส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมได้ในระยะยาวถ้าไม่มีการกำจัดอย่างถาวร "เปลือกหอย" เป็นปัญหาขยะจากอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายมากในการกำจัด ซึ่งร้อยละ 95 ของเปลือกหอยมีสารแคลเซียมคาร์บอเนตที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลายอุตสาหกรรม ดังนั้นหากมีเทคโนโลยีที่สามารถเปลี่ยนขยะเปลือกหอยเหล่านี้ให้สร้างมูลค่าเพิ่มได้ก็นับว่าคุ้มค่าเป็นอย่างยิ่ง (ชุดิพันธ์, 2566)

ดังนั้นในภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างจึงสังเกตเห็นแล้วว่าหากนำผลผลิตทางอุตสาหกรรมอาหารมาทำให้เกิดผลประโยชน์โดยเฉพาะเปลือกหอยต่างๆ ที่เหลือทิ้งจากร้านอาหาร เพื่อที่จะลดขยะ และหมุนเวียน เพื่อสร้างประโยชน์ให้วัสดุเหลือทิ้งที่มักมีจุดจบในหลุมฝังกลบ

คอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่ใช้สำหรับการก่อสร้าง เป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศไทย นอกจากนี้คอนกรีตบล็อกยังมีราคาถูก ก่อสร้างง่าย และหาซื้อได้ง่าย อีกทั้งโครงสร้างที่ทำด้วยคอนกรีตบล็อกเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง คงทน (ดิศสกุล และกิตติพงศ์, 2562) ทั้งนี้คอนกรีตบล็อกสามารถผลิตได้โดยการนำปูนซีเมนต์และน้ำผสมกับวัสดุมวลรวม เช่น ทรายและหินฝุ่น ในอัตราส่วนต่างๆ นอกจากนี้ยังมีวัสดุทดแทนมาทำคอนกรีตบล็อก เช่น เศษเปลือกหอยแครงและหอยนางรม ซึ่งเปลือกหอยประกอบด้วยสารจำพวกแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ สมบัติต้านทานไฟฟ้าดี ทนทานต่อการรับกำลังอัด และเพื่อเป็นการสร้างประโยชน์ทั้งในด้านการลดปริมาณของขยะประเภทเศษเปลือกหอยและลดปัญหาการใช้ทรัพยากรอย่างสิ้นเปลือง ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเศษขยะจากเปลือกหอยนางรมที่ถูกทิ้งอย่างมหาศาลในแต่ละปี นำมาบดอัดแทนที่หินฝุ่นเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างทางเลือก คือนำมาผลิตคอนกรีตบล็อก และทำให้เศษขยะจาก

เปลือกหอยนางรมมีมูลค่า และทำให้เกิดประสิทธิภาพทางด้านวิศวกรรมและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคตต่อไป

## 2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอยนางรมบด
- 2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของคอนกรีตบล็อกที่ใช้เปลือกหอยนางรมบดแทนที่หินปูนตาม มอก.58-2560
- 2.3 เพื่อศึกษาวิเคราะห์ต้นทุนของการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงแบบไม่รับน้ำหนักที่ใช้เปลือกหอยนางรมบดแทนที่หินปูนตาม มอก.58-2560

## 3. ระเบียบวิธีการวิจัย

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ในกระบวนการดำเนินงานวิจัยซึ่งเป็นการทดสอบสมบัติทางด้านวิศวกรรมของคอนกรีตบล็อกผสมขยะจากเปลือกหอยนางรมบด วัสดุที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรา ทีพีไอ ตามมาตรฐาน ASTM C 150 2) หินปูน ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ค้างเบอร์ 8 และ 3) เปลือกหอยนางรมบด ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ค้างเบอร์ 8

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

ประกอบด้วยอุปกรณ์ 1) เครื่องทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด ขนาด 2,000 กิโลนิวตัน รุ่น STS-C902V 2) เครื่องเขย่าตะแกรงร่อนและชุดตะแกรงร่อน 3) เครื่องบดหิน รุ่น VE Wegter 4) เครื่องปั่นเอนกประสงค์ 5) เครื่องอัดคอนกรีตบล็อกและ 6) ตู้อบลมร้อน อุณหภูมิ  $100 \pm 5$  องศาเซลเซียส

### 3.3 กระบวนการดำเนินการวิจัย

1) นำเศษขยะจากเปลือกหอยนางรมที่ใช้ในการทดลองจากร้านอาหารในเขตอำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ผ่านการแช่กรดอะซิติก ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร ที่เวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำผึ่งแดด แล้วทำการบดด้วยเครื่องทดสอบความทนทานต่อการสึกกร่อนของหิน LOS ANGELES ABRASION เวลา 1 ชั่วโมง พร้อมนำไปร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 4 ค้างเบอร์ 8 และนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

2) นำเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการบด ใช้แทนที่หินปูนด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ โดยน้ำหนัก



3) ทำการขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกผสมขยะจากเปลือกหอยนางรมบดแทนที่หินปูนขนาด 7 x 19 x 39 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ : หินปูน เท่ากับ 1 : 6 โดยน้ำหนัก และผสมน้ำตามอัตราส่วน 0.5 โดยน้ำหนักของอัตราส่วนผสม

4) ทำการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตบล็อกผสมขยะเปลือกหอยนางรมบด เพื่อหาค่าสมบัติของการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด

5) ศึกษาวิเคราะห์ต้นทุนของการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงแบบไม่รับน้ำหนักที่ใช้ขยะเปลือกหอยนางรมบดแทนที่หินปูนตาม มอก.58-2560

#### 4. ผลการวิจัย

##### 4.1 ผลการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ

##### 4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของหินปูนและเปลือกหอยนางรมบด

ตารางที่ 4-1 องค์ประกอบทางเคมีของหินปูน

| องค์ประกอบทางเคมี                          | ร้อยละ |
|--------------------------------------------|--------|
| Silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ )         | 65.51  |
| Aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) | 12.03  |
| Potassium oxide ( $\text{K}_2\text{O}$ )   | 10.10  |
| Ferric oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )   | 5.20   |
| Sodium oxide ( $\text{Na}_2\text{O}$ )     | 3.39   |
| Calcium oxide ( $\text{CaO}$ )             | 1.80   |
| Magnesium oxide ( $\text{MgO}$ )           | 0.76   |
| Sulfur trioxide ( $\text{SO}_3$ )          | 0.13   |

ตารางที่ 4-2 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอยนางรมบด

| องค์ประกอบทางเคมี                          | ร้อยละ |
|--------------------------------------------|--------|
| Calcium oxide ( $\text{CaO}$ )             | 48.85  |
| Loss on ignition (L O I)                   | 40.37  |
| Silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ )         | 4.31   |
| Aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) | 1.17   |
| Magnesium oxide ( $\text{MgO}$ )           | 0.99   |
| Sulfur trioxide ( $\text{SO}_3$ )          | 0.62   |
| Ferric oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )   | 0.40   |
| Potassium oxide ( $\text{K}_2\text{O}$ )   | 0.14   |

จากตารางที่ 4-1 และ 4-2 โดยพบว่า เปลือกหอยนางรมบด มีองค์ประกอบหลักเป็น CaO โดยมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 48.85 ซึ่งสูงเมื่อเปรียบเทียบกับหินฝุ่นเพียงร้อยละ 1.8 แต่ CaO ในเปลือกหอยนางรมบดนั้นจะอยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตเนื่องจากเปลือกหอยนางรมบดไม่ได้ผ่านกระบวนการเผา ทำให้ความชื้นและปริมาณคาร์บอนอิสระในเปลือกหอยนางรมบดยังคงมีอยู่มากจากผลดังกล่าวจะส่งผลให้วัสดุมีความต้องการน้ำสูงขึ้น

#### 4.1.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของหินฝุ่นและเปลือกหอยนางรมบด

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหินฝุ่นและเปลือกหอยนางรมบด โดยผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 128 Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของขยะเปลือกหอยนางรมบด

| สมบัติทางกายภาพ                  | หินฝุ่น | เปลือกหอย |
|----------------------------------|---------|-----------|
| ความถ่วงจำเพาะ(Specific Gravity) | 2.67    | 2.50      |
| ร้อยละการดูดซึม (Absorption)     | 3.2     | 9.3       |

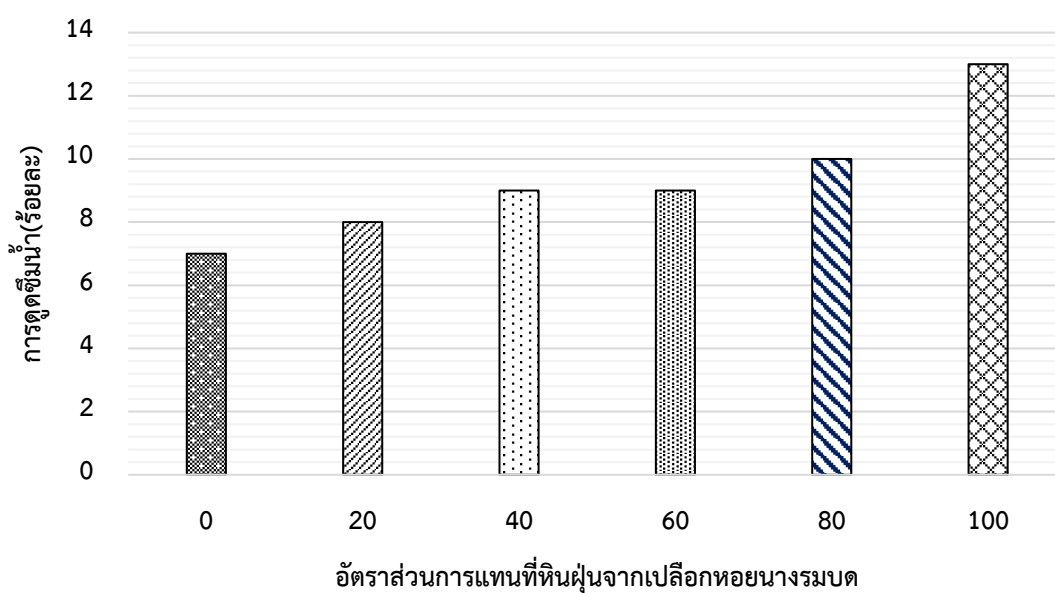
#### 4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพคอนกรีตบล็อก

ตารางที่ 4-4 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพคอนกรีตบล็อก

| สัญลักษณ์ | อัตราส่วนที่ทดแทน<br>หินฝุ่น<br>(ร้อยละ) | ปริมาณการดูดซึมน้ำที่<br>เวลา 24 ชั่วโมง<br>(ร้อยละ) | ความหนาแน่น<br>(กิโลกรัมต่อตาราง<br>เซนติเมตร) |
|-----------|------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| STD       | 0                                        | 7                                                    | 1.89                                           |
| S-1       | 20                                       | 8                                                    | 1.69                                           |
| S-2       | 40                                       | 9                                                    | 1.66                                           |
| S-3       | 60                                       | 9                                                    | 1.49                                           |
| S-4       | 80                                       | 10                                                   | 1.45                                           |
| S-5       | 100                                      | 13                                                   | 1.46                                           |

#### 4.2.1 การทดสอบดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกผสมขยะเปลือกหอยนางรมบด ขนาด 7 x 19 x 39 เซนติเมตร

จากการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกจากขยะเปลือกหอยนางรมบด โดยใช้เปลือกหอยที่ผ่านการบดอัดมาแทนที่หินปูนที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ มีอายุบ่มที่ 7,14,28 วัน ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4-4 และ ภาพที่ 1

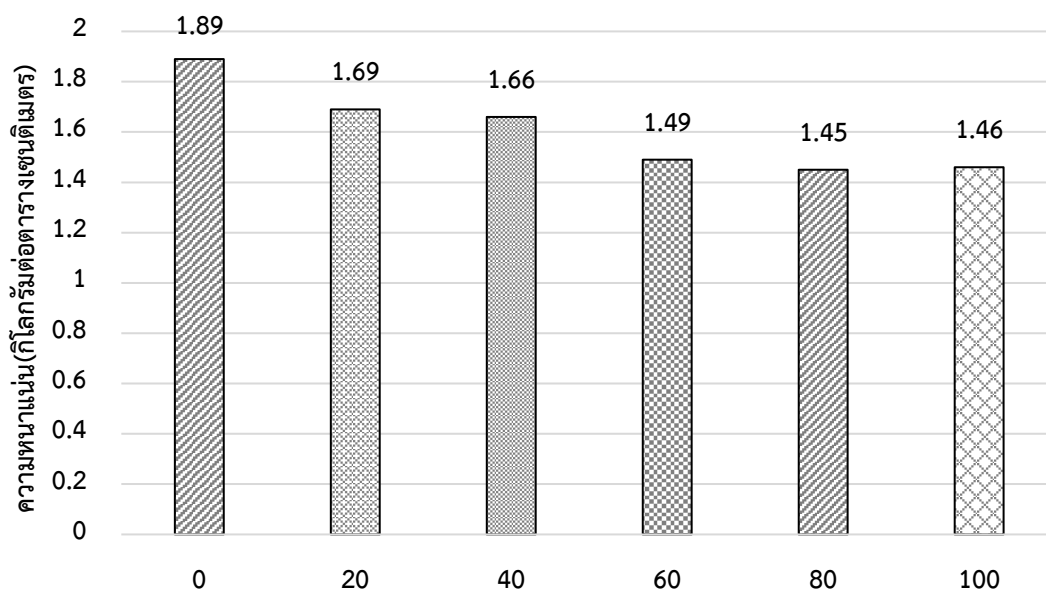


ภาพที่ 1 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกแทนที่หินปูนจากเปลือกหอยนางรมบด

จากการทดสอบการดูดซึมน้ำพบว่าคอนกรีตบล็อกผสมขยะจากเปลือกหอยนางรมบด สามารถดูดซึมน้ำได้ดีกว่าคอนกรีตบล็อกมาตรฐานที่ไม่มีส่วนผสมของขยะเปลือกหอยนางรมบด เนื่องจากเปลือกหอยนางรมบดมีความสามารถดูดซึมน้ำมากกว่าหินปูน ลักษณะรูปร่างอนุภาคของเปลือกหอยนางรมบดมีขนาดอนุภาคเล็กใหญ่คู่กัน บางส่วนค่อนข้างเรียบ พรุณ และมีช่องว่างภายใน ทำให้ดูดซึมน้ำสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้น และอาจยังทำให้ก้อนคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มีผลเสียต่อการเี่ยมของคอนกรีตและทำให้กำลังอัดลดลง

#### 4.2.2 การทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกจากขยะผสมเปลือกหอยนางรมบด แทนที่หินปูน ขนาด 7 x 19 x 39 เซนติเมตร

จากการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกผสมขยะจากเปลือกหอยนางรมบด โดยใช้เปลือกหอยที่ผ่านการบดอัดมาแทนที่หินปูนที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ มีอายุบ่มที่ 7,14,28 วัน ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4-4 และ ภาพที่ 2



อัตราส่วนการแทนที่หินปูนจากเปลือกหอยนางรม

ภาพที่ 2 ความหนาแน่นคอนกรีตบล็อกแทนที่หินปูนจากเปลือกหอยนางรม

จากภาพที่ 2 ลักษณะแผนภูมิแท่งแสดงค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดสอบ พบว่าคอนกรีตบล็อกผสมขยะจากเปลือกหอยนางรมบด ที่มีการนำเปลือกหอยมาทดแทนหินปูนจะมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าโดยชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่ไม่ได้นำเปลือกหอยนางรมมาแทนที่หินปูน

#### 4.3 ผลการทดสอบทางกลของคอนกรีตบล็อก

4.3.1 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกผสมขยะจากเปลือกหอยนางรมบด ขนาด  $7 \times 19 \times 39$  เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3 และ ภาพที่ 4



ภาพที่ 3 การขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกผสมขยะจากเปลือกหอยนางรมบด



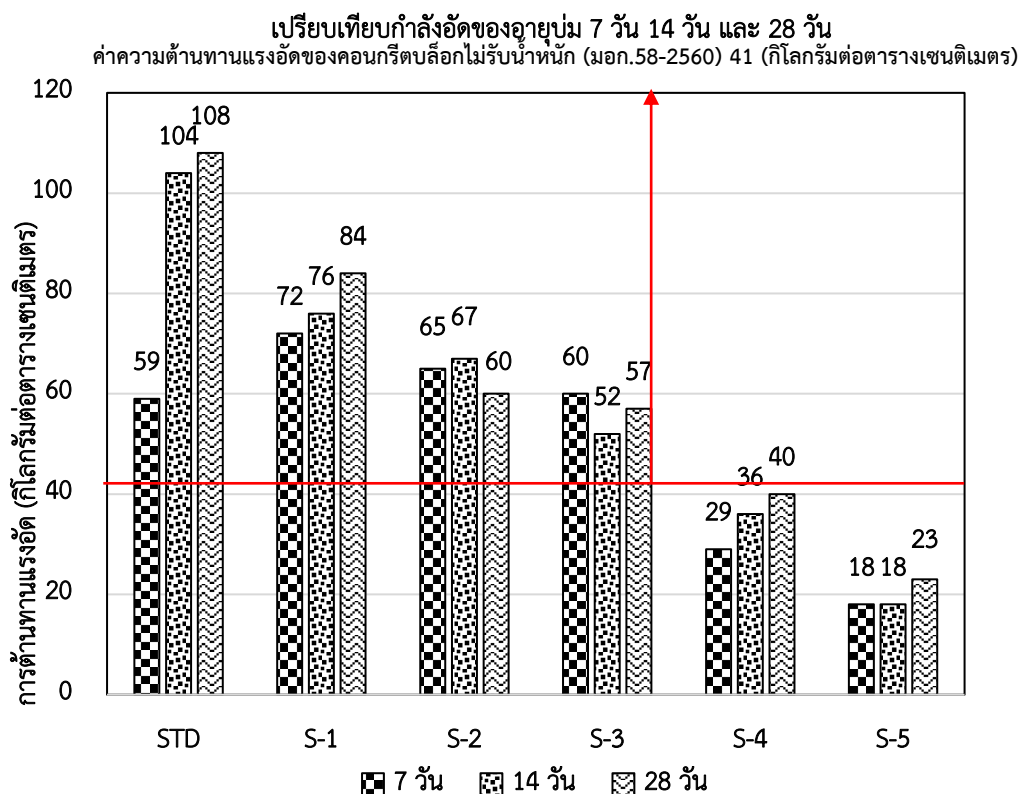
ภาพที่ 4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกแทนที่หินปูนจากเปลือกหอยนางรมบด

จากการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกผสมขยะจากเปลือกหอยนางรมบด โดยใช้เปลือกหอยที่ผ่านการบดมาแทนที่หินปูนที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ มีอายุบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4-5 และ ภาพที่ 5

ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพคอนกรีตบล็อก

| สัญลักษณ์ | อัตราส่วนที่ทดแทน<br>หินปูน<br>(ร้อยละ) | กำลังอัดที่อายุ<br>7 วัน<br>(กิโลกรัมต่อ<br>ตาราง<br>เซนติเมตร) | กำลังอัดที่อายุ<br>14วัน<br>(กิโลกรัมต่อ<br>ตาราง<br>เซนติเมตร) | กำลังอัดที่อายุ<br>28 วัน<br>(กิโลกรัมต่อ<br>ตาราง<br>เซนติเมตร) |
|-----------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| STD       | 0                                       | 59                                                              | 104                                                             | 108                                                              |
| S-1       | 20                                      | 72                                                              | 76                                                              | 84                                                               |
| S-2       | 40                                      | 65                                                              | 67                                                              | 60                                                               |
| S-3       | 60                                      | 60                                                              | 52                                                              | 57                                                               |
| S-4       | 80                                      | 29                                                              | 36                                                              | 40                                                               |
| S-5       | 100                                     | 18                                                              | 18                                                              | 23                                                               |

จากภาพที่ 5 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกผสมขยะจากเปลือกหอยนางรมบด โดยใช้เปลือกหอยที่ผ่านการบดมาแทนที่หินปูนที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ มีอายุบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดพบว่าอัตราส่วนที่ร้อยละ 20 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกชนิดอื่นที่มีส่วนผสมจากขยะเปลือกหอยนางรมบด และอัตราส่วนที่ ร้อยละ 40, 60, 80, 100 จะมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงตามลำดับ



ภาพที่ 5 ผลเปรียบเทียบการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกแทนที่หินฝุ่น  
จากเปลือกหอยนางรมบด

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนที่ร้อยละ 0, 20, 40, 60 มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มอก 58-2560 ที่ต้องการค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า 41 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอัตราส่วนแทนที่หินฝุ่นจากขยะเปลือกหอยร้อยละ 80 และ 100 มีค่ากำลังรับแรงอัดไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักตามมาตรฐาน มอก 58-2560

#### 4.4 การคำนวณต้นทุน

ในการศึกษาการทดลองนี้จะวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์เฉพาะราคาต้นทุนวัสดุในกรณีศึกษาที่มีผลการทดลองค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักที่ผ่านเกณฑ์มอก 58-2560 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ราคาต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์เฉพาะราคาต้นทุนวัสดุ

| วัสดุ<br>คอนกรีต<br>บล็อก<br>อัตราส่วน<br>มาตรฐาน<br>1:6 | คอนกรีตบล็อกที่ทดแทนหินปูนด้วยเปลือกหอยนางรมอัตราส่วนผสม(ร้อยละ) |                        |                                     |                        |                                     |                        |                                     |                        |                                     |                        |                                     |                        |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|
|                                                          | 0                                                                |                        | 20                                  |                        | 40                                  |                        | 60                                  |                        | 80                                  |                        | 100                                 |                        |
|                                                          | ปริมาณที่<br>ใช้/ก้อน<br>(Kg)                                    | ราคา/<br>ก้อน<br>(บาท) | ปริมาณ<br>ที่ใช้/<br>ก้อน<br>( Kg ) | ราคา/<br>ก้อน<br>(บาท) | ปริมาณ<br>ที่ใช้/<br>ก้อน<br>( Kg ) | ราคา/<br>ก้อน<br>(บาท) | ปริมาณ<br>ที่ใช้/<br>ก้อน<br>( Kg ) | ราคา/<br>ก้อน<br>(บาท) | ปริมาณ<br>ที่ใช้/<br>ก้อน<br>( Kg ) | ราคา/<br>ก้อน<br>(บาท) | ปริมาณ<br>ที่ใช้/<br>ก้อน<br>( Kg ) | ราคา/<br>ก้อน<br>(บาท) |
| ปูนซีเมนต์                                               | 1                                                                | 2.68                   | 1                                   | 2.68                   | 1                                   | 2.68                   | 1                                   | 2.68                   | 1                                   | 2.68                   | 1                                   | 2.68                   |
| หินปูน                                                   | 6                                                                | 2.43                   | 4.8                                 | 1.94                   | 3.6                                 | 1.46                   | 2.4                                 | 0.97                   | 1.2                                 | 0.49                   | 0                                   | 0                      |
| เปลือกหอย<br>นางรม                                       | 0                                                                | 0                      | 1.2                                 | 0                      | 2.4                                 | 0                      | 3.6                                 | 0                      | 4.8                                 | 0                      | 6                                   | 0                      |
| รวมราคา<br>(บาท)                                         |                                                                  | 5.11                   |                                     | 4.62                   |                                     | 4.14                   |                                     | 3.65                   |                                     | 3.17                   |                                     | 2.68                   |
| ผลต่างต้นทุน<br>(บาท)                                    | 0                                                                |                        | 0.49                                |                        | 0.97                                |                        | 1.46                                |                        | 1.94                                |                        | 2.43                                |                        |
| ร้อยละ<br>ต้นทุนลดลง                                     | 0                                                                |                        | 9.58                                |                        | 18.98                               |                        | 28.57                               |                        | 37.96                               |                        | 47.55                               |                        |

จากการเปรียบเทียบต้นทุนเฉพาะค่าวัสดุในการผลิตคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับหินปูนในอัตราส่วน 1:6 โดยน้ำหนักกับอัตราส่วนที่ใช้เปลือกหอยนางรมทดแทนที่หินปูนในอัตราส่วนทดแทนในอัตราส่วนร้อยละ 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยที่เปลือกหอยนางรมเป็นวัสดุเหลือทิ้งจึงไม่มีมูลค่าอาจจะมีเพียงการใช้แรงงานคนในการขนย้ายและทำความสะอาดเท่านั้น ดังนั้นการใช้เปลือกหอยนางรมทดแทน จึงเป็นวัสดุทางเลือกในการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนหินปูน สามารถลดราคาต้นทุนการผลิตได้ร้อยละ 9.58, 18.98, 28.57, 37.96 และ 47.55 คอนกรีตบล็อกต่อก้อน ตามลำดับ

## 5. สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาสมบัติทางด้านวิศวกรรมของคอนกรีตบล็อกผสมขยะจากเปลือกหอยนางรมทดแทนที่หินปูนด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ ทำการบ่มเป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.58-2560 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเปลือกหอยนางรมบดนั้น ซึ่งจะอยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตเนื่องจากเปลือกหอยนางรมบดไม่ได้ผ่านกระบวนการเผา ทำให้ความชื้นและปริมาณคาร์บอนอิสระในเปลือกหอยนางรมบดยังคงมีอยู่มาก จากผลดังกล่าวจะส่งผลให้วัสดุมีความต้องการน้ำสูงขึ้น

5.2 เมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพของหินฝุ่นและเปลือกหอยนางรมพบว่า ลักษณะรูปร่างอนุภาคของเปลือกหอยนางรมบดมีขนาดอนุภาคเล็กใหญ่คละกัน พื้นที่ผิวค่อนข้างขรุขระแต่ บางส่วนค่อนข้างเรียบ พรุณ และมีช่องว่างภายใน ทำให้ดูดซึมน้ำสูงขึ้น ทำให้เกิดการเยิ้มของคอนกรีต ซึ่งต่างจากหินฝุ่นที่มีลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยมและมีลักษณะผิวที่ขรุขระมากกว่าเปลือกหอยนางรม จึงมีผลต่อการรับกำลังต้านทานกำลังแรงอัดลดลงเมื่อนำเปลือกหอยนางรมมาแทนที่หินฝุ่น

5.3 จากการศึกษาสมบัติของเปลือกหอยนางรมที่นำมาทดแทนหินฝุ่นในอัตราส่วนต่างๆ โดยการออกแบบส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของ ปูนซีเมนต์:หินฝุ่น:เปลือกหอยนางรม โดยผู้วิจัยพิจารณาอัตราส่วนผสมของเปลือกหอยนางรมที่นำไปแทนที่หินฝุ่นที่อัตราส่วนร้อยละ 20 40 60 80 และ 100 พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกจะมีค่าลดลงตามปริมาณเปลือกหอยนางรมบดที่เพิ่มขึ้น จึงได้อัตราส่วนของเปลือกหอยนางรมในการทดแทนหินฝุ่นที่ร้อยละ 20, 40 และ 60 ที่มีค่ารับกำลังอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก.58-2560 ที่ต้องการค่ารับกำลังอัดสูงกว่า 41 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

5.4 เมื่อพิจารณาผลการทดสอบคอนกรีตบล็อกผสมขยะจากเปลือกหอยนางรมบด พบว่าอัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสมคือร้อยละ 20 ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกับคอนกรีตบล็อกมาตรฐาน ที่ร้อยละ 8 มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงคอนกรีตบล็อกมาตรฐานที่ 1.69 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่ารับกำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 84 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าที่มีกำลังสูงสุดและใกล้เคียงคอนกรีตบล็อกมาตรฐาน และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ที่ต้องการการต้านทานแรงอัดสูงกว่า 41 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกที่มีส่วนผสมของเปลือกหอยนางรมบดจะต่ำกว่าคอนกรีตบล็อกมาตรฐาน แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักในบางอัตราส่วน ตามมาตรฐานมอก. 58-2560

5.5 จากการเปรียบเทียบต้นทุนเฉพาะค่าวัสดุในการผลิตคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับหินฝุ่นในอัตราส่วน 1:6 โดยน้ำหนักกับอัตราส่วนที่ใช้เปลือกหอยนางรมแทนที่หินฝุ่นในอัตราส่วนร้อยละ 20 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดในการใช้เปลือกหอยนางรมบดแทนที่หินฝุ่นสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ 0.49 บาทต่อก้อน คิดเป็นร้อยละ 9.58 ของคอนกรีตบล็อกต่อก้อน

## 6. ข้อเสนอแนะ

การศึกษาสมบัติทางด้านวิศวกรรมของคอนกรีตบล็อกผสมขยะจากเปลือกหอยนางรมบดแทนที่หินฝุ่นด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตามลำดับ มีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

1) การนำเปลือกหอยนางรมมาใช้ผสมในกระบวนการทดสอบควรจะนำเปลือกหอยนางรมไปทำการแช่กรดอะซิติกเพื่อลดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ติดมากับหอย แล้วนำผึ่งแดด แล้วทำการบด

2) การใช้ขนาดผลของเปลือกหอยนางรมบดควรให้ได้ขนาดเท่ากับขนาดผลของหินฝุ่น เพราะอาจจะทำให้ค่าการทดสอบมีความเป็นไปได้มากกว่า และสามารถนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ไปในทิศทางเดียวกันได้ และหากต้องการเปลือกหอยบดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 8 การนำเปลือกหอยนางรมมาบดควรใช้เปลือกหอยนางรมที่มีขนาดใหญ่ในการนำมาบดจะทำให้ได้เปลือกหอยนางรมที่มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างเบอร์ 8 ที่มีจำนวนเยอะกว่าการใช้เปลือกหอยขนาดเล็กหรือเศษของเปลือกหอยมาทำการบด

3) คุณสมบัติของเปลือกหอยนางรมบดไม่สามารถรับกำลังอัดได้เช่นเดียวกับหินฝุ่น เนื่องจากเปลือกหอยนางรมมีลักษณะผิวหลายส่วนค่อนข้างความเรียบ มีความพรุน มีช่องว่าง ควรนำไปทดแทนปูนซีเมนต์มากกว่า แต่ควรนำเปลือกหอยนางรมไปเผาและทำการบด จะทำให้มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน ช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นในด้านการรับกำลัง

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ รวมถึงนักศึกษาและอาจารย์ในสาขาวิศวกรรมโยธา ที่ช่วยเสียสละเวลาและองค์ความรู้ในการสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้ และผู้ร่วมวิจัยที่ทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## 8. เอกสารอ้างอิง

ดิศสกุล อังตระกูล และกิตติพงศ์ รื่นวงศ์. (2562). การพัฒนาคอนกรีตบล็อกจากใยบัวหอม.

วารสารวิชาการการออกแบบสภาพแวดล้อม, 1, 92-107.

"เส้นพลาสติกรักษ์โลก" จาก "เปลือกหอยแมลงภู่" คีนซีพขยะ PLA แก้ปัญหาชุมชน ฝีมือนาโนเทค

สวทช.-จุฬาฯ. (22 พฤศจิกายน 2566). ผู้จัดการออนไลน์. ค้นจาก

<https://mgronline.com/greeninnovation/detail/9660000104483>

Aljerf, L. (2015). Effect of thermal-cured hydraulic cement admixtures on the mechanical properties of concrete. *Intercom-International Ceramic Review*, 64(8), 346-356.

ASTM Standard. (2013). **Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete**. Retrieved from [www.astm.org](http://www.astm.org): ASTM International.

ASTM Standard. (2014). **Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete**. Retrieved from [www.astm.org](http://www.astm.org): ASTM International.

ASTM Standard. (2019). **Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**. Retrieved from [www.astm.org](http://www.astm.org): ASTM International.

- ASTM Standard. (2019). **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars Using 2-in. (2020). [or 50-mm] Cube Specimens.** Retrieved from [www.astm.org](http://www.astm.org): ASTM International.
- Bahij, S., Omary, S., Feugeas, F., & Faqiri, A. (2020). Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste–A review. **Waste Management**, 113, 157-175.
- Kaya, A., & KAR, F. (2016). Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. **Construction and Building Materials**, 15(105), 572-578.
- Madhu, G., Bhunia, H., Bajpai, P.K., & Chaudhary, V. (2014). Mechanical and morphological properties of high-density polyethylene and polylactide blends. **Journal of Polymer Engineering**, 34(9), 813-821.
- Paopongpaiboon, K., Boonserm, K., Chindaprasirt, P., & Horsakulthai, V. (2019). The effect of organic solvent patios on mechanical properties and thermal conductivity of walkway block from waste foam residue. **The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage**, 30(4), 121-132.
- Solomon. A., & Hemalatha, G. (2018). Experimental investigation of insulated concrete form (ICF) wall panels under quasi-static cyclic load. **International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)**, 8(2), 84-88.
- Suwansaard, A., Kongpun, T., & Khemkhao, M. (2021). Properties of Mortar Composites from Plastic Waste. **Journal of Applied Science and Engineering**, 25(1), 59-70.
- Suwansaard, A., Kongpun, T., & Khemkhao, M. (2022). Properties of Mortars Mixed with Polystyrene and Hemp Fiber Wastes. **Applied Science and Engineering Progress**, 15(1), 1-11.
- Thai Industrial Standard (TIS). (2017). **TIS no. 58-2560 Hollow non-loadbearing concrete masonry units.** Ministry of Industry (Thailand).
- Wang, R., & Meyer, C. (2012). Performance of cement mortar made with recycled high-impact polystyrene. **Cement and Concrete Composites**, 34(9), 975–981.

## การออกแบบและพัฒนาเครื่องขัดผิวโลหะ DESIGN AND DEVELOPMENT OF THE METAL SURFACE POLISHING MACHINE

แมน ฟักทอง<sup>1</sup>, เกริกชัย มีหนู<sup>1</sup>, ศักดิ์สิทธิ์ ชื่นชมขนาดจา<sup>1\*</sup>, ธงชัย เครือผือ<sup>2</sup>, กันตภณ โล่นพันธ์<sup>3</sup>

Man Fakthong<sup>1</sup>, Kerkchai Meenu<sup>1</sup>, Saksit Chuenchomnakjad<sup>1\*</sup>,

Thongchai Khruueaphue<sup>2</sup>, Kantaphon Lonphan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตพิษณุโลก อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

<sup>2</sup>คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์ ประเทศไทย 67000

<sup>3</sup>คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Phitsanulok Campus,  
Muang Phitsanulok, Thailand, 65000

<sup>2</sup>Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University,  
Muang, Phetchabun, Thailand, 67000

<sup>3</sup>Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

\*Corresponding author e-mail: saksit273@rmul.ac.th

วันที่เข้ารับ 12 กุมภาพันธ์ 2567

วันที่แก้ไขบทความ 25 มิถุนายน 2567

วันที่ตอบรับบทความ 3 กรกฎาคม 2567

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบและพัฒนาเครื่องขัดผิวโลหะ เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องขัดผิวโลหะและประเมินความพึงพอใจโดยผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งการทดลองใช้ชิ้นงานทดสอบเป็นเหล็ก S45C โดยหาประสิทธิภาพเครื่องจากการเปรียบเทียบความเร็วรอบที่ 300, 600, 900, 1,200 และ 1,500 รอบ/นาที และทำการเริ่มต้นขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 360, 600 และ 1,000 และทำการประเมินความพึงพอใจจากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 7 คน พบว่า จากขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 360 ความเร็วรอบที่เหมาะสม คือ 1,200 และ 1,500 รอบ/นาที จากการทดสอบขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 ความเร็วรอบที่เหมาะสม คือ 900, 1,200 และ 1,500 รอบ/นาที และจากขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,000 ความเร็วรอบที่เหมาะสม คือ 900, 1,200 และ 1,500 รอบ/นาที และพบว่า ขนาดของกระดาษทรายและความเร็วรอบที่เหมาะสมในการใช้งาน คือ ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,000 ที่ความเร็วรอบ 1,200 รอบ/นาที

**คำสำคัญ:** กระบวนการขัดผิวโลหะ, การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ, เครื่องขัดผิวโลหะ, โลหะ, เหล็ก S45C

### Abstract

The objectives of this research are to design and develop a metal polishing machine to find out the efficiency of the machine and assess the satisfaction of experts. The experiment used a test piece of S45C steel to find the efficiency of the machine by comparing rotation speeds of 300, 600, 900, 1,200 and 1,500 rpm and starting with sandpaper no. 360, 600 and 1,000 with evaluating satisfaction by 7 people. It was found that from polishing with sandpaper no. 360, the appropriate rotational speeds were 1,200 and 1,500 rpm. From testing with sandpaper no. 600, the appropriate rotational speeds were 900, 1,200 and 1,500 rpm. Moreover, from polishing with sandpaper no. 1,000, the appropriate rotational speeds are 900, 1,200, and 1,500 rpm. Hence, the results revealed that the size of sandpaper and the appropriate rotational speed for use is polishing with sandpaper no. 1,000 at a rotational speed of 1,200 rpm.

**Keywords:** Polishing process, Microstructure analysis, Polishing machine, Metal, S45C steel

### 1. บทนำ

การศึกษาคุณสมบัติ พฤติกรรม และโครงสร้างภายในของโลหะต้องมีการตรวจสอบเชิงลึกลงไปถึงระดับโครงสร้างภายใน เพื่อให้เข้าใจว่าเพราะเหตุใดโครงสร้างของโลหะจึงเปลี่ยนเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะของการให้ความร้อนหรือความเย็น ในการตรวจสอบโครงสร้างภายในของโลหะนั้นจำเป็นต้องมีกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานซึ่งประกอบไปด้วยการปรับผิวของชิ้นงานให้ได้ระนาบด้วยการกลึง กัด และไส เป็นต้น ต่อมาเป็นการขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย โดยเรียงลำดับตั้งแต่กระดาษทรายหยาบไปจนถึงกระดาษทรายละเอียด ในกระบวนการขัดชิ้นงานจะต้องมีน้ำไหลผ่านบนกระดาษทรายที่ใช้ขัดตลอดเวลาทั้งนี้เพื่อให้ น้ำช่วยหล่อเย็นไม่ให้เกิดความร้อนบนผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งในโลหะบางชนิดความร้อนที่เกิดขึ้นนี้อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างภายในได้อีกด้วย ต่อมานำชิ้นงานไปขัดเงาด้วยผงอะลูมินาผสมน้ำซึ่งจะช่วยให้ผิวหน้าชิ้นงานมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น และพร้อมสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงาน (มานพ และสำลี, 2537)

ในปัจจุบันวิทยาลัย มหาวิทยาลัย และสถาบันการศึกษาหลายแห่งที่มีการจัดการเรียนการสอนเกี่ยวกับรายวิชาโลหะวิทยาในงานอุตสาหกรรม โดยหมายถึงความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับโลหะ คุณสมบัติ พฤติกรรม และโครงสร้างภายในของโลหะ ซึ่งอธิบายถึงวิธีการแยกแยะแบ่งประเภทโลหะ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม ความรู้แขนงนี้ถือเป็นหัวใจสำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับโลหะหลายประเภท (วิวัฒน์, 2558) โดยในปัจจุบันการเรียนการสอน การเตรียม

ชิ้นงานโดยการขัดด้วยมือจะก่อให้เกิดปัญหาผิวหน้าของชิ้นงานไม่ได้ระนาบ ผิวของชิ้นงานไม่สวยงาม และใช้ระยะเวลาในการขัดชิ้นงานนาน ขึ้นอยู่กับความชำนาญของแต่ละบุคคล จึงทำให้ได้ผลการทดสอบที่ไม่มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งแตกต่างจากการเตรียมชิ้นงานด้วยเครื่องขัดผิวโลหะที่ผิวหน้าของชิ้นงานสวยงาม เทียงตรงและได้ระนาบมากกว่า และใช้เวลาในการขัดที่น้อยกว่าการขัดด้วยมือ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาเบื้องต้น พบว่า เครื่องขัดผิวโลหะที่จำหน่ายในท้องตลาดมีราคาแพง (กวี, 2556) ซึ่งหลายหน่วยงานไม่สามารถจัดซื้อหามาใช้งานได้โดยเฉพาะเป็นหน่วยงานสถานศึกษาหลายแห่งยังขาดแคลนเครื่องมือในการเรียนการสอนเสมือนจริง เพื่อเป็นการฝึกทักษะด้านการปฏิบัติ การจัดการเรียนการสอนให้สอดคล้องกับศตวรรษที่ 21 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาเครื่องขัดผิวโลหะ เพื่อใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนเสมือนจริงทดแทน โดยหลังจากการสร้างจะทำการหาประสิทธิภาพของเครื่องและประเมินความพึงพอใจจากผู้เชี่ยวชาญ

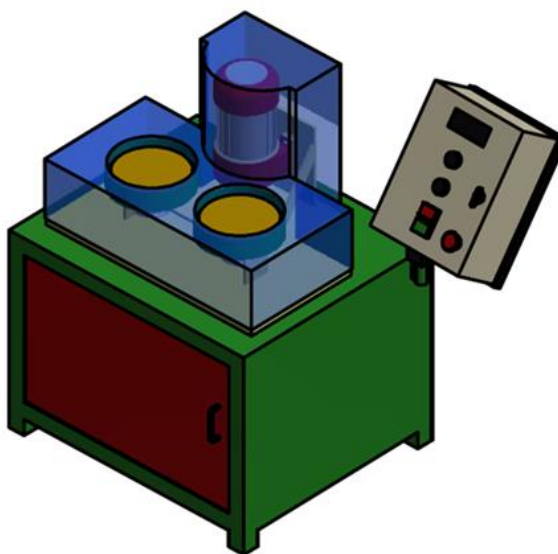
## 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องขัดผิวโลหะ
- 2.2 เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องขัดผิวโลหะและการประเมินความพึงพอใจโดยผู้เชี่ยวชาญ

## 3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 โครงสร้างเครื่องขัดผิวโลหะเดิมมีขนาด 720x520x240 มิลลิเมตร ออกแบบโดยการติดตั้งตัวส่งกำลัง คือมอเตอร์ มีสายพานและพูลเลย์เป็นตัวขับเคลื่อนให้จานขัดผิวโลหะเกิดการหมุน แต่เนื่องจากการติดตั้งมอเตอร์และจานขัดผิวโลหะมีการจับยึดให้ติดกับโครงสร้างด้านบนของเครื่องขัดผิวโลหะจึงทำให้เกิดการสั่นของเครื่องขัดผิวโลหะและมีเสียงดังในขณะที่ทำการปฏิบัติงาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างเครื่องขัดผิวโลหะ โดยมีการพัฒนาตัวจับยึดมอเตอร์และจานขัดผิวโลหะให้ติดกับฐานด้านล่างของเครื่องขัดผิวโลหะให้มีความแน่นหนาและมั่นคงเพื่อที่จะทำให้เครื่องขัดผิวโลหะนั้นไม่เกิดการสั่นและไม่มีเสียงดังในขณะที่ปฏิบัติงาน (วรวิทย์ และชาญ, 2556) ดังภาพที่ 1

3.2 จานขัดผิวโลหะเดิมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 180 มิลลิเมตร หนา 8 มิลลิเมตร ใช้วัสดุที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อป้องกันการเกิดสนิม มีหน้าที่เป็นตัวรองและยึดแผ่นกระดาษทราย แต่มีพื้นที่การจับยึดน้อยเกินไป ทำให้ในขณะที่ขัดโลหะตัวจานมีการขยับจึงเป็นสาเหตุให้ผิวโลหะไม่ได้ระนาบ ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบและพัฒนาจานขัดผิวโลหะขึ้นมาใหม่ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 203 มิลลิเมตร หนา 8 มิลลิเมตร โดยออกแบบให้ติดกับแกนเพลลาของเครื่องขัดผิวโลหะทำให้มีความมั่นคง จานขัดผิวโลหะไม่สามารถขยับเอียงได้ ทำให้การขัดผิวโลหะได้ระนาบและยังเพิ่มขนาดความโตของจานขัดผิวโลหะให้เท่ากับกระดาษทรายที่มีขายตามท้องตลาด (นราธิกร และคณะ, 2558)



ภาพที่ 1 ลักษณะของเครื่องตัดผิวโลหะที่ได้ทำการออกแบบโดยโปรแกรม CAD

3.3 ตัวครอบงานตัดผิวโลหะเดิมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 180 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร และสูง 14 มิลลิเมตร มีหน้าที่ล๊อคกระดาดทรายให้อยู่ติดกับงานตัดผิวโลหะ เพื่อไม่ให้กระดาดทราย ขยับ ซึ่งทำจากเหล็กจึงมีโอกาสที่จะเกิดสนิมทำให้อายุการใช้งานตัวครอบงานตัดผิวโลหะสั้นลง ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบและพัฒนาตัวครอบงานตัดผิวโลหะให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 203 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร และสูง 20 มิลลิเมตร เพื่อให้ตัวครอบงานตัดผิวโลหะล๊อคกระดาดได้ แน่นมากขึ้น และใช้อะคริลิกในการทำตัวครอบงานตัดผิวโลหะเพื่อป้องกันการเกิดสนิม (วีระวัฒน์ และจำนง, 2548)

3.4 ตัวครอบกันน้ำเครื่องตัดผิวโลหะเดิมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 225 มิลลิเมตร และ สูง 30 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมปัญหาของตัวครอบกันน้ำของเครื่องตัดผิวโลหะมี ขอบที่ต่ำเกินไปจึงทำให้น้ำหล่อเย็นกระเด็นออกอาจเกิดอุบัติเหตุได้ ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบและ พัฒนาตัวครอบกันน้ำเครื่องตัดผิวโลหะที่ผ่านการพัฒนามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 232 มิลลิเมตร และสูง 60 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม มีขอบกันน้ำที่สูงขึ้นเพื่อช่วย ไม่ให้น้ำมีการกระเด็นออก ช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุและเพื่อความสะดวกในการ ปฏิบัติงาน

3.5 ฐานเครื่องตัดผิวโลหะเดิม มีขนาด 720x520x8 มิลลิเมตร ใช้สำหรับรองรับโครงเครื่องตัด ผิวโลหะและเป็นตัวยึดแบร็ลงสำหรับประกอบแกนเพลางานตัดผิวโลหะ ปัญหาที่พบคือตัวยึดแบร็ลง สำหรับประกอบแกนเพลางานตัดผิวโลหะไม่แน่นหนา ทำให้แกนเพลางานตัดผิวโลหะเอียงไม่ได้ ระบาย ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบและพัฒนาฐานเครื่องตัดผิวโลหะให้มีขนาด 720x520x8 มิลลิเมตร โดยได้สร้างตัวยึดแบร็ลงสำหรับประกอบแกนเพลางานตัดผิวโลหะขึ้นมาใหม่ ซึ่งสามารถจับ



ยึดแกนเพลางานขัดผิวโลหะได้อย่างแน่นหนา และสร้างตัวจับยึดมอเตอร์เครื่องขัดผิวโลหะให้ติดกับฐานเครื่องเพื่อให้สามารถปรับสายพานของเครื่องได้ และลดเสียงดังในขณะใช้งานเครื่องขัดผิวโลหะ (บรรเลง และประเสริฐ, 2523)

### 3.6 วัสดุอุปกรณ์และขั้นตอนในการสร้างเครื่องขัดผิวโลหะ

#### 3.6.1 การสร้างฝาคกรอบโครงเครื่องขัดผิวโลหะ

3.6.1.1 ตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร จากนั้นขึ้นรูปฝาคกรอบโครงเครื่องขัดผิวโลหะด้วยวิธีการพับ เหล็กกล้าไร้สนิมแล้วใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมในการเชื่อมยึดฝาคกรอบโครงเครื่องขัดผิวโลหะที่มีขนาด 720x520x240 มิลลิเมตร

3.6.1.2 ตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมให้เป็นวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 232 มิลลิเมตร 2 วง สำหรับช่องใส่จานขัดผิวโลหะ และวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เพื่อใส่ท่อน้ำหล่อเย็น

3.6.1.3 พับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อทำตัวครอบมอเตอร์ แล้วนำไปเชื่อมติดกับโครงเครื่อง

3.6.1.4 เจาะรูด้านข้างเพื่อยึดติดกับฐานเครื่องขัดผิวโลหะ โดยรูที่เจาะต้องตรงกับรูที่ฐานเครื่องขัดผิวโลหะ เจาะทั้งหมด 8 รู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ 5 มิลลิเมตร

3.6.1.5 เชื่อมรอยต่อทั้งหมดด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมหลังจากเชื่อมเครื่องขัดผิวโลหะเสร็จแล้วเจียรตกแต่งรอบเครื่องขัดผิวโลหะเชื่อมให้เรียบร้อย การเชื่อมประกอบโครงสร้างเครื่องขัดผิวโลหะดังภาพที่ 2 (ก)

#### 3.6.2 การสร้างถาดรองน้ำทิ้ง

3.6.2.1 ทำการตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร

3.6.2.2 ม้วนเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 232 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ภายใน 64 มิลลิเมตร และความสูง 60 มิลลิเมตร จากนั้นเชื่อมปิดด้านล่าง เจาะรูแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เป็นรูระบายน้ำทิ้ง

3.6.2.3 นำท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร มาเชื่อมติดกับรูระบายน้ำทิ้ง สำหรับต่อเข้าสายยางระบายน้ำทิ้ง ดังภาพที่ 2 (ข)

#### 3.6.3 การสร้างฐานเครื่องขัดผิวโลหะ

3.6.3.1 ตัดเหล็กแผ่นฐานเครื่องให้มีขนาดเท่ากับโครงเครื่องขัดผิวโลหะ โดยใช้เหล็กแผ่นขนาดความหนา 8 มิลลิเมตร จากนั้นเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 8 รู

3.6.3.2 ทำตัวล้อฐานเครื่องกับโครงเครื่องขัดผิวโลหะโดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมล่องเชื่อมติดกับฐานเครื่องขัดผิวโลหะรอบๆ จากนั้นเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ทั้งหมด 8 รู

3.6.3.3 ตัดเหล็กแผ่นขนาดความหนา 8 มิลลิเมตร ขนาดความยาว 60 มิลลิเมตร กว้าง 40 มิลลิเมตร ทำการเจาะรูจำนวน 4 รู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูเท่ากับ 16 มิลลิเมตร และตัดเหล็ก

หนา 8 มิลลิเมตร ขนาดความยาว 80 มิลลิเมตร ขนาดความกว้าง 30 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาเชื่อมประกอบเป็นตัวจับยึดมอเตอร์

3.6.3.4 เจียรตบแต่งรอยเชื่อมและลบคมให้เรียบร้อย แล้วพ่นสีเพื่อป้องกันสนิม ดังภาพที่ 2 (ค)

#### 3.6.4 การสร้างงานขัดผิวโลหะ

3.6.4.1 ทำการตัดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีขนาดความหนา 8 มิลลิเมตร เป็นวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 203 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น

3.6.4.2 ทำการตัดเพลาลูกกลิ้งไร้สนิมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ขนาดความยาว 200 มิลลิเมตร จากนั้นนำเพลาลูกกลิ้งไร้สนิมมาลึงปลอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ขนาดความยาว 180 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น

3.6.4.3 นำเพลาลูกกลิ้งไร้สนิมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ขนาดความยาว 180 มิลลิเมตร มาเชื่อมประกอบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดความหนา 8 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 203 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 2 (ง)



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพที่ 2 ขั้นตอนการสร้างเครื่องขัดผิวโลหะ (ก) ฝาครอบโครงเครื่องขัดผิวโลหะ (ข) ถาดรองน้ำทิ้ง (ค) ฐานเครื่องขัดผิวโลหะ (ง) งานขัดผิวโลหะ (จ) โต๊ะวางเครื่องขัดผิวโลหะ และ (ฉ) การประกอบเครื่องขัดผิวโลหะสมบูรณ์

### 3.6.5 การสร้างโตะวางเครื่องขัดผิวโลหะ

3.6.5.1 ทำการตัดเหล็กแผ่นที่มีขนาดความหนา 1.2 มิลลิเมตร กว้าง 800 มิลลิเมตร ยาว 2,000 มิลลิเมตร จำนวน 1 แผ่น และขนาดกว้าง 600 มิลลิเมตร ยาว 800 มิลลิเมตร จำนวน 3 แผ่น

3.6.5.2 ทำการตัดเหล็กกล่อง ขนาด 1.5x1.5 นิ้ว ยาว 2,000 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น ยาว 800 มิลลิเมตร จำนวน 8 ชิ้น และขนาด 1x1 นิ้ว ยาว 750 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น

3.6.5.3 ทำการเชื่อมประกอบโครงสร้างโตะวางเครื่อง ดังภาพที่ 2 (จ)

3.6.6 นำชิ้นส่วนเครื่องขัดผิวโลหะที่ได้รับการออกแบบและสร้างมาทำการประกอบเข้าด้วยกัน พร้อมติดตั้งชุดตู้ควบคุมเครื่องขัดผิวโลหะ ดังภาพที่ 2 (ฉ)

## 4. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ชิ้นงานทดสอบเป็นเหล็ก S45C หรือเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาจากเฟสไดอะแกรม (FeC Diagram) โดยการเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM A480 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ยาว 20 มิลลิเมตร โดยเปรียบเทียบกับความเร็วรอบที่ 300, 600, 900, 1,200 และ 1,500 รอบ/นาที (มานพ, 2555) และทำการเริ่มต้นขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 360, 600 และ 1,000 โดยทำการขัดโลหะด้วยการจับเวลา 5 นาที และขัดด้วยผงอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน เป็นเวลา 3 นาที เพื่อเปรียบเทียบผลจากการขัดผิวโลหะของรอยกระดาษทรายที่เหลือจากการขัด ดังภาพที่ 3 (ก) และความมันวาวที่ผิว ดังภาพที่ 3 (ข) ซึ่งจากภาพใช้เครื่องถ่ายภาพเป็นตัวสะท้อนให้เห็นความมันเงาที่ผิว หากผิวไม่มีความมันเงา จะไม่มีภาพเครื่องถ่ายภาพปรากฏขึ้นที่ผิว (ณัฐ, 2546) ซึ่งแต่ละตัวแปรจะทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำการทดลอง แล้วนำชิ้นงานที่ทำการขัดเสร็จแล้วไปทำการประเมินความพึงพอใจจากผู้ชำนาญการด้านโลหะวิทยาจำนวน 7 คน จากวิทยาลัย 3 แห่ง (ชนากร และสุชาติ, 2564) แล้วจึงนำผลที่ได้มาทำการเก็บข้อมูล



(ก)

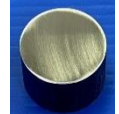
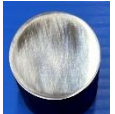
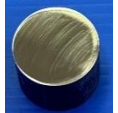
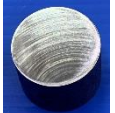
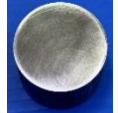
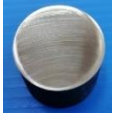
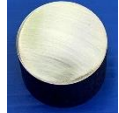
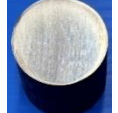
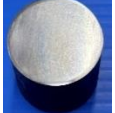


(ข)

ภาพที่ 3 (ก) รอยกระดาษทรายที่เหลือจากการขัด และ (ข) ความมันวาวที่ผิว

จากการหาประสิทธิภาพของเครื่องมือผลการทดสอบดังตารางที่ 1 พบว่า การขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 360 ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการขัด คือ 1,200 และ 1,500 รอบ/นาที จากการทดสอบขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการขัด คือ 900, 1,200 และ 1,500 รอบ/นาที และจากการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,000 ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการขัด คือ 900, 1,200 และ 1,500 รอบ/นาที อย่างไรก็ตามจากการศึกษา พบว่า ขนาดของกระดาษทรายและความเร็วรอบที่เหมาะสมในการเลือกไปใช้งาน คือ กระดาษทรายเบอร์ 1,000 และความเร็วรอบที่ 1,200 รอบ/นาที ซึ่งมีผลจากผู้เชี่ยวชาญประเมินความพึงพอใจผ่านทั้งหมด 7 คน โดยการพิจารณาจากความมันเงาของผิวหน้าชิ้นงาน ซึ่งสอดคล้องกับ (ณัฐ, 2546) ซึ่งชิ้นทดสอบจะมีความเงาใสคล้ายกระจก โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความเงา (Gloss meter) รุ่น STM-1130 B (MG6-SA) และพิจารณาจากจำนวนของรอยที่ขัด ที่ทำการตรวจสอบด้วยวิธีพินิจ

**ตารางที่ 1** ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญ โดยครูชำนาญการจำนวน 7 คน

| ความเร็วรอบ<br>(รอบ/นาที)  | จำนวนผู้เชี่ยวชาญ (คน)                                                              |      |   |                                                                                     |      |   |                                                                                       |      |   |    |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|---|-------------------------------------------------------------------------------------|------|---|---------------------------------------------------------------------------------------|------|---|----|
|                            | กระดาษทรายเบอร์ 360                                                                 |      |   | กระดาษทรายเบอร์ 600                                                                 |      |   | กระดาษทรายเบอร์ 1,000                                                                 |      |   |    |
| 300                        |  | ผ.   | - |  | ผ.   | 4 |  | ผ.   | - |    |
|                            |                                                                                     | ม.ผ. | 7 |                                                                                     | ม.ผ. | 3 |                                                                                       | ม.ผ. | 7 |    |
| 600                        |  | ผ.   | - |  | ผ.   | 4 |  | ผ.   | - |    |
|                            |                                                                                     | ม.ผ. | 7 |                                                                                     | ม.ผ. | 3 |                                                                                       | ม.ผ. | 7 |    |
| 900                        |  | ผ.   | 4 |  | ผ.   | 5 |  | ผ.   | 4 |    |
|                            |                                                                                     | ม.ผ. | 3 |                                                                                     | ม.ผ. | 2 |                                                                                       | ม.ผ. | 3 |    |
| 1,200                      |  | ผ.   | 5 |  | ผ.   | 6 |  | ผ.   | 7 |    |
|                            |                                                                                     | ม.ผ. | 2 |                                                                                     | ม.ผ. | 1 |                                                                                       | ม.ผ. | - |    |
| 1,500                      |  | ผ.   | 6 |  | ผ.   | 5 |  | ผ.   | 5 |    |
|                            |                                                                                     | ม.ผ. | 1 |                                                                                     | ม.ผ. | 2 |                                                                                       | ม.ผ. | 2 |    |
| จำนวน<br>ผู้เชี่ยวชาญ (คน) | คะแนนเฉลี่ย                                                                         |      |   |                                                                                     |      |   |                                                                                       |      |   |    |
|                            | 1                                                                                   | 2    | 3 | 4                                                                                   | 5    | 6 | 7                                                                                     | 8    | 9 | 10 |
|                            | 0                                                                                   | 0    | 0 | 0                                                                                   | 0    | 0 | 2                                                                                     | 2    | 3 | 0  |

\*หมายเหตุ เกณฑ์การให้คะแนน 1-7 หมายถึง ไม่ผ่าน และคะแนน 8-10 หมายถึง ผ่าน

## 5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากการออกแบบและพัฒนาเครื่องขัดผิวโลหะ พบว่า ขนาดของกระดาดทรายและความเร็วรอบที่เหมาะสมในการเลือกไปใช้งาน คือ กระดาดทรายเบอร์ 1,000 เนื่องจากความละเอียดของเม็ดกระดาดทรายสูง จึงทำให้กระบวนการขัดผิวหน้าสุดท้ายมีความมันเงาของผิวมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ (ธนากร และสุชาติ, 2564) ซึ่งได้ทำการศึกษารื่อง การออกแบบและสร้างเครื่องขัดชิ้นงานแบบจานคู่และความเร็วรอบที่เหมาะสมอยู่ที่ 1,200 รอบ/นาที เนื่องจากความเร็วมากเกินไปทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานมีลักษณะเป็นฝ้า ซึ่งเกิดจากชิ้นงานมีความร้อนขณะทำการขัดที่ความเร็วสูง (Yongsong & Bharat, 1996) และที่ความเร็วรอบน้อยเกินไปทำให้ผิวหน้าชิ้นงานทดสอบเป็นรอยและไม่มีความมันเงา เนื่องจากกระบวนการขัดไม่สามารถจัดรอยลึกออกได้หมด (Jianfeng & David, 2001) และผลการประเมินความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญ ทำการประเมินให้คะแนนระดับ 8 จำนวน 2 คนและระดับ 9 จำนวน 3 คน ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ผ่าน การอย่างไรก็ตาม จากการออกแบบและพัฒนาเครื่องขัดผิวโลหะ สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ สามารถใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนเสมือนจริงทดแทนเครื่องที่ทำการจำหน่ายในท้องตลาดได้ และมีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำกว่าเครื่องในท้องตลาด ซึ่งสอดคล้องกับ (ไพรัช และคณะ, 2552) ซึ่งได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง การปรับปรุงความหยาบผิวด้วยขนาดผงขัดและเส้นทางการขัดที่เหมาะสม

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก ที่ให้ความสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย รวมไปถึงขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ และมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ให้ข้อมูลองค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องขัดผิวโลหะ ช่วยเหลือในการออกแบบและพัฒนาเครื่องขัดผิวโลหะและการเก็บผลวิจัย สุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้คำแนะนำงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

## 7. เอกสารอ้างอิง

- กวี หวังนิเวศน์กุล. (2556). **วัสดุวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์รุ่งแสงการพิมพ์.
- ณัฐ แก้วสกุล. (2546). **การสร้างและหาประสิทธิภาพของเครื่องขัดชิ้นงาน เพื่อทดสอบโครงสร้างจุลภาคแบบกึ่งอัตโนมัติ**. (วิทยานิพนธ์). สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ.

- นรารักษ์ บุตรชา, สุรเชษฐ์ ช้อนกลิ่น, สุรัตน์ วรรณศรี, สุรินทร์ มณีศรี และธวัช วิวัฒน์เจริญ. (2558, กันยายน). **เครื่องขัดเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับงานวัสดุ**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 6, วิทยาลัยบัณฑิตเอเชีย, ขอนแก่น.
- บรรเลง ศรีนิล และประเสริฐ ก้วยสมบูรณ์. (2523). **ตารางงานโลหะ**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- มานพ ตันตระกูลบัณฑิต. (2555). **งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม** (พิมพ์ครั้งที่ 13). กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- มานพ ตันตระกูลบัณฑิต และสำลี แสงห้าว. (2537). **วัสดุช่างอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- วรวิทย์ อังภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน. (2556). **การออกแบบเครื่องจักรกล 1**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด.
- วิวัฒน์ ไตรนิล. (2558). **โลหะวิทยา**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด.
- วีระวัฒน์ ทองงาม และจำนง ชูด้วง. (2548). **สร้างและพัฒนาเครื่องขัดกระดาษทราย** (รายงานวิจัย). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตลำปาง, ลำปาง.
- ธนากร เกียรติขวัญบุตร และสุชาติ จันทรมณย์. (2564). การออกแบบและสร้างเครื่องขัดชิ้นงานแบบจานคู่. **วารสารวิชาการที่ประชุมสภาข้าราชการ พนักงาน และลูกจ้างมหาวิทยาลัยแห่งประเทศไทย**, 10(3). 175-185.
- ไพลิน ฤกษ์จิรสวัสดิ์. (2555). **หลักพื้นฐานของกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็ก : Fundamentals of Heat Treatment of Steels**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ, ชัญญาพันธ์ วิรุฬห์ศรี และศุภวัฒน์ เจียมลักษณะไพศาล. (2552, พฤศจิกายน). การปรับปรุงความหยาบผิวด้วยขนาดผงขัดและเส้นทางการขัดที่เหมาะสม. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23**, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, จังหวัดเชียงใหม่
- Jianfeng, L., & Davi, A. (2001). Material Removal Mechanism in Chemical Mechanical Polishing: Theory TRANSACTIONS and ON Modeling, **IEEE SEMICONDUCTOR MANUFACTURING**, 14(2). 112-133.
- Yongsong, X., & Bharat, B. (1996). Effects of particle size, polishing pad and contact pressure in free abrasive polishing. **Wear**, 200(1-2), pp. 281-295.

## การพัฒนาเครื่องย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติก DEVELOPMENT OF PLASTIC BOTTLES SHREDDER AND BRIQUETTING MACHINE

กฤติธฤต ทองสิน<sup>1</sup>, สุรพงษ์ งามัญจิตร<sup>1\*</sup>, วันวิสาข์ กาญจนารณ์<sup>1</sup>, กัญฐภัทร ไชยแสน<sup>2</sup>

Kridtharit Thongsin<sup>1</sup>, Surapong Ramanchit<sup>1\*</sup>, Wanwisa Kanjanaporn<sup>1</sup>,

Kanthapat Chaiyasaen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา เขตธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10600

<sup>2</sup>วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210

<sup>1</sup>Faculty of Engineering and Industrial Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University,

Thon Buri, Bangkok, Thailand, 10600

<sup>2</sup> College of Innovative Technology and Engineer, Dhurakij Pundit University, Lak Si, Bangkok, Thailand, 10210

\*Corresponding author e-mail: surapong\_ram@hotmail.com

วันที่เข้าระบบ 13 มีนาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 26 กรกฎาคม 2567

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาเครื่องย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติก โดยงานวิจัยได้ออกแบบออกแบบชุดใบมีดย่อยเป็นลักษณะการเฉือน (Shearing) มีระบบอัดก้อนพลาสติกด้วยระบบนิวแมติกส์ ซึ่งก้อนพลาสติกมีขนาดกว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร สูง 8 เซนติเมตร การทดสอบเครื่องย่อยและอัดก้อนพลาสติกจะใช้ขวดพลาสติกประเภท PET และ HDPE โดยทำการทดสอบหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอัดก้อนขวดพลาสติกให้จับตัวกันเป็นก้อนสี่เหลี่ยม จากการทดลองพบว่าขวดประเภท PET มีอุณหภูมิเหมาะสมที่ 80 องศาเซลเซียส และขวดประเภท HDPE มีอุณหภูมิเหมาะสมที่ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขณะที่กระบวนการย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติกที่ดีที่สุดพบว่าขวดพลาสติกประเภท PET ใช้อุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส เวลาเฉลี่ย 19.41 นาที และขวดพลาสติกประเภท HDPE ใช้อุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเฉลี่ย 17.14 นาที ตามลำดับ ซึ่งพลาสติกที่ได้มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมจับตัวกันหนาแน่น และอัตราการทำงานของเครื่องตัดและอัดก้อนพลาสติกด้วยระบบนิวแมติกส์ที่เหมาะสมที่สุด พบว่าพลาสติกประเภท PET มีอัตราการทำงานที่ 3.09 ก้อนต่อชั่วโมง และพลาสติกประเภท HDPE มีอัตราการทำงานที่ 3.5 ก้อนต่อชั่วโมง ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** เครื่องย่อย, เครื่องอัดก้อน, ระบบนิวแมติกส์

### Abstract

The objectives of this research are to develop a plastic bottle shredder and pelletizer using a pneumatic system. The research has designed a set of shredder blades in a shearing style with a plastic briquetting scheme using a pneumatic system. The plastic cube is 25 centimeters wide, 25 centimeters long, and 8 centimeters high. The test of the plastic shredder and pelletizing machine uses PET and HDPE plastic bottles. The test is conducted to determine the appropriate temperature for compressing plastic bottles into square pieces. The results showed that PET bottles had an optimum temperature of 80 degrees Celsius, while HDPE bottles had an optimum temperature of 70 degrees Celsius. The best process for cutting and pelletizing plastic bottles showed that PET plastic bottles used a temperature of 80 degrees Celsius in an average time of 19.41 minutes, and HDPE plastic bottles used a temperature of 70 degrees Celsius in an average time of 17.14 minutes. The obtained plastic is densely packed into rectangular lumps, and the working rate of the pneumatic plastic cutting and briquetting machine is the most suitable. It was found that PET plastic had a working rate of 3.09 bales per hour and HDPE plastic had a working rate of 3.5 bales per hour, respectively.

**Keywords:** Shredder machine, Briquetting machine, Pneumatic system

### 1. บทนำ

ปัจจุบันพลาสติกกลายเป็นมลพิษที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมในหลายๆประเทศ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยมากมายได้ศึกษาวิจัยในการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ การแปรพลาสติกจากขยะเป็นชิ้นงานที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันได้ สำหรับในประเทศไทยได้มีการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องย่อยพลาสติกอย่างมาก เช่น (กุลฑล, 2549) ออกแบบและพัฒนาเครื่องย่อยพลาสติกเพื่อศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลกับการย่อยขวดพลาสติกมีความสามารถในการทำงานย่อยพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีน (PE) และพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) (นิลวัฒน์, 2554) การออกแบบและสร้างเครื่องย่อยพลาสติกมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนของการรีดขวดพลาสติกและส่วนของชุดย่อยขวดพลาสติกมีใบมีดจำนวน 3 ใบ ทดสอบย่อยขวดพลาสติกประเภทโพลีสไตรีน พบว่าสามารถย่อยเพื่อลดขนาดพลาสติกปริมาณ 1,600 กรัม ใช้เวลาในการย่อยเฉลี่ย 53.18 นาที และย่อยขวดนมเปรี้ยวพลาสติกประเภทโพลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูง พบว่าเครื่องย่อยพลาสติกที่สร้างขึ้นนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการย่อยลดขนาดขวดนมเปรี้ยว ต่อมา (ศราวุธ, 2556) ได้มีการออกแบบและสร้าง

เพื่อทดสอบเครื่องย่อยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดขยะของชุมชนเทศบาลเมืองขลุง จังหวัด จันทบุรี เพื่อเป็นการประหยัดพื้นที่ในการจัดเก็บ การทดสอบหลังการย่อยพบว่าพื้นที่ 1 ลูกบาศก์ เมตร สามารถจัดเก็บได้ 192 กิโลกรัม และวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีน (PE) สามารถคืนทุนในระยะเวลา 24 วัน พลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) มีระยะคืนทุนที่ 1 เดือน 9 วัน นอกจากนี้ (ปวีณ และคณะ, 2563) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องย่อยพลาสติกเพื่อลดขนาดของขยะที่เกิดจากพลาสติกและศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องย่อยสำหรับพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลตมีความเร็วรอบเหมาะสมในการย่อยที่ 47 รอบต่อนาที มีขนาดรูตะแกรง 12 มิลลิเมตร สามารถย่อยได้ 2.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการย่อยเท่ากับ 73 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนมีความเร็วรอบเหมาะสมในการย่อยที่ 27 รอบต่อนาที ขนาดรูตะแกรง 12 มิลลิเมตร สามารถย่อยได้ 2.11 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการย่อยเท่ากับ 62 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และในต่างประเทศก็มีการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างเครื่องย่อยขวดพลาสติก (Tolulope & Olukunle, 2016; Vijay *et al.*, 2018; Jaypalsinh *et al.*, 2020; Sunil *et al.*, 2020; Vaibhav *et al.*, 2020; Raji *et al.*, 2020; Noor *et al.*, 2021; Suliman & Johar, 2022; Frans *et al.*, 2022; Vikramshimha *et al.*, 2023; Pratik *et al.*, 2023 ) เนื่องจากพลาสติกมีการใช้อย่างแพร่หลายในเกือบทุกภาคส่วน จึงกลายเป็นภัยคุกคามต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด เช่น (Oluwatobi *et al.*, 2019) ได้พัฒนาเครื่องย่อยขวดพลาสติกประเภท PET ย่อยขวดพลาสติกให้ได้ขนาดตามที่ต้องการซึ่งมีขนาดพื้นที่ 0.001 ตารางเมตร (10 มิลลิเมตร X10 มิลลิเมตร) โดยการพัฒนาของการวิจัยนี้ประกอบด้วยเครื่องล้างทำความสะอาดและบดย่อยขวดพลาสติกด้วยใบมีดที่มีลักษณะการหมุนเหมือนสว่าน เครื่องสามารถบดย่อยขวดพลาสติกได้ 50-75 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มีความเร็วรอบการทำงานที่ 187.5, 273.8 และ 350.2 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนที่ 1.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง 1.8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และ 2.4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ผลการทดสอบการทดสอบพบว่าอัตราส่วนของพลาสติกบดย่อยอยู่ที่ 1.8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 350.2 รอบต่อนาที และประสิทธิภาพการบดย่อย 60.01% ประสิทธิภาพของการรีไซเคิลเครื่องบดย่อยและเครื่องล้างทำความสะอาดอยู่ที่ 93.73% ที่ 273.8 รอบต่อนาที และอัตราการป้อน 1.8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยมีอัตราการป้อนสูงสุด 17.9% ที่อัตราการป้อน 2.4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และ 185.7 รอบต่อนาที เครื่องย่อยและเครื่องล้างขวดพลาสติกสามารถใช้ร่วมกับเครื่องอัดเม็ดพลาสติกในโรงงานรีไซเคิลขยะได้ นอกจากนั้น (Jin *et al.*, 2022) ศึกษาถึงกลไกการสึกหรอและประสิทธิภาพของใบมีดย่อยพลาสติกประเภท PET ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนร่วมกับรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และการทดสอบความแข็ง พบว่าการสึกหรอเกิดขึ้นจากสาเหตุของการเสียดสี การออกซิเดชัน และมีประสิทธิภาพในการรีไซเคิลที่  $97.39 \pm 0.04 \%$  ประสิทธิภาพการย่อยที่  $69.53 \pm 1.32 \%$  และมีประสิทธิภาพการบำรุงดูแลใบมีดที่

$2.61 \pm 0.04$  % และจำนวนใบมีดย่อยน้อยจะมีการสึกหรอของใบมีดมาก (Ejiko *et al.*, 2022) ทำการพัฒนาเครื่องย่อยเพื่อกระบวนการรีไซเคิลขวดพลาสติกเหลือทิ้งพบว่ามีประสิทธิภาพของเครื่องที่ 34% เหมาะสำหรับการย่อยขยะพลาสติก

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นที่ได้กล่าวมานั้นการศึกษาค้นคว้าส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาเฉพาะเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างเพื่อการบดย่อยเพียงอย่างเดียว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องตัดและอัดก้อนขวดพลาสติกโดยใช้ระบบนิวแมติกส์ เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับพลาสติกที่ใช้แล้ว สะดวกในการจัดเก็บ ขนส่งไปยังโรงงานอุตสาหกรรมได้ง่าย และสามารถนำไปแปรสภาพเพื่อใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

## 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนาเครื่องย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติกโดยใช้ระบบนิวแมติกส์

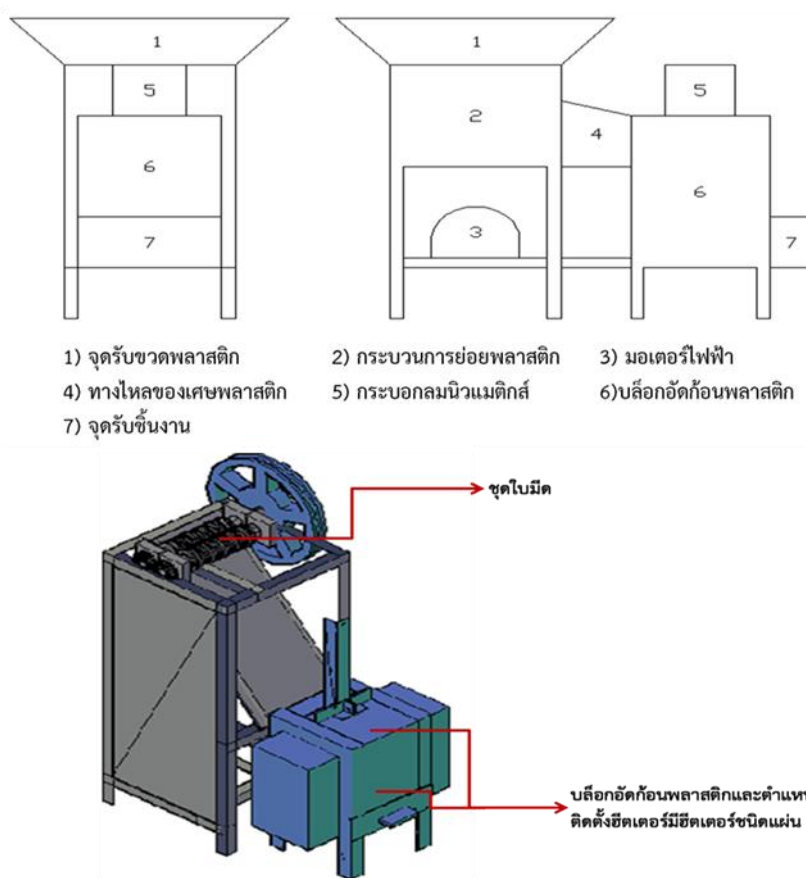
2.2 เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอัดก้อนขวดพลาสติกประเภท PET และขวดพลาสติกประเภท HDPE

## 3. วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยการพัฒนาเครื่องย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติก เป็นการย่อยขวดพลาสติกประเภท PET (Polyethylene terephthalate) และประเภท HDPE (High density polyethylene) ให้เป็นชิ้นเล็ก และทำการอัดเป็นก้อนสี่เหลี่ยมเพื่อเพิ่มมูลค่าขวดพลาสติกที่ใช้แล้ว และสะดวกในการนำไปรีไซเคิลหรือการขนส่งไปยังโรงงานอุตสาหกรรม โดยวิธีการดำเนินงานวิจัยดังนี้

### 3.1 การพัฒนาเครื่องย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติก

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาเครื่องย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติก เพื่อให้สามารถย่อยขวดพลาสติกและอัดเป็นก้อนสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร งานวิจัยนี้ใช้กระบอบกลมนิวแมติกส์ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ลมอัดหรืออากาศเป็นตัวกลางในการส่งกำลัง สำหรับการอัดก้อนขวดพลาสติกที่ผ่านกระบวนการย่อยเป็นเส้นแล้ว ภายในของระบบอัดก้อนนั้นประกอบด้วยฮีตเตอร์แผ่น หรือ Strip Heater ขนาด 800 วัตต์ ซึ่งเป็นฮีตเตอร์ที่ให้ความร้อนกับชิ้นงานโดยการแนบติดกับชิ้นงาน ให้ความร้อนคงที่และสม่ำเสมอ ขนาดความกว้าง 25 เซนติเมตร ความยาว 25 เซนติเมตร และความหนา 1 เซนติเมตร ติดตั้งอยู่ในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของบล็อกอัดก้อนพลาสติก ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติก

3.1.1 กระบอกลมนิวแมติกส์ เป็นอุปกรณ์ลมที่ใช้ลมทำให้ก้านกระบอกลมเคลื่อนที่ไปในแนวเส้นตรงหรือหมุน 90, 180, 270 หรือ 360 องศา เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานในรูปแบบความดันลมให้เป็นพลังงานกลในรูปแบบของการเคลื่อนที่ โดยสมการสำหรับการคำนวณหาแรง และขนาดของลูกสูบกระบอกลมนิวแมติกส์ สามารถคำนวณแรงได้จากสมการที่ (1)

$$F = P \times A \quad (1)$$

เมื่อ  $F$  คือ แรงอัดของกระบอกลม มีหน่วยเป็นนิวตัน ( $N$ )  
 $P$  คือ ความดันของลม มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร ( $N/m^2$ )  
 $A$  คือ พื้นที่ลูกสูบที่รับความดัน มีหน่วยเป็น ตารางเมตร ( $m^2$ )



ภาพที่ 2 ชุดควบคุมกระบอกลมนิวแมติกส์

3.1.2 การออกแบบชุดใบมีดย่อยขวดพลาสติก ในงานวิจัยนี้ออกแบบใบมีดโดยใช้หลักการของการเฉือน (Shearing) ซึ่งอาศัยแรง 2 ทิศทางวิ่งออกจากวัตถุเป็นการผสมกันระหว่างการตัดและการกดอัด ซึ่งแรงบิดและประสิทธิภาพการบดย่อยสูง หากเฉือนบางและคมเรียกว่า การตัด หากมีลักษณะหนาและทุ่ย เรียกว่าการอัด งานวิจัยได้ออกแบบใบมีดตัดเป็นลักษณะเพลาคู๋ ใช้เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาว 42 เซนติเมตร และความยาว 33 เซนติเมตร ตามลำดับ ใบมีดมีขนาดความหนา 5 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบมีด 63 มิลลิเมตร และ 51 มิลลิเมตร ตามลำดับ วางสลับฟันปลากันจำนวนด้านอย่างละ 20 ใบมีด ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยความเค้นเฉือนเป็นผลของแรงที่กระทำต่อขวดพลาสติกทำให้เกิดการเสียรูปของแรงเฉือนของวัสดุในระนาบขนานกับทิศทางของแรงที่กระทำ เมื่อย่อยพลาสติก ค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) ของใบมีดจะมากกว่าค่าความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้ของพลาสติก (Allowable Shear Stress) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$\tau = F/A \quad (2)$$

|       |        |                                                        |
|-------|--------|--------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $\tau$ | คือ ความเค้นเฉือน มีหน่วยเป็นนิวตัน ( $N/m^2$ )        |
|       | $F$    | คือ แรงของใบมีด มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร ( $N$ ) |
|       | $A$    | คือ พื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็น ตารางเมตร ( $m^2$ )     |



ภาพที่ 3 ชุดใบมีดย่อยขวดพลาสติก

### 3.2 การทดสอบเครื่องย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติก

การทดสอบเครื่องย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติก ด้วยเครื่องย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติกโดยใช้ระบบนิวแมติกส์ น้ำหนัก 1000 กรัม งานวิจัยนี้ได้กำหนดชนิดของขวดพลาสติก คือ ขวดพลาสติกประเภท PET (Polyethylene terephthalate) ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถทนแรงกระแทกได้ดี ไม่เปราะแตกง่ายและใส และประเภท HDPE (High density polyethylene) มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายตรงค่อนข้างแข็งแต่ยืดได้มาก ไม่แตกง่าย มาทดสอบย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติกโดยใช้ระบบนิวแมติกส์ บันทึกเวลาที่ใช้ในการย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติกและศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอัดก้อน โดยกำหนดอุณหภูมิในการทดสอบคือ 60 65 70 75 80 85 90 และ 95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



ขวดพลาสติกประเภท PET



ขวดพลาสติกประเภท HDPE

ภาพที่ 4 ประเภทของขวดพลาสติก

#### 4. ผลการวิจัย

จากการทดสอบเครื่องย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติกโดยใช้ระบบนิวแมติกส์ โดยทดสอบย่อยขวดพลาสติกประเภท PET (Polyethylene terephthalate) และประเภท HDPE (High density polyethylene) น้ำหนัก 1000 กรัม ซึ่งลักษณะของขวดพลาสติกที่ผ่านกระบวนการย่อยจะมีลักษณะเป็นเส้นยาวตามขนาดความยาวของขวดพลาสติก เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ออกแบบเครื่องย่อย โดยออกแบบลักษณะการย่อยคล้ายการย่อยกระดาษ ซึ่งพลาสติกที่ย่อยเป็นเส้นจะมีขนาดเส้นกว้าง 1.5 เซนติเมตร และเมื่อผ่านกระบวนการย่อยเส้นพลาสติกจะไหลลงมาสู่กล่องแม่พิมพ์ หรือบล็อกสำหรับการอัดก้อนด้วยระบบนิวแมติกส์มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร สูง 8 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3 และภาพที่ 4 แสดงชิ้นงานที่ย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติกประเภท PET และขวดพลาสติกประเภท HDPE ตามลำดับ



ภาพที่ 3 ชิ้นงานอัดก้อนขวดพลาสติกประเภท PET



ภาพที่ 4 ชิ้นงานอัดก้อนขวดพลาสติกประเภท HDPE

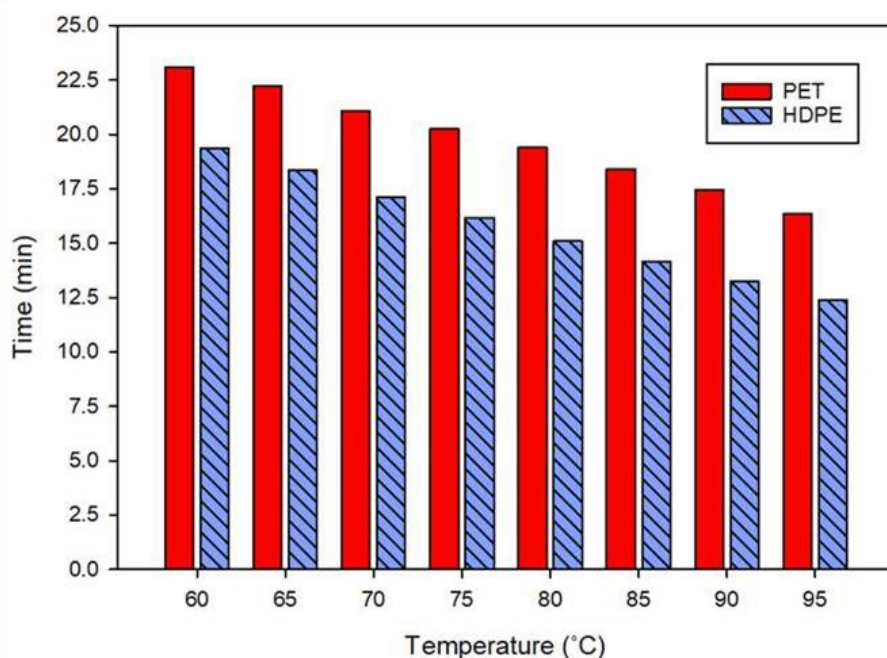
ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการอัดก้อนขวดพลาสติกประเภท PET

| อุณหภูมิการอัดก้อนพลาสติก<br>(องศาเซลเซียส) | เวลาการย่อยและ<br>อัดก้อนพลาสติก<br>(นาทีก) | ผลการทดสอบอัดก้อนพลาสติก                          |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 60                                          | 23.11                                       | พลาสติกไม่อ่อนตัวและไม่เกาะตัวเป็นก้อน            |
| 65                                          | 22.23                                       | พลาสติกไม่อ่อนตัวและไม่เกาะตัวเป็นก้อน            |
| 70                                          | 21.10                                       | พลาสติกอ่อนตัวแต่ไม่เกาะตัวเป็นก้อน               |
| 75                                          | 20.26                                       | พลาสติกอ่อนตัวแต่ไม่เกาะตัวเป็นก้อน               |
| 80                                          | 19.41                                       | พลาสติกเกาะตัวกันเป็นก้อน                         |
| 85                                          | 18.41                                       | พลาสติกเกาะตัวกันเป็นก้อน                         |
| 90                                          | 16.33                                       | พลาสติกสเกาะตัวกันเป็นก้อนมีบางส่วนเริ่ม<br>ละลาย |
| 95                                          | 16.36                                       | พลาสติกสเกาะตัวกันเป็นก้อนมีบางส่วนเริ่ม<br>ละลาย |

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการอัดก้อนขวดพลาสติกประเภท HDPE

| อุณหภูมิการอัดก้อนพลาสติก<br>(องศาเซลเซียส) | เวลาการย่อยและ<br>อัดก้อนพลาสติก<br>(นาทีก) | ผลการทดสอบอัดก้อนพลาสติก            |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------|
| 60                                          | 19.36                                       | พลาสติกอ่อนตัวแต่ไม่เกาะตัวเป็นก้อน |
| 65                                          | 18.37                                       | พลาสติกอ่อนตัวแต่ไม่เกาะตัวเป็นก้อน |
| 70                                          | 17.14                                       | พลาสติกอ่อนตัวเกาะตัวกันเป็นก้อน    |
| 75                                          | 16.18                                       | พลาสติกอ่อนตัวเกาะตัวกันเป็นก้อน    |
| 80                                          | 15.12                                       | พลาสติกอ่อนตัวเกาะตัวกันเป็นก้อน    |
| 85                                          | 14.16                                       | พลาสติกอ่อนตัวเกาะตัวกันเป็นก้อน    |
| 90                                          | 13.23                                       | พลาสติกละลายติดภายในบล็อกแม่พิมพ์   |
| 95                                          | 12.37                                       | พลาสติกละลายติดภายในบล็อกแม่พิมพ์   |

จากผลการทดสอบการย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติกประเภท PET และขวดพลาสติกประเภท HDPE สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการอัดก้อนและเวลารวมทั้งหมดของการย่อยและอัดก้อนพลาสติก ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 อุณหภูมิสำหรับการอัดก้อนขวดพลาสติกและเวลาที่ใช้สำหรับการย่อยและอัดก้อนพลาสติก  
ประเภท PET และขวดพลาสติกประเภท HDPE

จากภาพที่ 5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสำหรับการอัดก้อนขวดพลาสติกและเวลาที่ใช้สำหรับการย่อยและอัดก้อนพลาสติก ผลจากการทดสอบพบว่า ขวดพลาสติกประเภท HDPE ใช้อุณหภูมิและเวลาการทดลองการย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติกใช้เวลาน้อยกว่าขวดพลาสติกประเภท PET เนื่องจากขวดพลาสติกประเภท PET มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีความเหนียวทนทาน และมีความยืดหยุ่นต่อแรงกระทบกระแทก จึงไม่แตกเมื่อถูกแรงกดดัน และทนต่ออุณหภูมิสูงได้ถึง 220°C กว่าขวดพลาสติกประเภท HDPE ที่สามารถทนความร้อนได้เพียงเล็กน้อย ดังนั้นจากกราฟในภาพที่ 5 กระบวนการย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติกที่ดีที่สุดพบว่าขวดพลาสติกประเภท PET ใช้อุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส เวลาเฉลี่ย 19.41 นาที และขวดพลาสติกประเภท HDPE ใช้อุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเฉลี่ย 17.14 นาที ตามลำดับ ซึ่งพลาสติกที่ได้มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมจับตัวกันหนาแน่น และอัตราการทำงานของเครื่องตัดและอัดก้อนพลาสติกด้วยระบบนิวแมติกส์ที่เหมาะสมที่สุด พบว่าขวดพลาสติกประเภท PET มีอัตราการทำงานที่ 3.09 ก้อนต่อชั่วโมง และขวดพลาสติกประเภท HDPE มีอัตราการทำงานที่ 3.5 ก้อนต่อชั่วโมง ตามลำดับ

## 5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การพัฒนาเครื่องย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติก เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอัดก้อน และการศึกษาเวลารวมทั้งกระบวนการของการย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติกประเภท PET และประเภท HDPE ผลการทดสอบกระบวนการย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติกที่ได้มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมมีขนาดความกว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร สูง 8 เซนติเมตร พบว่าขวดพลาสติกประเภท PET มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอัดก้อนที่ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาการทดลองการย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติก 19.41 นาที อัตราการทำงานที่ 3.09 ก้อนต่อชั่วโมง และขวดพลาสติกประเภท HDPE มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอัดก้อนที่ 70 องศาเซลเซียส พลาสติกสามารถอ่อนตัวได้ที่อุณหภูมินี้ ใช้เวลาการทดลองการตัดและอัดก้อนขวดพลาสติก 17.14 นาที มีอัตราการทำงานที่ 3.5 ก้อนต่อชั่วโมง การพัฒนาเครื่องย่อยและอัดก้อนขวดพลาสติกสามารถเพิ่มความสะดวกในการจัดเก็บและสามารถขนส่งขวดพลาสติกไปยังโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อนำไปรีไซเคิลเป็นเม็ดพลาสติกได้ง่ายยิ่งขึ้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา สำหรับสถานที่ในการทำการวิจัย

## 7. เอกสารอ้างอิง

- กฤษณาล ทองดื้อ. (2549) การออกแบบและพัฒนาเครื่องย่อยพลาสติก. (รายงานวิจัย). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี.
- นิลวัฒน์ พัฒนพงษ์. (2554). การสร้างเครื่องย่อยขวดพลาสติก. (รายงานวิจัย). มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, ลำปาง.
- Ejiko, S.O., Adewuyi, R.A. & Maliki, O.B. (2022). Shredding Machine Development for Recycling Process of Waste Plastic Bottles. **Research and Reviews: Journal of Engineering and Technology**. 11(5). 5-16.
- Frans, M., Aris, A., Ama, B. & Yudith, E. Mase. (2022. October). **Design, Fabrication, and Performance Evaluation of Shredding Machines for Shredding Plastic Bottles and Cups Waste**. In Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Applied Science and Technology on Engineering Science, West Java, Indonesia. Doi: <https://orcid.org/0000-0003-0882-615X>.

- Jaypalsinh, R., Sahil, S., Mit, S., Mikul, P., & Harshil, M. (2020). Design and Fabrication of Plastic Bottle Shredder. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, 7(4), 1738-1745.
- Jeyalakshmi, C., Alagarsamy, M., Kalaiarasan, R., Easwaran, M., Thangavel, Y., & Paramasivam, P. (2022). Plastic Waste Management System Using Metal Shredder for Clean Environment. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2022(1), 1-7. Doi: 10.1155/2022/1598868.
- Jin, H.W., Wong, M.J.K., Saffuan, A.B., Bih, L.C., Gan, J.H.M., & Nancy, J.S. (2022). Wear Mechanisms and Performance of PET Shredder Blade with Various Geometries and Orientations. **Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) Machines**, 10(9), 760. Doi: <https://doi.org/10.3390/machines10090760>
- Noor, H.A.R., & Ahmad, N.H.M.K. (2021). Development of PET bottle shredder reverse vending machine. **International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration**, 8(74). 24-33.
- Oluwatobi, I.O., Damilola, A.O., & Olawale, O.O. (2019). Development of Shredding and Washing Machine for Polyethylene Terephthalate (PET) Bottles Pelitizer. **International Journal of Engineering Science and Application**, 3(2), 102-109.
- Pratik, A.S., Abhishek, R.S., Tushar, A.N., Prem, R.V., & Girish, S.M. (2023). Design and Fabrication of Plastic Shredder. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)**, 11(6), 181-187.
- Raji, A.N., Kuku, O.R., Ojo, S.S., & Hunvu, M.S. (2020). Design Development and Performance Evolution of Waste Plastic Shredder. **Journal of Production Engineering**, 23(1), 22-28.
- Suliman, M.S., & Johar, M.A. (2022). Development of Shredding Machine for Plastic Recycling. **Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering**, 3(1), 160-169.
- Sunil, M., Vishwas, N., Shivprakash, B., & Dipali, B. (2021). Design and Fabrication of Low Cost Plastic Shredder. **International Journal of Research in Engineering, Science and Management**, 4(5), 4-5.



- Tolulope, A.O. (2016). Design Consideration of a Plastic Shredder in Recycling Processes. **International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering**, 10(11), 1831-1834.
- Vaibhav, E., Swapnil, Y., Raut, S.V., & Kondhalkar, G.E. (2020). Case Study and Development of Plastic Shredding Machine. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, 7(5), 2367-2370.
- VijayAnanth, S., Sureshkumar, T.N., Dhanasekaran, C., & Aravindh, K.A. (2018). Design and Fabrication of Plastic Shredder Machine for Clean Environment. **International Journal of Management, Technology and Engineering**, 8(12), 4601- 4606.
- Vikramshimha, D., Venkatesh, P., Yugendhar, S.S., Prasanth, D., Kumar, S., & Naidu, J.R. (2023). Design and Fabrication of Plastic Shredder Machine. **International Journal of Research Publication and Reviews**, 4(6), 1816-1821.

การออกแบบและพัฒนาสเปรดชีตเพื่อการพยากรณ์ความต้องการปุ๋ย  
กรณีศึกษาร้านค้าปุ๋ย ABC ในจังหวัดสุโขทัย  
DESIGN AND DEVELOPMENT OF SPREADSHEET FOR FERTILIZER  
DEMAND FORECASTING: A CASE STUDY OF FERTILIZER STORE  
IN SUKHOTHAI PROVINCE

ณัฐพร ตังเจริญชัย

Nattaporn Tungcharoenchai

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

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

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

วันที่เข้าระบบ 13 ธันวาคม 2566

วันที่แก้ไขบทความ 12 มิถุนายน 2567

วันที่ตอบรับบทความ 14 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับพยากรณ์ความต้องการในการสั่งซื้อปุ๋ยเคมีด้วยภาษา วิซวลเบสิกฟอร์แอปพลิเคชัน (Visual basic for applications: VBA) ของร้านค้าปุ๋ยกรณีศึกษา ABC ในจังหวัดสุโขทัย ทั้งนี้เพื่อการ ทดสอบทวนสอบความถูกต้อง และความสามารถในการพยากรณ์ของแอปพลิเคชัน การวิจัยนี้จึงได้เลือกวิธีการพยากรณ์ที่แตกต่างกัน 3 วิธี ประกอบด้วย วิธีการพยากรณ์แบบถ่วงน้ำหนัก (Moving average: MA) วิธีการพยากรณ์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Single exponential smoothing: SES) และวิธีการพยากรณ์แบบถดถอย (Regression analysis: RA) ข้อมูลที่ใช้ในการพยากรณ์ในครั้งนี้ ได้รับจากร้านค้าการศึกษารวมประกอบด้วยข้อมูลเชิงสถิติปริมาณการสั่งซื้อของปุ๋ย 5 ชนิด ได้แก่ ปุ๋ยสิงห์บิน 36-0-0 ปุ๋ยสิงห์บิน 46-0-0 ปุ๋ยสิงห์บิน 20-8-8 ปุ๋ยม้าบิน 46-0-0 และปุ๋ยกระต่าย 16-20-0

จากการทดสอบและทวนสอบพบว่าแอปพลิเคชันสำหรับพยากรณ์ สามารถพยากรณ์ทั้ง 3 วิธีได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้หลังจากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าวิธีการพยากรณ์แบบถดถอยมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย ในการพยากรณ์ต่ำที่สุดในชุดข้อมูลของ ปุ๋ยสิงห์บิน 36-0-0 ปุ๋ยสิงห์บิน 46-0-0 และปุ๋ยสิงห์บิน 20-8-8 ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลการพยากรณ์ที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด ปุ๋ยม้าบิน 46-0-0 และปุ๋ยกระต่าย 16-20-0 ควรใช้วิธีการพยากรณ์แบบถ่วงน้ำหนัก และวิธีการพยากรณ์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล หลังจากการพยากรณ์ด้วยวิธีการที่เหมาะสมกับชุดข้อมูลในแต่ละชุด พบว่าค่าที่ได้จากการพยากรณ์มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 14.55 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้องการจริง

อนึ่งงานวิจัยครั้งนี้ทำเพื่อการศึกษาการพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับการพยากรณ์ และพยากรณ์ ยอดขายสินค้าปุ๋ยเพื่อการเกษตร เพื่อต่อยอดงานวิจัยนี้ ควรปรับเปลี่ยนส่วนนำเข้าข้อมูลให้เหมาะสม สำหรับสินค้าชนิดอื่นๆ เพื่อเอื้อต่อการประยุกต์ใช้ของผู้ใช้งาน สำหรับการพัฒนาแอปพลิเคชันอาจทำได้โดยการเพิ่มวิธีการพยากรณ์รูปแบบอื่นๆ ตลอดจนเพิ่มส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลนำเข้าเพื่อวิเคราะห์ การกระจายตัวของข้อมูล อันนำมาซึ่งการเลือกวิธีพยากรณ์ และการวัดผลพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพ ต่อไป

**คำสำคัญ:** การพยากรณ์, กรณีศึกษา, การพัฒนาแอปพลิเคชัน, ปุ๋ยเพื่อการเกษตร, วิชวลเบสคิฟอว์ แอปพลิเคชัน

### Abstract

This research aimed to develop the forecasting application for demand forecasting in ordering chemical fertilizer with Visual Basic for Applications (VBA) at ABC fertilizer store, a case study in Sukhothai province. For the application performance testing, verification, and validation, it used three different forecasting methods, including moving average (MA), single exponential smoothing (SES), and regression analysis (RA). For testing the data, it used five different instances of the fertilizer's demand, obtained from the case study store, including Sing-Bin 36-0-0, Sing-Bin 46-0-0, Sing-Bin 20-8-8, Mah-bin 46-0-0, and Kratai-bin 16-20-0.

From the application's performance testing, verification, and validation, it was able to correctly predict all forecasting methods. The regression analysis (RA) had the minimum mean absolute percentage error (MAPE) in forecasting the data set of fertilizers: Sing-Bin 36-0-0; Sing-Bin 46-0-0; and Sing-Bin 20-8-8. To minimize the forecasting error, the case study used Mah-bin 46-0-0 and Kratai-bin 16-20-0, and the appropriate forecasting method should use moving average (MA) and single exponential smoothing (SES). After forecasting each data set with appropriate methods and comparing it with the actual demand, the forecast error was less than 14.55% for all datasets.

Incidentally, in this research, we developed an application for fertilizer demand forecasting. For further study, the flexible data importation should be adaptable to contribute to other forecasting types. Other points of application development may be adding other forecasting methods as well as data distribution analysis functions,

which could lead to the appropriate forecasting method and effective forecasting assessment.

**Keywords:** Forecasting, Case study, Application development, Agriculture fertilizer, Visual Basic for Applications

## 1. บทนำ

เกษตรกรรมเป็นสิ่งที่อยู่คู่กับอารยธรรมของมนุษย์มาอย่างช้านาน การเพาะปลูกพืช เพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์ การทำเชื้อเพลิง ทำยารักษาโรค ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นพื้นฐานของผลิตภัณฑ์อื่นๆ ช่วยเสริมสร้างคุณภาพชีวิตของมนุษย์ ด้วยขนาดของประชากรโลกสะสมที่มีขนาดใหญ่และเติบโตอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคอุตสาหกรรมเกษตรในยุคปัจจุบันจำเป็นต้องพึ่งพาวิทยาการสมัยใหม่ เครื่องทุ่นแรง และสิ่งอำนวยความสะดวกด้านการเกษตรเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกษตรกรรมการเพาะปลูกพืชเชิงเดี่ยวที่ต้องเติมสารอาหารที่จำเป็นต่อการเพาะปลูกพืชผ่านสารอินทรีย์ ปุ๋ย อยู่เสมอ ส่งผลให้แนวโน้มการใช้ปุ๋ยทั่วโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีน้ำหนักการใช้รวมกว่า 136.94 ล้านตัน ในปี ค.ศ. 2010 กว่า 169.61 ล้านตันในปี 2010 และกว่า 201.84 ล้านตันในปี 2020 โดยทวีปเอเชียเป็นทวีปที่มีการใช้งานปุ๋ยมากที่สุดในโลก โดยมีปริมาณการใช้งานกว่า 105.44 ล้านตัน หรือกว่าร้อยละ 53.78 ของปริมาณทั้งหมดในปี ค.ศ. 2020 (Statista research department, 2023)

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในพื้นที่ที่มีศักยภาพด้านการเกษตร ด้วยลักษณะทางภูมิศาสตร์ของเขตพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ที่มีสภาพอากาศเหมาะสมต่อการทำเกษตรกรรม โดยพบว่าพลเมืองประมาณร้อยละ 60 ของประเทศ มีอาชีพเกษตรกรรมปลูกข้าวเป็นหลัก ด้วยพื้นที่เพาะปลูกกว่า 65 ล้านไร่ ให้ผลผลิตข้าวคิดเป็นมูลค่ากว่า 70,000 ล้านบาท ในแต่ละปี ทำให้ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตข้าวรายใหญ่ของโลก แต่ในขณะเดียวกันพบว่าเกษตรกรไทยที่มีอาชีพเกษตรกรยากจน ไม่ได้มีคุณภาพที่ดีเท่าที่ควร ทั้งนี้ด้วยราคาข้าวที่ตกต่ำ วัสดุจำเป็นต่อการเกษตรมีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับการปลูกพืชเชิงเดี่ยวทำให้ดินเสื่อมสภาพ จึงมีค่าใช้จ่ายในการเพาะปลูกและดูแลที่มากขึ้น จากข้อมูลทางสถิติปี พ.ศ. 2565 พบว่าประเทศไทยมีเกษตรกรทั้งสิ้น 7,146,264 ครัวเรือน (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2565) มีพื้นที่ปลูกข้าวทั้งสิ้น 68,722,388 ไร่ หรือคิดเป็นร้อยละ 46.04 ของพื้นที่การเกษตรทั้งหมด ซึ่งเป็นที่สังเกตว่าจำนวนพื้นที่ปลูกข้าวมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดจากเมื่อ 10 ปีที่ผ่านมา โดยเมื่อเปรียบเทียบกับปี พ.ศ. 2552 จะพบว่าลดลงกว่า 1,307,669 ไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562)

โดยหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้พื้นที่นาลดลงอย่างต่อเนื่องมาจากความไม่คุ้มทุนของการทำนา ด้วยความอุดมสมบูรณ์ที่ลดลงของนาข้าวเนื่องจากการทำเกษตรเชิงเดี่ยว ทำให้ผลผลิตข้าวต่อไร่มีจำนวน

ที่ลดลง เพื่อเติมสารอาหารในดินทำให้ชาวนาต้องใช้ปุ๋ยเคมีควบคู่กับการทำนาในปริมาณที่มากขึ้น ด้วยราคาของปุ๋ยเคมีที่แพงขึ้นทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ประกอบกับราคาข้าวที่ผันผวน หรือไม่ดีเท่าที่ควร ชาวนาไทยจึงไม่สามารถแบกรับกับความเสี่ยงในการลงทุนได้ (พัชร และธนิดา, 2556) ประกอบกับนโยบายสนับสนุนจากภาครัฐที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาด้านต้นทุน และประกันราคาข้าวที่เหมาะสมต่อต้นทุนได้อย่างยั่งยืนในระยะยาว จึงทำให้แนวโน้มของการทำนาลดลงอย่างต่อเนื่อง

จังหวัดสุโขทัยเป็นหนึ่งในจังหวัดพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นที่การเกษตร โดยมีอัตราส่วนพื้นที่ปลูกข้าวต่อพื้นที่ทั้งหมดสูงเป็นอันดับสามของภาคเหนือตอนล่าง โดยพบว่าพื้นที่กว่า 1,825,603 ไร่ เป็นพื้นที่ใช้ประโยชน์ทางการเกษตร ในจำนวนดังกล่าวเป็นนาข้าวทั้งหมด 1,234,333 ไร่ เป็นพื้นที่สำหรับพืชไร่ 394,517 ไร่ เป็นพื้นที่เพาะปลูกผลไม้ยืนต้น 128,758 ไร่ เป็นสวนผัก และการเกษตรอื่นๆ อีกประมาณ 77,539 ไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) โดยมีพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของจังหวัดคือ ข้าว อ้อยโรงงาน มันสำปะหลัง ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ยางพารา ปาล์ม จากการสำรวจเก็บข้อมูลเบื้องต้น นักวิจัยพบว่า ด้วยความต้องการของวัสดุการเกษตร เพื่อใช้บำรุง ดูแลพืชผลทางการเกษตรของเกษตรกรจังหวัดสุโขทัยที่มีความหลากหลาย และมีจำนวนไม่แน่นอน จึงทำให้ ร้านค้าปุ๋ยกรณีสึกษา ABC ในจังหวัดสุโขทัย เกิดการสั่งซื้อ หรือนำเข้าของสินค้าประเภทวัสดุทางการเกษตรที่ไม่เหมาะสมสอดคล้องต่อยอดขายที่เกิดขึ้นจริง ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายการเก็บรักษา และค่าใช้จ่ายในการบริหารจัดการที่ไม่จำเป็น ส่งผลให้ต้นทุนบริหารโดยรวมมีราคาที่สูงขึ้น และส่งผลให้ราคาค่าของวัสดุทางการเกษตรที่จัดจำหน่ายให้เกษตรกรแพงขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวในระยะยาว ทางผู้วิจัยจึงใช้หลักการพยากรณ์ มาช่วยในประมาณการจำนวนยอดขายของสินค้าวัสดุการเกษตร เพื่อลดต้นทุนการสั่งซื้อ/ส่งจองที่ไม่จำเป็น อันเป็นการลดภาระค่าบริหารต้นทุนโดยรวมให้กับผู้จัดจำหน่าย และเกษตรกร ในพื้นที่

จากการศึกษาข้อมูลของร้านค้าปุ๋ยกรณีสึกษา ABC ในจังหวัดสุโขทัย เป็นธุรกิจร้านค้าประเภทค้าปลีกโดยมีสินค้าที่นำมาขายทั่วไปเป็น ยาฆ่าแมลง เชื้อรา ฮอร์โมน พันธุ์ข้าว ปุ๋ยเคมี เป็นต้น ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการสำรวจเบื้องต้นและพบว่า ปุ๋ยเคมีเพื่อการเกษตรคือหนึ่งในสินค้าสำคัญของร้านค้ากรณีสึกษาที่กำลังประสบปัญหาสินค้าไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ซื้อ ทำให้สูญเสียโอกาสในการขายสินค้า ผู้วิจัยจึงได้สนใจประเด็นปัญหาดังกล่าวมาศึกษา ปรับปรุง ทดสอบการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการพยากรณ์ความต้องการสั่งซื้อของยอดขาย เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันการพยากรณ์เพื่อหาจุดสั่งซื้อที่เหมาะสมของปุ๋ยเคมีเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า

## 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษารูปแบบการพยากรณ์ที่เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความต้องการปุ๋ย ของ  
กรณีศึกษา

2.2 เพื่อออกแบบและพัฒนาสเปรดชีตด้วยการใช้วีซวลเบสิกฟอร์แอปพลิเคชันสำหรับเก็บ  
รวบรวมข้อมูลและการพยากรณ์ความต้องการปุ๋ย ของกรณีศึกษา

## 3. วิธีดำเนินงานวิจัย

ขอบเขตการดำเนินงานในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย ขอบเขตของกลุ่มประชากรซึ่งประกอบด้วยชุดข้อมูลทางสถิติยอดขายปุ๋ยเคมีเพื่อการเกษตร ตั้งแต่เดือนมกราคม 2563 – เดือนตุลาคม 2566 จำนวน 46 เดือน ของปุ๋ยที่มียอดการสั่งซื้อมากที่สุด 5 ลำดับแรกของร้านค้ากรณีศึกษาประกอบไปด้วย ปุ๋ยสังหับิน 36-0-0 ปุ๋ยสังหับิน 46-0-0 ปุ๋ยสังหับิน 20-8-8 ปุ๋ยม้าบิน 46-0-0 และปุ๋ยกระต่าย 16-20-0 ทั้งนี้สำหรับขอบเขตด้านพื้นที่ศึกษา การดำเนินการวิจัยจะมุ่งเน้นศึกษา พัฒนาแอปพลิเคชันการพยากรณ์ผ่าน VBA ซึ่งใช้เฉพาะในร้านค้ากรณีศึกษา เท่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้การศึกษาวิจัยบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ การวิจัยในครั้งนี้ได้ดำเนินการผ่านกระบวนการวิจัยทั้งสิ้น 5 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.1 การศึกษาสินค้าและบริการ ตลอดจนเก็บรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นต่อการพยากรณ์ของ  
ร้านค้ากรณีศึกษา ตั้งแต่เดือนมกราคม 2563 – เดือนตุลาคม 2566 ของปุ๋ย 5 ชนิดที่นำมาศึกษา

3.2 การพยากรณ์ปริมาณความต้องการปุ๋ยเบื้องต้น ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาและรูปแบบการ  
พยากรณ์ เพื่อใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาโปรแกรมการพยากรณ์ โดยในการศึกษานี้จะทำการ  
พยากรณ์ทั้งสิ้น 3 รูปแบบ ได้แก่ การพยากรณ์แบบถ่วงน้ำหนัก (Moving average) การพยากรณ์  
แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Single exponential smoothing) การพยากรณ์แบบถดถอย (Regression  
analysis) ซึ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิธีการพยากรณ์ทั้ง 3 วิธี และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการ  
พยากรณ์ 3 วิธี แสดงได้ดังต่อไปนี้

3.2.1 การพยากรณ์แบบถ่วงน้ำหนัก (Moving average) เป็นการใช้ข้อมูลที่มีอยู่เดิมมา  
พยากรณ์ด้วยหลักการหาค่าเฉลี่ย โดยทำให้การพยากรณ์มีความผันผวนที่ลดลง ง่ายต่อการเข้าใจ  
รูปแบบแนวโน้มของเส้นพยากรณ์ ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการพยากรณ์มีค่าเฉลี่ยสอดคล้องกับข้อมูล  
จริงมากขึ้น (Perry, 2011) วิธีการหาค่าพยากรณ์แบบถ่วงน้ำหนัก แสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$F_t = \sum_{i=1}^n D_{t-i} / n \quad (1)$$



|       |           |                                                            |
|-------|-----------|------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $F_t$     | หมายถึง ค่าพยากรณ์แบบหารเฉลี่ยเคลื่อนที่สำหรับช่วงเวลา $t$ |
|       | $D_{t-1}$ | หมายถึง ค่าความต้องการที่เวลา $t - 1$                      |
|       | $n$       | หมายถึง จำนวนชุดข้อมูล                                     |

3.2.2 การพยากรณ์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Single exponential smoothing) การพยากรณ์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียลเป็นวิธีที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ไม่มีลักษณะของชุดข้อมูลแบบแนวโน้มหรือฤดูกาลที่ชัดเจน ซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมกับการพยากรณ์ในรูปแบบนี้จะต้องมีการคำนวณค่าเฉลี่ยของน้ำหนัก โดยค่าน้ำหนักจะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลเมื่อเวลาผ่านไป (ศรีประโคน, 2556) แสดงวิธีการหาค่าพยากรณ์ด้วยวิธีการปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเชียลดังสมการที่ (2)

$$F_t = \alpha D_{t-1} + (1 - \alpha) F_{t-1} \quad (2)$$

|       |           |                                       |
|-------|-----------|---------------------------------------|
| เมื่อ | $F_t$     | หมายถึง ค่าพยากรณ์ที่ช่วงเวลา $t$     |
|       | $D_{t-1}$ | หมายถึง ค่าความต้องการที่เวลา $t - 1$ |
|       | $\alpha$  | หมายถึง ค่าคงที่การปรับเรียบ          |
|       | $t$       | หมายถึง เวลา                          |

3.2.3 การพยากรณ์แบบถดถอย (Regression analysis) เป็นการพยากรณ์ที่ใช้ตัวแบบพยากรณ์จากสมการการถดถอย (Regression equation) ที่ถูกสร้างขึ้นจากความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ของข้อมูลที่มี โดยสมการของการพยากรณ์แบบถดถอยแสดงได้ดังสมการที่ (3) (บุษบา, 2552)

$$F_t = a + bt \quad (3)$$

|       |       |                                                   |
|-------|-------|---------------------------------------------------|
| เมื่อ | $F_t$ | หมายถึง ตัวแปรตามซึ่งในที่นี้คือความต้องการสินค้า |
|       | $a$   | หมายถึง ค่าตัดแกน                                 |
|       | $b$   | หมายถึง ค่าความชันของเส้นกราฟ                     |
|       | $t$   | หมายถึง เวลา                                      |

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการพยากรณ์ในการวิจัยครั้งนี้ ผลการพยากรณ์จะถูกวัดจากค่าความผิดพลาดด้วย ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute deviation: MAD) ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กำลังสอง (Mean square deviation: MSD) หรือ ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Mean square error: MSE) และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute percentage error: MAPE) (จารุวรรณ และธิดาพร, 2563) (รัชญา และณัฐนันท์, 2562) (ปิยะกิจ, 2560)

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^N |Y_t - \hat{Y}_t|}{N} \quad (4)$$

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^N (Y_t - \hat{Y}_t)^2}{N} \quad (5)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^N \left| \frac{Y_t - \hat{Y}_t}{Y_t} \right| \times 100}{N} \quad (6)$$

เมื่อ  $Y_t$  หมายถึง ข้อมูลที่จริง  
 $\hat{Y}_t$  หมายถึง ค่าข้อมูลที่ทำการพยากรณ์  
 $N$  หมายถึง จำนวนข้อมูล  
 $t$  หมายถึง เวลา

3.3 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 18 ทางผู้วิจัยได้นำข้อมูลจากร้านค้าปุ๋ยกรณีศึกษา ABC ในจังหวัดสุโขทัย ตั้งแต่ เดือนมกราคม 2563 – เดือนตุลาคม 2566 จำนวน 46 เดือน ของปุ๋ยที่ขายดีที่สุดทั้ง 5 ชนิด เพื่อทำการพยากรณ์และนำค่าที่ได้จากการพยากรณ์ไปเปรียบเทียบในการหาค่าความคลาดเคลื่อนที่เหมาะสมกับปุ๋ยทั้ง 5 ชนิด

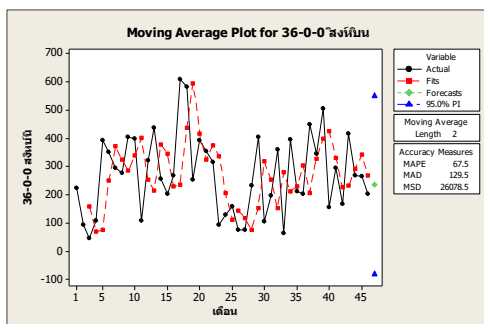
3.4 จากการเปรียบเทียบผลของค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละการพยากรณ์จะนำการพยากรณ์ที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับผลของยอดขายจริงในเดือนพฤศจิกายน 2566

3.5 ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับการพยากรณ์ด้วยภาษา VBA ให้มีความเหมาะสมกับการพยากรณ์ ตลอดจนพัฒนาส่วนสเปรดชีตนำเข้าข้อมูล ส่วนแสดงผลข้อมูล ส่วนสนับสนุนการใช้งานของแอปพลิเคชัน เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน ตลอดจนทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม

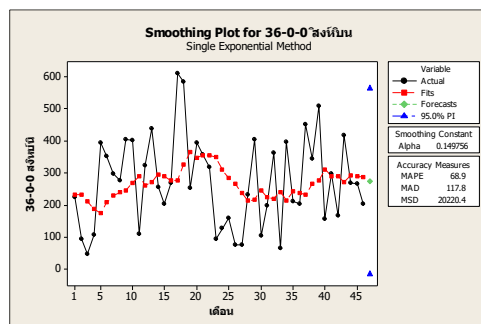
#### 4. ผลการวิจัย

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณยอดขายปุ๋ยของร้านค้าปุ๋ยกรณีศึกษา ABC ในจังหวัดสุโขทัย ตั้งแต่ เดือนมกราคม 2563 – เดือนตุลาคม 2566 จำนวน 46 เดือน ของปุ๋ยทั้งหมด 5 ชนิด ประกอบไปด้วย ปุ๋ยสังหับิน 36-0-0 ปุ๋ยสังหับิน 46-0-0 ปุ๋ยสังหับิน 20-8-8 ปุ๋ยม้าบิน 46-0-0 และปุ๋ยกระต่าย 16-20-0 นำข้อมูลที่ได้นำมาทำการพยากรณ์ทั้งหมด 3 วิธีการ ได้แก่ 1.การพยากรณ์แบบถ่วงน้ำหนัก 2.การพยากรณ์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล 3.การพยากรณ์แบบถดถอย เพื่อดำเนินการหาค่าพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมกับปุ๋ยทั้ง 5 ชนิด โดยมีข้อมูลดังนี้

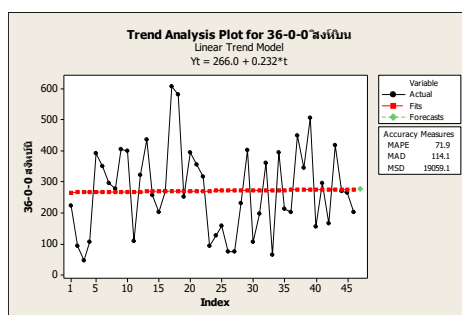
##### 4.1 การหาวิธีการพยากรณ์ทั้ง 3 รูปแบบ ของปุ๋ยสังหับิน 36-0-0



ภาพที่ 1 กราฟค่าพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของปุ๋ยสังหับิน 36-0-0



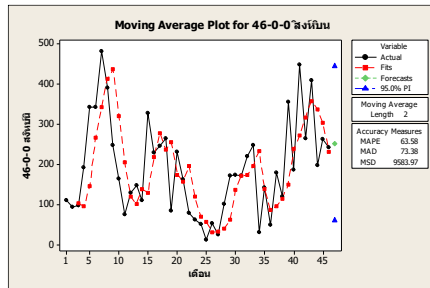
ภาพที่ 2 กราฟค่าพยากรณ์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียลของปุ๋ยสังหับิน 36-0-0



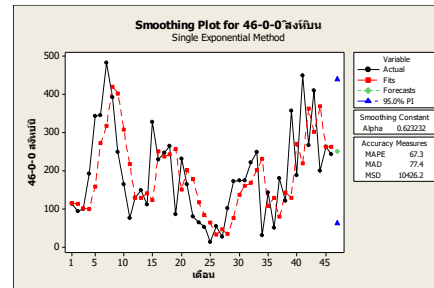
ภาพที่ 3 กราฟค่าพยากรณ์แบบถดถอยของปุ๋ยสังหับิน 36-0-0

จากภาพที่ 1 - 3 มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 67.5 68.9 และ 71.9 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าร้อยละเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 129.5 117.8 และ 114.1 ตามลำดับ และมีค่าร้อยละค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กำลังสองเท่ากับ 26078.5 20220.4 และ 19059.1 ตามลำดับ

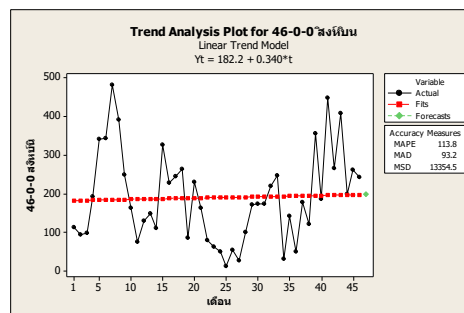
#### 4.2 การหาวิธีการพยากรณ์ทั้ง 3 รูปแบบ ของปุ๋ยสังหับิน 46-0-0



ภาพที่ 4 กราฟค่าพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของปุ๋ยสังหับิน 46-0-0



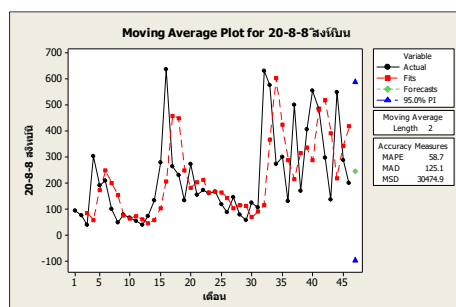
ภาพที่ 5 กราฟค่าพยากรณ์แบบเอกซ์โปเนนเชียลของปุ๋ยสังหับิน 46-0-0



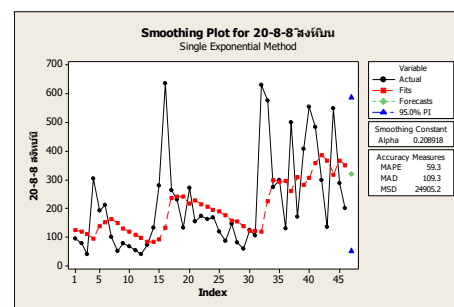
ภาพที่ 6 กราฟค่าพยากรณ์แบบถดถอยของปุ๋ยสังหับิน 46-0-0

จากภาพที่ 4 - 6 มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 63.58 67.3 และ 113.8 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าร้อยละเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 73.38 77.4 และ 93.2 ตามลำดับ และมีค่าร้อยละค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กำลังสองเท่ากับ 9583.97 10426.2 และ 13354.5 ตามลำดับ

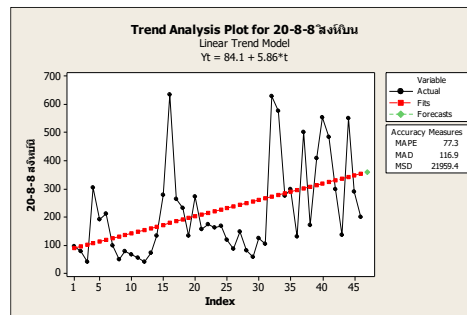
#### 4.3 การหาวิธีการพยากรณ์ทั้ง 3 รูปแบบ ของปุ๋ยสังหับิน 20-8-8



ภาพที่ 7 กราฟค่าพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของปุ๋ยสังหับิน 20-8-8



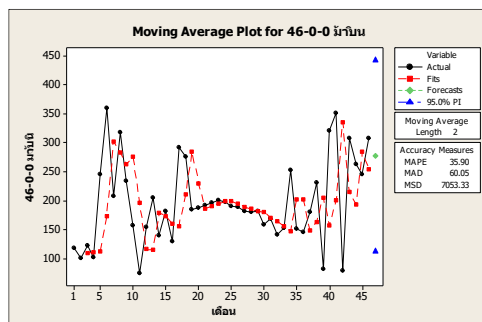
ภาพที่ 8 กราฟค่าพยากรณ์แบบเอกซ์โปเนนเชียลของปุ๋ยสังหับิน 20-8-8



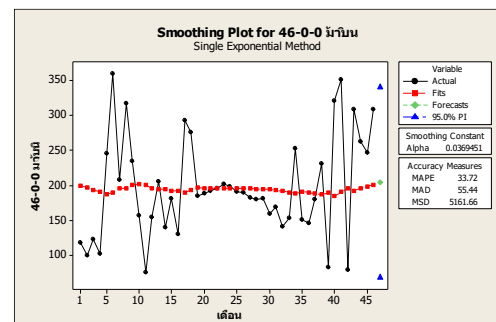
ภาพที่ 9 กราฟค่าพยากรณ์แบบถดถอยของปุ๋ยสังกะสี 20-8-8

จากภาพที่ 7 - 9 มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 58.7 59.3 และ 77.3 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าร้อยละเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 125.1 109.3 และ 116.9 ตามลำดับ และมีค่าร้อยละค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กำลังสองเท่ากับ 30474.9 24905.2 และ 21959.4 ตามลำดับ

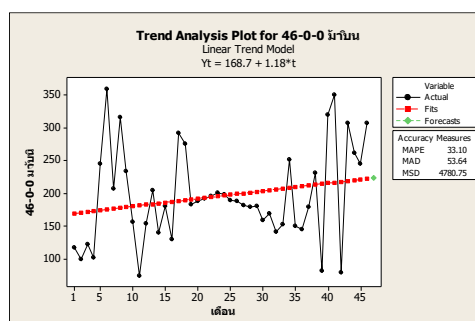
#### 4.4 การหาวิธีการพยากรณ์ทั้ง 3 รูปแบบ ของปุ๋ยม้าบิน 46-0-0



ภาพที่ 10 กราฟค่าพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของปุ๋ยม้าบิน 46-0-0



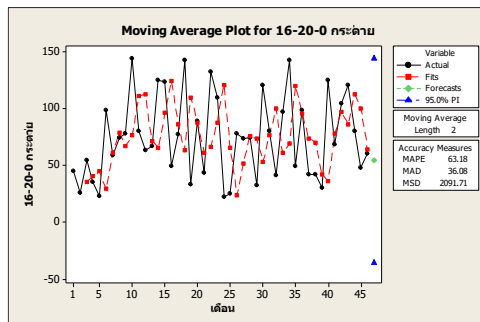
ภาพที่ 11 กราฟค่าพยากรณ์แบบเอกซ์โปเนนเชียลของปุ๋ยม้าบิน 46-0-0



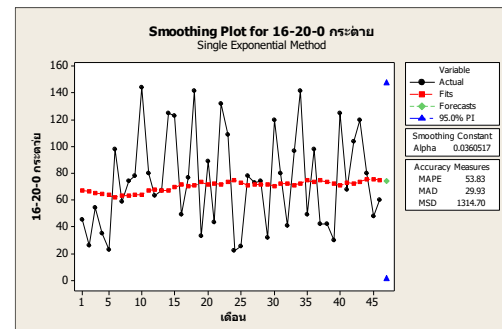
ภาพที่ 12 กราฟค่าพยากรณ์แบบถดถอยของปุ๋ยม้าบิน 46-0-0

จากภาพที่ 10 - 12 มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 35.9 33.72 และ 33.1 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าร้อยละเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 60.25 55.44 และ 53.64 ตามลำดับ และมีค่าร้อยละค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กำลังสองเท่ากับ 7053.33 5161.66 และ 4780.75 ตามลำดับ

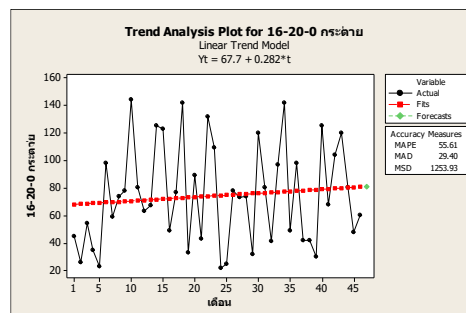
#### 4.5 การหาวิธีการพยากรณ์ทั้ง 3 รูปแบบ ของปุ๋ยกระต่าย 16-20-0



ภาพที่ 13 กราฟค่าพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของปุ๋ยกระต่าย 16-20-0



ภาพที่ 14 กราฟค่าพยากรณ์แบบเอกซ์โปเนนเชียลของปุ๋ยกระต่าย 16-20-0



ภาพที่ 15 กราฟค่าพยากรณ์แบบถดถอยของปุ๋ยกระต่าย 16-20-0

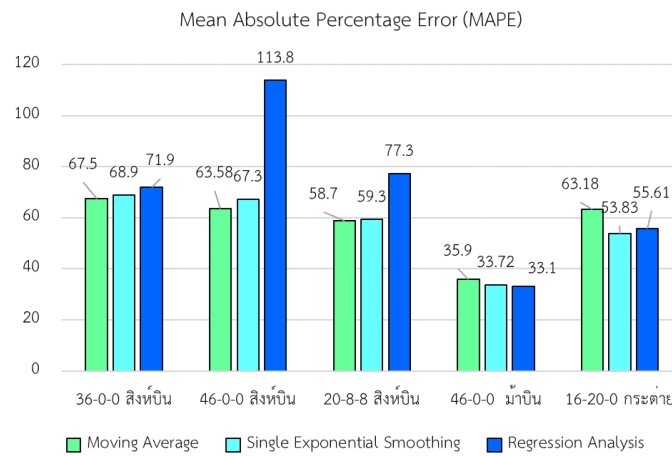
จากภาพที่ 13 - 15 มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 63.18 53.83 และ 55.61 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าร้อยละเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 36.08 29.93 และ 29.4 ตามลำดับ และมีค่าร้อยละค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กำลังสองเท่ากับ 2091.71 1314.7 และ 1253.93 ตามลำดับ

4.6 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ให้เหมาะสมกับน้ำดื่มทั้ง 3 วิธีของปุ๋ยทั้ง 5 ชนิด เพื่อการเลือกค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด ตามเกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อน 3 เกณฑ์ คือ MAPE MSD และ MAD ที่ทำให้วิธีการพยากรณ์ ที่ให้ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดมาใช้ในการพยากรณ์คำสั่งซื้อในอนาคต

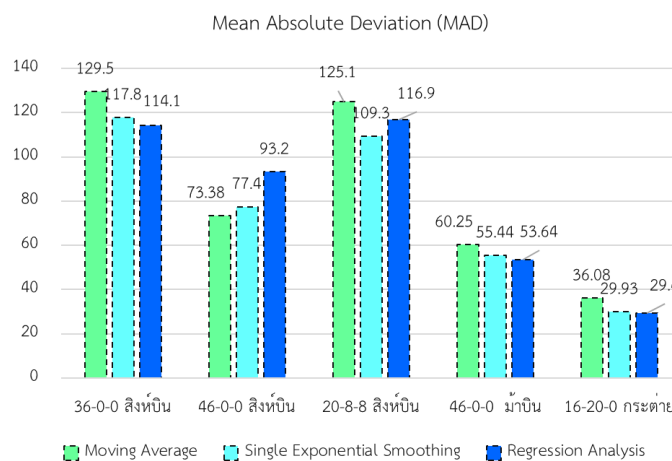


ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบค่าพยากรณ์ของปัญทั้ง 5 ชนิด

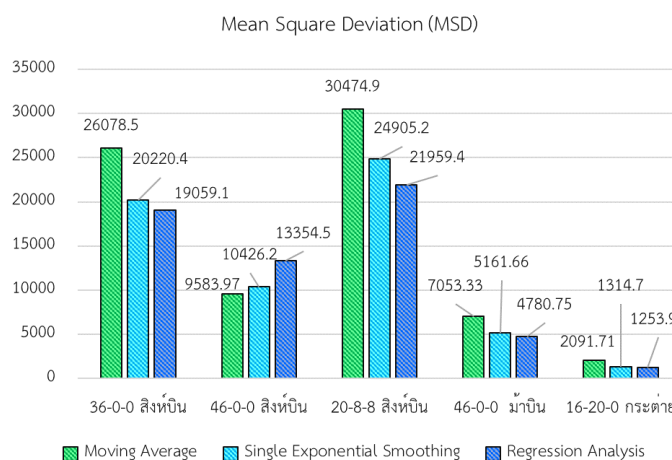
| ชนิด                | วิธีการ                      | Mean absolute percentage error (MAPE) | Mean absolute deviation (MAD) | Mean square deviation (MSD) | นับจำนวนวิธีการพยากรณ์ที่ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนต่ำสุด (วิธี) |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 36-0-0<br>สิงห์ปิ่น | Moving average               | 67.5                                  | 129.5                         | 26078.5                     | 1                                                         |
|                     | Single exponential smoothing | 68.9                                  | 117.8                         | 20220.4                     | 0                                                         |
|                     | Regression analysis          | 71.9                                  | 114.1                         | 19059.1                     | 2                                                         |
| 46-0-0<br>สิงห์ปิ่น | Moving average               | 63.58                                 | 73.38                         | 9583.97                     | 3                                                         |
|                     | Single exponential smoothing | 67.3                                  | 77.4                          | 10426.2                     | 0                                                         |
|                     | Regression analysis          | 113.8                                 | 93.2                          | 13354.5                     | 0                                                         |
| 20-8-8<br>สิงห์ปิ่น | Moving average               | 58.7                                  | 125.1                         | 30474.9                     | 1                                                         |
|                     | Single exponential smoothing | 59.3                                  | 109.3                         | 24905.2                     | 1                                                         |
|                     | Regression analysis          | 77.3                                  | 116.9                         | 21959.4                     | 1                                                         |
| 46-0-0<br>ม้าปิ่น   | Moving average               | 35.90                                 | 60.25                         | 7053.33                     | 0                                                         |
|                     | Single exponential smoothing | 33.72                                 | 55.44                         | 5161.66                     | 0                                                         |
|                     | Regression analysis          | 33.10                                 | 53.64                         | 4780.75                     | 3                                                         |
| 16-20-0<br>กระต่าย  | Moving average               | 63.18                                 | 36.08                         | 2091.71                     | 0                                                         |
|                     | Single exponential smoothing | 53.83                                 | 29.93                         | 1314.70                     | 1                                                         |
|                     | Regression analysis          | 55.61                                 | 29.40                         | 1253.93                     | 2                                                         |



ภาพที่ 16 กราฟค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยของวิธีการพยากรณ์ 3 วิธี ของปุ๋ย 5 ชนิด



ภาพที่ 17 กราฟแสดงค่าค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย ของวิธีการพยากรณ์ 3 วิธี ของปุ๋ย 5 ชนิด



ภาพที่ 18 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กำลังสองของวิธีการพยากรณ์ 3 วิธี ของปุ๋ย 5 ชนิด

จากภาพที่ 16 -18 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าพยากรณ์ของปุ๋ยทั้ง 5 ชนิด สามารถสรุปผลในการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนจากค่า ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Deviation: MAD) ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กำลังสอง (Mean Square Deviation: MSD) หรือ ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error: MSE) และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ที่ทำให้วิธีการพยากรณ์ ที่ให้ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดมาใช้ในการพยากรณ์คำสั่งซื้อในอนาคต โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

ปุ๋ยสังหับิน 36-0-0 จากผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทั้ง 3 วิธี ของการพยากรณ์ที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด คือวิธีการแบบ Regression Analysis เนื่องจากค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย MAD เท่ากับ 114.1 ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กำลังสอง MSD เท่ากับ 19059.1 มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ แต่มีเพียงแค่ว่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย MAPE ที่เป็นของวิธีการ Moving Average ที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด เท่ากับ 67.5 จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าวิธีการพยากรณ์ที่ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนต่ำสุดของปุ๋ยสังหับิน 36-0-0 จึงเลือกวิธีการแบบ Regression Analysis โดยมีสูตรสมการที่ใช้หาค่าการพยากรณ์  $Y_t = 266.0 + 0.232 * t$

ปุ๋ยสังหับิน 46-0-0 จากผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทั้ง 3 วิธี ของการพยากรณ์ที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด คือวิธีการแบบ Moving average ซึ่งเป็นวิธีการเดียวที่ให้ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย MAD ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กำลังสอง MSD และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย MAPE ต่ำที่สุดทั้ง 3 ค่า โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 73.38 9583.97 และ 63.58 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าพยากรณ์กับวิธีการอื่น

ปุ๋ยสังหับิน 20-8-8 จากผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทั้ง 3 วิธี ของการพยากรณ์ที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดทั้ง 3 โดยแต่ละวิธีจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกันออกไป จากข้อมูลดังกล่าว วิธีการแบบ Moving Average ให้ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย MAPE ต่ำสุดเท่ากับ 58.7 วิธีการแบบ Single Exponential smoothing ให้ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย MAD ต่ำสุดเท่ากับ 109.3 และ วิธีการ Regression analysis ให้ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กำลังสอง MSD ต่ำสุดเท่ากับ 21959.4

ปุ๋ยม้าบิน 46-0-0 จากผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทั้ง 3 วิธี ของการพยากรณ์ที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด คือวิธีการแบบ Regression analysis ซึ่งเป็นวิธีการเดียวที่ให้ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย MAD ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กำลังสอง MSD และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย MAPE ต่ำที่สุดทั้ง 3 ค่า โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 53.64 4780.75 33.10 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าพยากรณ์กับวิธีการอื่น โดยมีสูตรสมการที่ใช้หาค่าการพยากรณ์  $Y_t = 168.7 + 1.18 * t$



ปุ๋ยกระต่าย 16-20-0 จากผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทั้ง 3 วิธี ของการพยากรณ์ที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด คือวิธีการแบบ Regression analysis เนื่องจากค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย MAD เท่ากับ 29.40 ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กำลังสอง MSD เท่ากับ 1253.93 มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ แต่มีเพียงแค่ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย MAPE ที่เป็นของวิธีการ Single Exponential smoothing ที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด เท่ากับ 53.83 จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าวิธีการพยากรณ์ที่ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนต่ำสุดของปุ๋ยกระต่าย 16-20-0 จึงเลือกวิธีการแบบ Regression analysis โดยมีสูตรสมการที่ใช้หาค่าพยากรณ์  $Y_t = 67.7 + 0.282 * t$

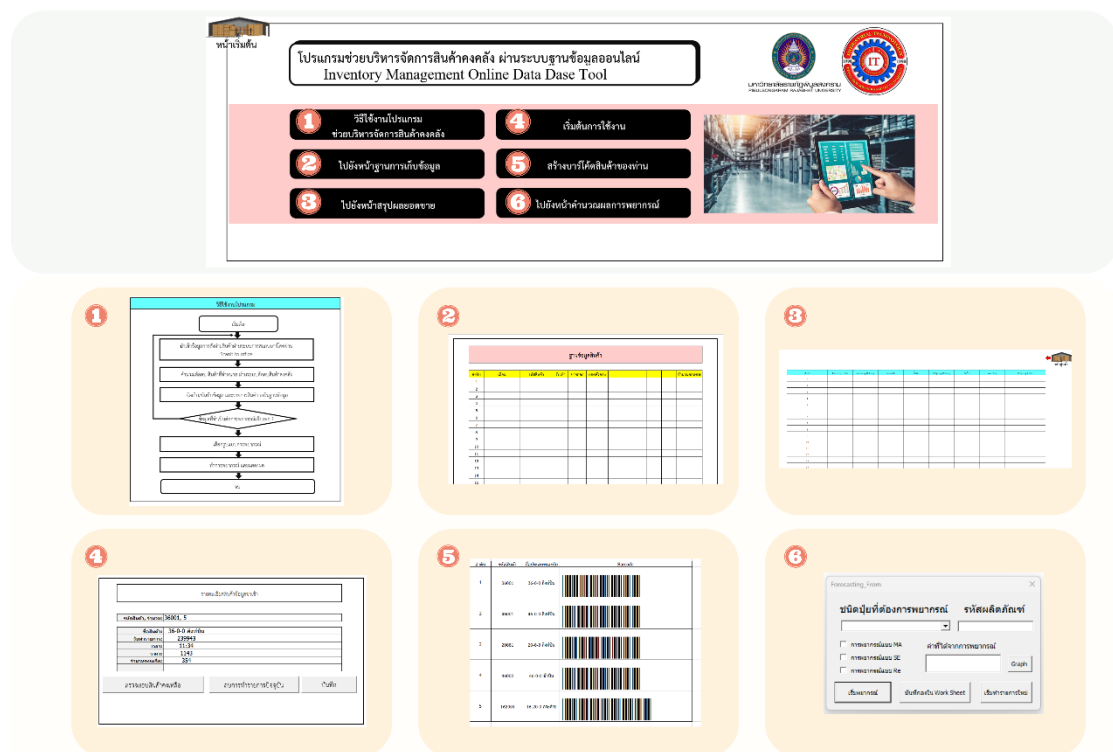
4.7 เปรียบเทียบค่าผลการพยากรณ์กับยอดขายปุ๋ยในเดือนพฤศจิกายน 2566 ของปุ๋ยทั้ง 5 ชนิด ด้วยวิธีการพยากรณ์ที่ได้ทำการคัดเลือกมาจากตารางที่ 1

**ตารางที่ 2** ผลการเปรียบเทียบค่าพยากรณ์ปุ๋ยทั้ง 5 ชนิดกับยอดขายจริงในเดือนพฤศจิกายน 2566

| ชนิดปุ๋ย            | วิธีการพยากรณ์ที่ทำการคัดเลือก | ค่าพยากรณ์ | ยอดขายในเดือนพฤศจิกายน | ร้อยละความแม่นยำ |
|---------------------|--------------------------------|------------|------------------------|------------------|
| ปุ๋ยสิงห์บิน 36-0-0 | Regression analysis            | 277        | 304                    | 91.11            |
| ปุ๋ยสิงห์บิน 46-0-0 | Moving average                 | 253        | 258                    | 98.06            |
| ปุ๋ยสิงห์บิน 20-8-8 | Moving average                 | 47         | 55                     | 85.45            |
|                     | Single exponential smoothing   | 47         | 55                     | 85.45            |
|                     | Regression analysis            | 47         | 55                     | 85.45            |
| ปุ๋ยม้าบิน 46-0-0   | Regression analysis            | 47         | 48                     | 97.92            |
| ปุ๋ยกระต่าย 16-20-0 | Regression analysis            | 47         | 51                     | 92.16            |

จากตารางที่ 2 ผลการการเปรียบเทียบค่าพยากรณ์ปุ๋ยทั้ง 5 ชนิดกับยอดขายจริงในเดือนพฤศจิกายน 2566 พบว่า ในส่วนแรกเป็นวิธีการพยากรณ์ที่ได้รับการคัดเลือกของปุ๋ยทั้ง 3 ชนิดมากที่สุดเป็นแบบวิธีการพยากรณ์แบบ Regression analysis มีความเหมาะสมกับปุ๋ยชนิด สังกะสี 36-0-0 ปุ๋ยม้าบิน 46-0-0 และ ปุ๋ยกระต่าย 16-20-0 ที่ทำให้มีค่าร้อยละความแม่นยำ 91.11 97.92 และ 92.16 ตามลำดับ ในส่วนที่สองเป็นการเลือกของวิธีการพยากรณ์แบบ Moving average มีความเหมาะสมกับปุ๋ยชนิด ปุ๋ยสังกะสี 46-0-0 ที่ทำให้มีค่าร้อยละความแม่นยำ 98.06 ส่วนสุดท้ายของ ปุ๋ยสังกะสี 20-8-8 สามารถเลือกใช้วิธีการพยากรณ์แบบใดก็ได้ทั้ง 3 วิธี ที่ทำให้มีค่าร้อยละความแม่นยำ 85.45

4.8 เพื่อออกแบบและพัฒนาสเปรตชีตผ่านภาษาวิซวลเบสิกฟอร์แอปพลิเคชันในการเก็บรวบรวมข้อมูลและพยากรณ์ยอดขายในเดือนถัดไปสำหรับการบริหารจัดการข้อมูลสินค้าคงคลังสำหรับร้านค้าปุ๋ยกรณีศึกษา ABC ในจังหวัดสุโขทัย



ภาพที่ 19 หน้าสเปรตชีตการบริหารจัดการข้อมูลสินค้าคงคลังและการพยากรณ์

## 5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 การวิจัยในการหาวิธีการพยากรณ์ทั้งหมด 3 วิธีการที่จะทำได้ วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมสำหรับปุ๋ยทั้ง 5 ชนิด จากการเก็บรวบรวมข้อมูล ตั้งแต่ เดือนมกราคม 2563 – เดือนตุลาคม 2566 รวมทั้งสิ้น 46 เดือน โดยการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด ตามเกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อน 3 เกณฑ์ คือ ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute deviation: MAD) ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่กำลังสอง (Mean square deviation: MSD) หรือ ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Mean square Error: MSE) และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute percentage error: MAPE) จากการวิเคราะห์วิธีการพยากรณ์ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดจึงนำข้อมูลจริงไปหาค่าความแม่นยำในเดือนถัดไป ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าวิธีการพยากรณ์แบบ Regression analysis มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดของปุ๋ยทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ปุ๋ยสิงห์บิน 36-0-0 ปุ๋ยม้าบิน 46-0-0 และ ปุ๋ยกระต่าย 16-20-0 แต่ในส่วนของปุ๋ยอีก 2 ชนิดมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดที่ให้ผลการเลือกวิธีการพยากรณ์แบบ Moving average เหมาะสำหรับปุ๋ยชนิดสิงห์บิน 46-0-0 และปุ๋ยสิงห์บิน 20-8-8 สามารถเลือกใช้วิธีการพยากรณ์แบบใดก็ได้ทั้ง 3 วิธี เมื่อได้ข้อมูลจากการเลือกวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมกับปุ๋ยทั้ง 5 ชนิด ผู้วิจัยจึงเพื่อออกแบบและพัฒนาสเปรดชีตผ่านภาษาวิซวลเบสิกฟอร์แอปพลิเคชันในการพยากรณ์ยอดขายในเดือนถัดไปเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจ

จากวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 เป็นการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมพยากรณ์ด้วยภาษาวิซวลเบสิกฟอร์แอปพลิเคชัน (Visual basic for application: VBA) ในการเก็บรวบรวมข้อมูลและพยากรณ์ยอดขายในเดือนถัดไป เพื่อช่วยพัฒนาการจัดเก็บข้อมูลของร้านค้าปุ๋ยกรณีศึกษา ABC ในจังหวัดสุโขทัย ซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำข้อมูลการรับเข้าและยอดขายออกด้วยการสร้างเป็นบาร์โค้ดสำหรับการใช้งานและดึงข้อมูลยอดขายไปทำการพยากรณ์ ซึ่งการพยากรณ์ในสเปรดชีตการบริหารจัดการข้อมูลสินค้าคงคลังที่ได้ทำการพัฒนามานี้ทางผู้วิจัยได้ใช้ผลของวิธีการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมสำหรับปุ๋ยแต่ละชนิดมาทำการพยากรณ์ในเดือนถัดไปซึ่งจะทำให้การใช้งานของร้านค้าปุ๋ยกรณีศึกษา ABC ในจังหวัดสุโขทัยสามารถทราบผลการคาดการณ์ยอดขายในเดือนถัดไปได้

จากงานวิจัยจะเห็นได้ว่าการพัฒนาโปรแกรมในงานวิจัยครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ด้วยดี ตรงตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการเก็บรวบรวมข้อมูลและพยากรณ์ยอดขายของสินค้า อีกผลการพยากรณ์ที่ได้ยังมีความแม่นยำสูงเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความต้องการจริง ซึ่งร้านค้าปุ๋ยสามารถนำผลการพยากรณ์ดังกล่าวเป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจ ในการบริหารระดับสินค้าคงคลังของปุ๋ยเพื่อการเกษตร เพื่อลดปัญหาสินค้าปุ๋ยไม่เพียงพอต่อความต้องการ นำมาซึ่งประโยชน์เชิงพาณิชย์ต่อร้านค้ากรณีศึกษา

## 6. ข้อเสนอแนะ

อนึ่งงานวิจัยนี้ทำเพื่อการศึกษาการพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับการพยากรณ์ และค้นหาวิธีการพยากรณ์ยอดขายสินค้าปุ๋ยเพื่อการเกษตรที่เหมาะสม การต่อยอดงานวิจัยสามารถดำเนินการได้ในหลายมิติ ได้แก่ การปรับเปลี่ยนส่วนนำเข้าข้อมูลให้เหมาะสมสำหรับสินค้าชนิดอื่นๆ เพื่อเอื้อต่อการประยุกต์ใช้ของผู้ใช้งาน การเพิ่มวิธีการพยากรณ์รูปแบบอื่นๆ เช่น การพยากรณ์แบบเอ็กโพเนนเชียลแบบปรับค่าตามแนวโน้ม (Exponential smoothing with trend adjustment) การพยากรณ์แบบเอ็กโพเนนเชียลแบบตามฤดูกาล (Seasonal exponential smoothing) เป็นต้น เพื่อให้มีความหลากหลายของวิธีการพยากรณ์รองรับต่อการใช้งานของผู้ใช้ในอนาคต ตลอดจนเพิ่มส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลนำเข้าเพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูล อันนำมาซึ่งการเลือกวิธีพยากรณ์ และการวัดผลพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพต่อไป

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ร้านค้าปุ๋ยกรณีศึกษา ABC ในจังหวัดสุโขทัยในการอนุเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณทุนสนับสนุนคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ประจำปีงบประมาณ 2566 และสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมการจัดการและโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมในการให้ความอนุเคราะห์โปรแกรมสำเร็จรูป (Minitab18) เป็นลิขสิทธิ์ (PSRU-1060-7440-013-1-62) และสนับสนุนทรัพยากรในการดำเนินวิจัยในครั้งนี้

## 8. เอกสารอ้างอิง

- กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2565). **จำนวนครัวเรือนเกษตรกร รายจังหวัด ปี 2565**. ค้นจาก [https://data.go.th/da\\_DK/dataset/household65](https://data.go.th/da_DK/dataset/household65)
- จารุวรรณ สิงห์ม่วง และธิดาพร ศุภภากร. (2563). รูปแบบการพยากรณ์มูลค่าการส่งออกยางพาราของประเทศไทย. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์**, 12(15), 58-82.
- บุษบา พงกษาพันธุ์รัตน์. (2552). **การวางแผนและควบคุมการผลิต**. กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด
- ปิยะกิจ กิจติตุลาภานนท์. (2560). วิธีการพยากรณ์ความต้องการปุ๋ยเคมี กรณีศึกษา สหกรณ์การเกษตรชุมตาบง จังหวัดนครสวรรค์. **วารสารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (นวัตกรรมเทคโนโลยี)**, 10(1), 89-100.

- พัชร สีนธนาวา และธนิดา ยงยีน. (2556). การเปรียบเทียบผลผลิตและคุณภาพของข้าวที่ได้จากปุ๋ย  
แหนแดงและปุ๋ยเคมี. (รายงานวิจัย). ทูลสนับสนุนจากคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ,  
กรุงเทพฯ.
- รัชฎา แต่งภูเขียว และณัฐนันท์ อิศระพงศ์. (2562). การวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์  
สำหรับการวางแผนการผลิต กรณีศึกษา บริษัทผลิตเนื้อโคขุน จังหวัดนครพนม.วารสาร  
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีโอเออีเทจ, 13(3), 222-232.
- รุ่งนภา ศรีประโคน. (2554). การลดปริมาณการขาดแคลนสินค้าโดยใช้เทคนิคการพยากรณ์  
กรณีศึกษา บริษัทไอเซิล ประเทศไทย จำกัด. (วิทยานิพนธ์). มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์,  
กรุงเทพฯ.
- สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ. (2563). การบูรณาการการจัดตารางการผลิตแบบหลายคำสั่งซื้อและการขนส่ง  
หลายรูปแบบสำหรับอุตสาหกรรมสินค้าประเภททุนโดยใช้เมตาด้าฮิวริสติกส์. (วิทยานิพนธ์).  
มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2562). เนื้อที่ใช้ประโยชน์ทางการเกษตร รายจังหวัด ปี พ.ศ.  
2 5 6 2 . สำนั ก ง า น เ ศ ร ช ฐ กิ จ ก า ร เก ช ต ร . ค้ น จ า ก :  
<https://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/socio/LandUtilization2562.pdf>
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2562). เนื้อที่ใช้ประโยชน์ทางการเกษตร รายจังหวัด ปี พ.ศ.  
2 5 5 2 . สำนั ก ง า น เ ศ ร ช ฐ กิ จ ก า ร เก ช ต ร . ค้ น จ า ก :  
<https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/Land%20Utilization2552.pdf>
- สำนักงานสถิติแห่งชาติ. (พ.ศ.2562). สถิติการใช้ที่ดิน พ.ศ. 2553 - 2562 ของจังหวัดในเขต  
ภาคเหนือตอนล่าง. ค้นจาก: [https://data.go.th/dataset/oae0002\\_2553-2562](https://data.go.th/dataset/oae0002_2553-2562)
- Perry, M.B., 2011. The Weighted Moving Average Technique, In Wiley Encyclopedia  
of Operations Research and Management Science. Retrieved from:  
[www.researchgate.net/publication/313992471\\_The\\_Weighted\\_Moving\\_Average\\_Technique](http://www.researchgate.net/publication/313992471_The_Weighted_Moving_Average_Technique).
- Statista Research Department. (2023). Global consumption of agricultural fertilizer  
from 1 9 6 5 to 2 0 2 1 , by nutrient. Statista. Retrieved from:  
<https://www.statista.com/statistics/438967/fertilizer-consumption-globally-by-nutrient/>