

JOURNAL OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND

ENGINEERING

PIBULSONGKRAM RAJABHAT UNIVERSITY



วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม



ปีที่ 4 ฉบับที่ 1
มกราคม - เมษายน
2565

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



ข้อกำหนดมาตรฐาน วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

เพื่อให้วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เป็นวารสารที่มีคุณภาพได้มาตรฐานทางกองบรรณาธิการจึงมีข้อกำหนดของวารสารดังต่อไปนี้

1. วัตถุประสงค์

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

2. ครอบคลุมสาขาที่เกี่ยวข้อง

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

2.2 สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ประยุกต์

2.3 สาขาวิชาที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และวิศวกรรม

3. การพิจารณาบทความ (Peer Review Process)

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

ขั้นตอนการประเมินบทความมีกระบวนการดังต่อไปนี้

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

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

4. กำหนดออกเล่มวารสาร

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

5. คำแนะนำสำหรับผู้ส่งบทความเพื่อตีพิมพ์

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

5.2 รูปแบบบทความที่ส่งกองบรรณาธิการเพื่อตีพิมพ์

6. จริยธรรมในการตีพิมพ์ผลงาน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เป็นวารสารที่มีวัตถุประสงค์เพื่อ ตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการ และบทความปริทรรศน์ ที่มีคุณภาพโดยผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ 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 และติดต่อผู้นิพนธ์หลักทันทีเพื่อขอคำชี้แจง เพื่อประกอบการ ตอบรับ หรือ ปฏิเสธ การตีพิมพ์บทความนั้น ๆ
13. บรรณาธิการวารสารต้องไม่ตีพิมพ์บทความที่เคยตีพิมพ์ที่อื่นมาแล้ว
14. บรรณาธิการวารสารต้องมีระบบในการจัดการที่ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้นิพนธ์และผู้ประเมินบทความรวมทั้งกองบรรณาธิการ
15. บรรณาธิการวารสารต้องสนับสนุนเสรีภาพในการแสดงความคิดเห็น และคงไว้ซึ่งความถูกต้องของผลงานทางวิชาการ อีกทั้งปกป้องมาตรฐานของทรัพย์สินทางปัญญา

9. บทบาทและหน้าที่ของผู้ประเมินบทความ (Duties of Reviewers)

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

6. ผู้ประเมินบทความ ควรประเมินบทความในสาขาวิชาที่ตนมีความเชี่ยวชาญ โดยพิจารณาความสำคัญของเนื้อหาในบทความที่จะมีต่อสาขาวิชานั้น ๆ คุณภาพของการวิเคราะห์ และความเข้มข้นของผลงาน

7. ผู้ประเมินบทความไม่ควรใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่มีข้อมูลรองรับมาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินบทความวิจัย

8. หากผู้ประเมินบทความทราบว่ามีส่วนใดของบทความที่มีความเหมือน หรือซ้ำซ้อนกับผลงานชิ้นอื่น ๆ ผู้ประเมินบทความต้องแจ้งให้บรรณาธิการวารสารทราบด้วย

10. ลิขสิทธิ์และสิทธิ (Copyright and Right)

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

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

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

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

11. นโยบายจริยธรรมการทดลอง (Research Integrity Policy) ในงานวิจัย

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

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

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

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

สำหรับผู้เขียน ต้องมีการใช้ข้อมูลในการเขียนงานวิจัยโดยไม่มีส่วนเกี่ยวข้องที่อาจทำให้เกิดความโน้มเอียงในงานวิจัย ในผลการศึกษา สรุปผล หรือ การอภิปรายผล โดยเฉพาะผลประโยชน์ทางตรงหรือทางอ้อมต่อการทำงานวิจัย

สำหรับผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ควรให้ข้อมูลต่อบรรณาธิการผู้รับผิดชอบบทความ หากมีผลประโยชน์เกี่ยวข้องกับงานวิจัยหรือมีความเกี่ยวข้องอย่างใดอย่างหนึ่ง ให้แจ้งบรรณาธิการ เพื่อยืนยันความโปร่งใสต่อการประเมินบทความ ทั้งนี้การเกี่ยวข้องย่อมมีโอกาสเกิดขึ้นได้เสมอ บรรณาธิการจะเป็นผู้พิจารณาให้ความเห็นในการยอมรับต่อการประเมินบทความอีกครั้ง

บทบรรณาธิการ

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

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



รองศาสตราจารย์ ดร.สนธิ ปิ่นสกุล
บรรณาธิการ



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
การพัฒนาระบบควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดเล็ก โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ต ของสรรพสิ่งสมมาตร พรหมพุ่ม, นพรุจ เขียวนาค)	1-14
การพัฒนาวิธีการทดสอบการโค้งงอของโมดิฟายโพลีเอทิลีนเพื่อสร้างเส้นขีดจำกัดการย่น ของวัสดุอะลูมิเนียมผสมด้วยวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทงศ์ศักดิ์ บุญญาณ, ธราทิป ชัยมงคล	15-31
ปั้มน้ำความร้อนด้วยกำลังไอน้ำจิรวุฒน์ สิตรานนท์, กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์, ศรีมา แจ้คำ, กรณัฐ นาคภิบาล, เอกภูมิ บุญธรรม	32-59
การออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่สะท้อนอัตลักษณ์ เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห จังหวัดพิษณุโลกจุมพฏ พงศ์ศักดิ์ศรี	60-73
การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดร โปนิคส์และอินทรีย์ในแต่ละฤดูกาล ของจังหวัดนครสวรรค์อาสาฬห์ อุตตาลกาญจนา	74-91
การออกแบบและพัฒนารถขนส่งวัสดุอัตโนมัติราคาถูกลง สำหรับขนส่งวัสดุระหว่าง กระบวนการผลิตนพรุจ เขียวนาค, สมมาตร พรหมพุ่ม	92-106
การพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงประพันธ์พงษ์ สมศิลา, เอกภูมิ บุญธรรม, ธนกร หอมจำปา	107-124
การพัฒนาเคลือบหินปูนที่มีทองแดงออกไซด์ ดีบุกออกไซด์ สังกะสีออกไซด์ และ แบเรียมคาร์บอเนตเป็นสารเพิ่มเติม ที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียสจุมพฏ พงศ์ศักดิ์ศรี	125-137

การพัฒนาระบบควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดเล็ก โดยใช้เทคโนโลยี อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

A DEVELOPMENT OF MINI CNC MILLING MACHINE CONTROL SYSTEM USING INTERNET OF THINGS TECHNOLOGY

สมมาตร พรหมพุด*, นพรุจ เขียวนาค

Sommart Prompt*, Nopparut Khaewnak

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ

อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ประเทศไทย 20110

School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, BangPhra Campus,

Sriracha, Chon Buri, Thailand, 20110

*Corresponding author e-mail: sommart_pr@rmutto.ac.th

วันที่เข้ารับ 8 มีนาคม 2565

วันที่แก้ไขบทความ 8 เมษายน 2565

วันที่ตอบรับบทความ 8 เมษายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเข้ามามีส่วนช่วยในการพัฒนาเครื่องจักรกลอัตโนมัติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดเล็ก ความแม่นยำสูง เหมาะสำหรับชิ้นงานไม้ แผ่นอะคริลิก และง่ายต่อการใช้งาน เมื่อเทียบกับเครื่องขนาดใหญ่ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานโดยใช้แบบจำลอง ADDIE คือ การวิเคราะห์ การออกแบบ การพัฒนา การนำไปใช้ และการประเมินผลลัพธ์ของเครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดเล็ก ที่สามารถควบคุมการทำงานของเครื่องกัดซีเอ็นซีผ่านเว็บเบราว์เซอร์ที่พัฒนาด้วยซอฟต์แวร์ Node-RED ส่งผ่านด้วยโปรโตคอล MQTT ซึ่งเป็นโปรโตคอลมาตรฐานหลักของ ISO/IEC 20922:2016 โดยผลการทดสอบพบว่าสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดเล็กได้ถูกต้อง มีค่าความผันแปรในแนวแกน X แกน มีค่าเท่ากับ 1.00 แนวแกน Y แกน มีค่าเท่ากับ 1.00 แนวแกน Z แกน มีค่าเท่ากับ 0.99 และช่วยลดปัญหาในการติดตั้งชุดโปรแกรมควบคุมบนระบบปฏิบัติการได้

คำสำคัญ: ซีเอ็นซี, ระบบควบคุม, เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, เอ็มคิวทีที

Abstract

This research has brought the Internet of Things technology to support automatic machine development. It aims to design and develop a mini CNC milling machine-controlling system with high-precision suitable for wood, acrylic sheet and small workpieces, and easy to move when compared with a large machine. This research was carried out by using ADDIE Model, including analysis, design, development, implementation, and outcome evaluation of small CNC milling machines. The CNC milling machine operation can be controlled via a web browser developed by Node-RED software and the instruction dataset is transmitted by MQTT Protocol, a core standard protocol of ISO/IEC 20922:2016. The results showed that the movement of the mini CNC milling machine can be controlled precisely. The variation in the X-axis is 1.00, the Y-axis is 1.00, and the Z-axis is 0.99, and it also reduces the problem of installing the driver package on the operating system.

Keywords: CNC, Control system, Internet of things technology, MQTT

1. บทนำ

อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of things) หรือ ไอโอที (IoT) ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของผู้คนมากขึ้น การเชื่อมโยงสิ่งต่างๆ เข้าสู่อินเทอร์เน็ตทำให้การควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ภายในครัวเรือนหรือที่ทำงานผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต และนำไปประยุกต์ใช้งานกันงานด้านอื่น ๆ อีกมากมาย เช่น Kodali & Anjum (2018) ได้ทำการพัฒนาระบบอัตโนมัติภายในบ้านบนอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยใช้ Node-RED ได้สรุปผลการวิจัยว่า Node-RED เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการเชื่อมโยงอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้เกิดการตั้งค่าการเชื่อมต่อที่รวดเร็วและง่ายดาย แกดเจ็ตถูกเชื่อมโยงเข้าด้วยกันกับ ESP8266 และ MQTT ที่ใช้ Mosquitto โดยใช้ Node-RED มีการตั้งค่าการเชื่อมต่อสำหรับการตรวจสอบและควบคุมจากระยะไกลได้ Baig *et al.* (2021) ได้ศึกษาวิจัยการออกแบบการใช้งาน IoT และแพลตฟอร์มการซื้อขายพลังงานแบบเพียร์ทูเพียร์บนบล็อกเชนโดยใช้โปรโตคอล ESP32-S2 Node-Red และ MQTT

เทคโนโลยีซีเอ็นซี (Computerized numerical control: CNC) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นงานกัด (Milling) งานกลึง (Turning) ชิ้นส่วนรถยนต์ อะไหล่ อุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ รวมถึงงานกัดชิ้นงานไม้ แผ่นอะคริลิก ล้วนแล้วแต่อาศัยเครื่องจักรซีเอ็นซีในการสร้างซีเอ็นซี (G-code) นั้นอาศัยหลักการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์-วิทยาศาสตร์ ได้แก่

เรื่องเรขาคณิตวิเคราะห์ ระบบพิกัด เส้นตรง วงกลม เส้นโค้ง แรง ความเร็ว การเคลื่อนที่ เป็นต้น เนื่องจากเครื่องซีเอ็นซีส่วนมากจะมีขนาดใหญ่ และราคาแพง จึงไม่เหมาะกับงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ซึ่ง เครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กสามารถนำไปประยุกต์การใช้งานได้หลากหลายอาทิ เช่น งานประเภทกัด แกะสลัก เจาะ เซาะร่อง โดยชิ้นงานที่ได้จะเป็นงานในลักษณะสองมิติและสามมิติ โดยทั่วไประบบควบคุมเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กจะใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุม ออกแบบมาใช้เฉพาะงาน และยังมีราคาสูง ซึ่ง Prianto (2019) ได้ศึกษาและออกแบบ CNC ขนาดเล็กเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการเขียนโปรแกรมและควบคุม CNC ของนักเรียน ที่เป็นเครื่องมือที่ใช้ได้จริงในการเรียนรู้และปรับให้เข้ากับความต้องการของยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม 4.0 ด้วยลักษณะการทำงานอัตโนมัติ Qureshi (2019) ได้ออกแบบมินิซีเอ็นซีขนาดเล็กโดยใช้ Arduino Uno เพื่อแกะสลักบนวัสดุอะคริลิกและอยู่ในต้นทุนที่ต่ำ Shashidhar *et al.* (2020) ได้ศึกษาการออกแบบและพัฒนาเครื่อง CNC ขนาดเล็กสำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม โดยการผสมผสานคุณสมบัติของอินเทอร์เน็ตเพช PC มาตรฐานเข้ากับระบบ CNC ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในระบบฝังตัวที่ใช้ Arduino

จากการศึกษาข้างต้นการควบคุมเครื่องกัดชิ้นงานขนาดเล็กแบบเดิมนั้น เป็นการควบคุมด้วยชุดคำสั่งโปรแกรมที่ทำงานบนระบบคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โปรแกรมควบคุมเดิมไม่รองรับการติดตั้งบนระบบปฏิบัติการที่มีหลากหลาย อาทิเช่น Linux, MacOS, Android เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากในการใช้งาน เพื่อให้การใช้งานและควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีมีความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดพัฒนาระบบควบคุมที่สามารถรองรับการทำงานได้จากทุกระบบปฏิบัติการบนเว็บเบราว์เซอร์ เพื่อลดปัญหาในการติดตั้งชุดโปรแกรมคำสั่งบนระบบปฏิบัติการ การพัฒนาระบบควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดเล็ก โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดเล็ก โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

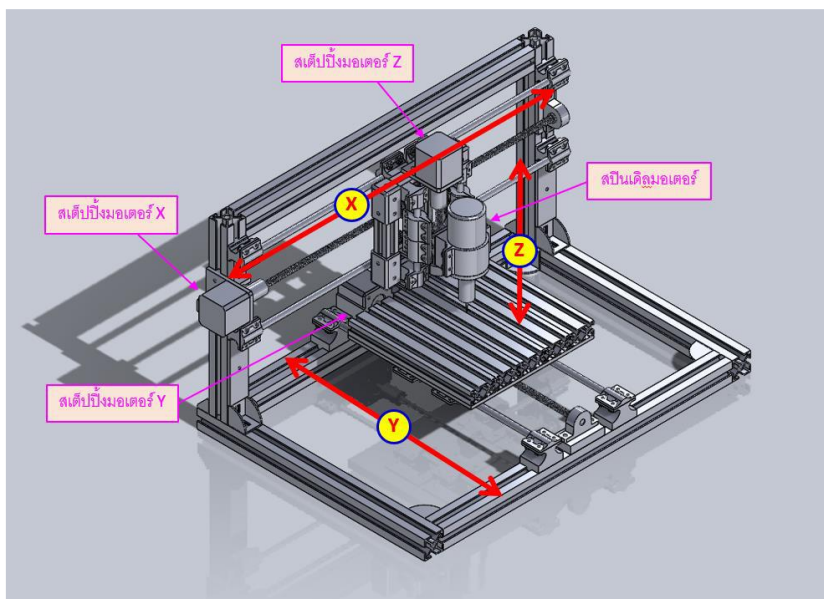
2.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดเล็ก โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

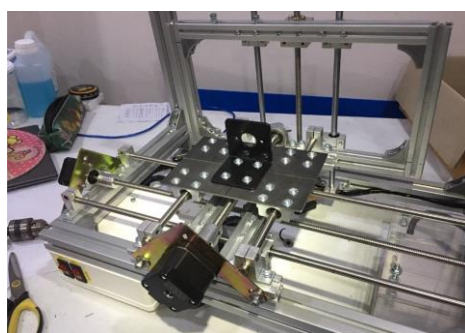
3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดเล็ก

ขั้นตอนนี้จะเป็นการออกแบบและสร้างเครื่องกัดซีเอ็นซี โดยได้ทำการออกแบบโครงสร้างของเครื่องกัดซีเอ็นซีด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อกำหนดขนาดและส่วนประกอบต่าง ๆ จากนั้นทำ

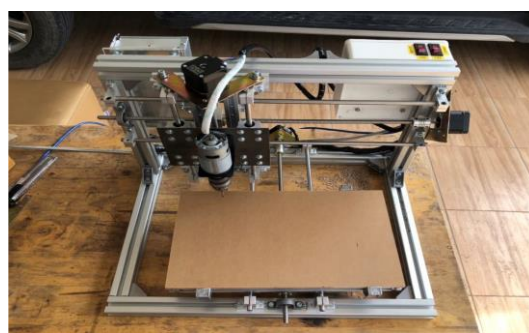
การเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการรับคำสั่งตามโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ส่วนหน่วยประมวลผลจะประกอบด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำหน้าที่รับข้อมูลจากแอปพลิเคชันในการสั่งงานสเต็ปเปอร์มอเตอร์ ให้หมุนตามระยะที่กำหนดในตำแหน่งแนวแกน X แนวแกน Y และแนวแกน Z ดังแสดงในภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



ภาพที่ 1 การออกแบบเครื่องกัดซีเอ็นซี



(ก)



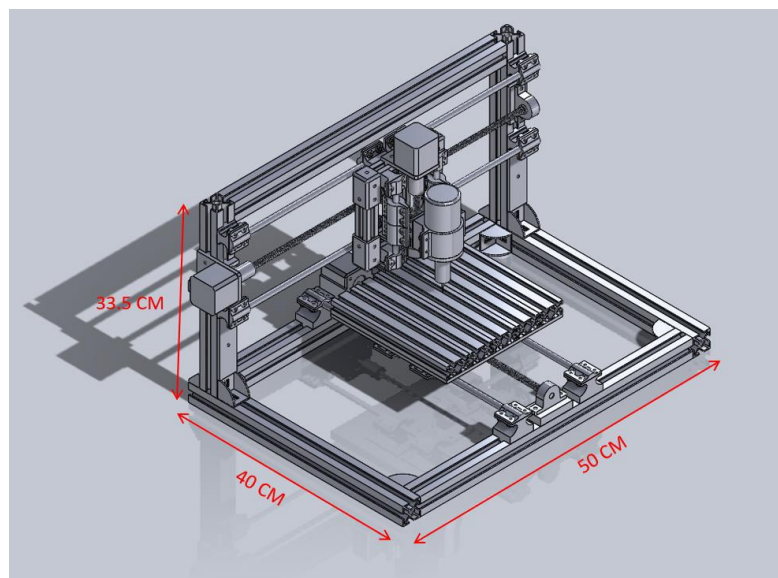
(ข)

ภาพที่ 2 เครื่องกัดซีเอ็นซี

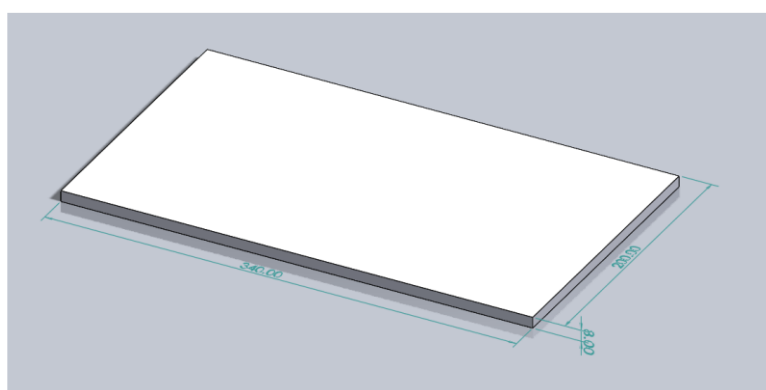
(ก) ก่อนใช้งาน (ข) ขณะใช้งาน

เครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดเล็กที่ได้รับการพัฒนาสามารถให้บริการการออกแบบของขนาดสูงสุด 500 มม. x 400 มม. x 350 มม. ดังแสดงในภาพที่ 3 และรองรับการกัดชิ้นงานขนาด 340 มม. X 200 มม. x 8 มม. ดังแสดงในภาพที่ 4 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินการทดลองการใช้เครื่องมือตัดที่ผลิตจากไม้และแผ่นอะคริลิก โดยส่วนประกอบหลักของเครื่องกัดซีเอ็นซีประกอบไปด้วย 1) สปินเดิลมอเตอร์

1200 รอบต่อวินาที 2) สเต็ปเปอร์มอเตอร์สำหรับควบคุมแกน X แกน Y และแกน Z 3) Screw rod linear 500 mm ทำให้ตัว Spindle motor เคลื่อนที่ในแนวแกน X แนว Y และ แกน Z ในแนวเส้นตรง



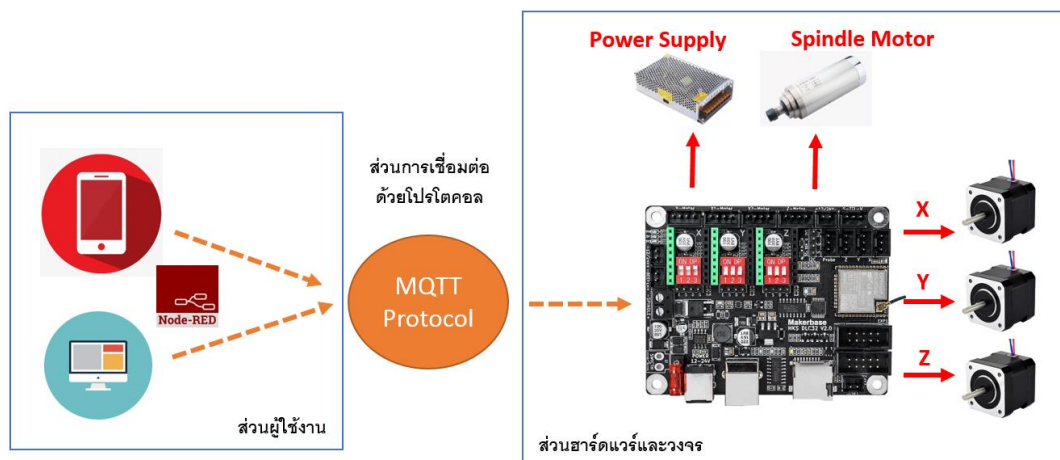
ภาพที่ 3 ขนาดของเครื่องกัดซีเอ็นซี



ภาพที่ 4 พื้นที่การทำงานของชิ้นงาน

3.2 การออกแบบระบบฮาร์ดแวร์

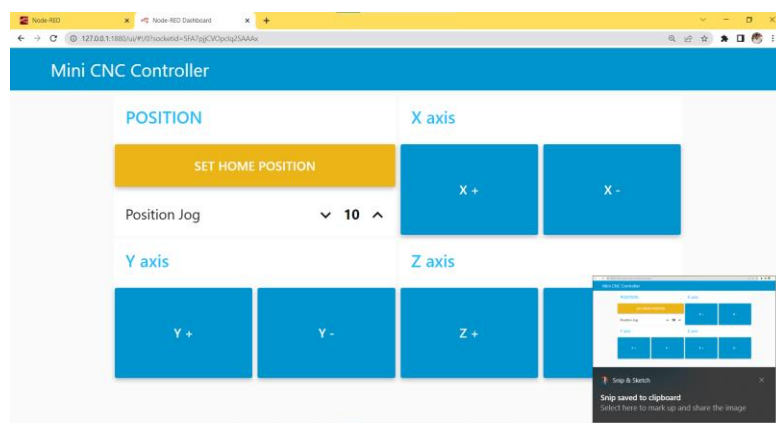
ในการออกแบบระบบฮาร์ดแวร์และสร้างวงจรการเชื่อมต่อของเครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดเล็ก ประกอบด้วยบอร์ด MKS DLC32 เป็นชุดตัวควบคุมหลักที่รองรับการเชื่อมต่อกับสัญญาณไร้สาย โดยจะสั่งให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์ของเครื่องกัดซีเอ็นซีทั้ง 3 แกน ทำงานตามระยะที่กำหนดของชุดคำสั่งโปรแกรมจากส่วนผู้ใช้งานด้วยเว็บเบราว์เซอร์ และส่งค่าข้อมูลไปยังเครื่องกัดซีเอ็นซีด้วยโปรโตคอล MQTT ดังแสดงในภาพที่ 5



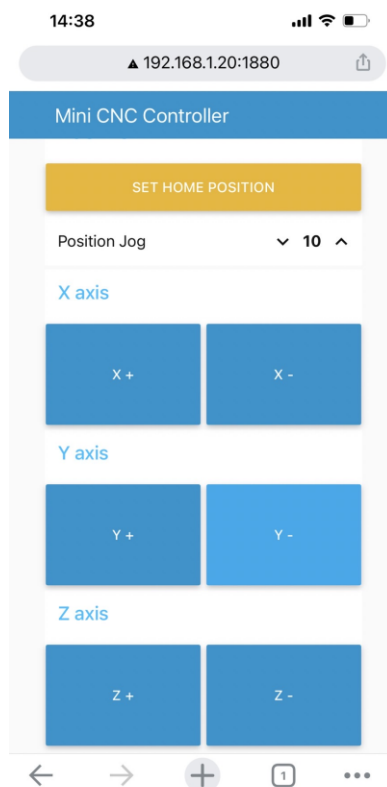
ภาพที่ 5 ระบบฮาร์ดแวร์และวงจรการเชื่อมต่อ

3.3 การออกแบบและพัฒนาโปรแกรม

ในการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมแกนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ทั้ง 3 แกน พัฒนาด้วยซอฟต์แวร์ Node-RED และแสดงผลหน้าจอส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (User interface) ที่รองรับการทำงานด้วยเว็บเบราว์เซอร์ ซึ่งสามารถใช้ได้ทุกแพลตฟอร์ม ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ



ภาพที่ 6 หน้าจอควบคุมการทำงานบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล



ภาพที่ 7 หน้าจอควบคุมการทำงานบนมือถือ

3.4 วิธีการทดลอง

การทดลองประสิทธิภาพของระบบควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดเล็ก โดยใช้เทคโนโลยี อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ได้ทำการกำหนดระยะเพื่อทดสอบการเคลื่อนที่ของแกนบนเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกน ประกอบด้วย แกน X แกน Y และแกน Z โดยทำการป้อนคำสั่งให้มอเตอร์ทำงานตามระยะที่กำหนดด้วยแอปพลิเคชันที่พัฒนาด้วยซอฟต์แวร์ Node-RED เชื่อมสัญญาณข้อมูลด้วยโปรโตคอล MQTT ทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้งต่อระยะแกน เพื่อทำทดสอบระยะเวลาการเคลื่อนที่ของแนวแต่ละ แกนด้วยวิธีการ Jog และวัดระยะที่เกิดขึ้นจริงด้วยไมโครมิเตอร์ เพื่อทดสอบระยะที่เกิดขึ้นจริงของแต่ละแกน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คำสั่งที่กำหนดระยะการเคลื่อนที่

คำสั่ง	ระยะ (มม.)	คำอธิบาย
X10	10	ระยะบวก 10 แนวแกน X
X20	20	ระยะบวก 20 แนวแกน X
X30	30	ระยะบวก 30 แนวแกน X
X-10	-10	ระยะลบ 10 แนวแกน X
X-20	-20	ระยะลบ 20 แนวแกน X
X-30	-30	ระยะลบ 30 แนวแกน X
Y10	10	ระยะบวก 10 แนวแกน Y
Y20	20	ระยะบวก 20 แนวแกน Y
Y30	30	ระยะบวก 30 แนวแกน Y
Y-10	-10	ระยะลบ 10 แนวแกน Y
Y-20	-20	ระยะลบ 20 แนวแกน Y
Y-30	-30	ระยะลบ 30 แนวแกน Y
Z10	10	ระยะบวก 10 แนวแกน Z
Z20	20	ระยะบวก 20 แนวแกน Z
Z30	30	ระยะบวก 30 แนวแกน Z
Z-10	-10	ระยะลบ 10 แนวแกน Z
Z-20	-20	ระยะลบ 20 แนวแกน Z
Z-30	-30	ระยะลบ 30 แนวแกน Z

4. ผลการวิจัย

ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน X แนวแกน Y และแนวแกน Z การวัดประเมินผลการเคลื่อนที่ตามระยะนั้น เป็นการตรวจสอบความถูกต้องก่อนที่นำไปสั่งใช้งานกับชิ้นงานจริง เพื่อให้ได้ระยะที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด กระบวนการทดสอบนั้นทำได้โดยการใช้กดปุ่มคำสั่งบนแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น ด้วยการส่งคำสั่งให้มอเตอร์ทำงานที่ละแกน และใช้เวอร์เนียร์ในการวัดระยะที่เกิดขึ้นจริง ทำการเทียบกับระยะคำสั่งที่ป้อน ดังแสดงในตารางที่ 2 3 และ 4 ตามลำดับ

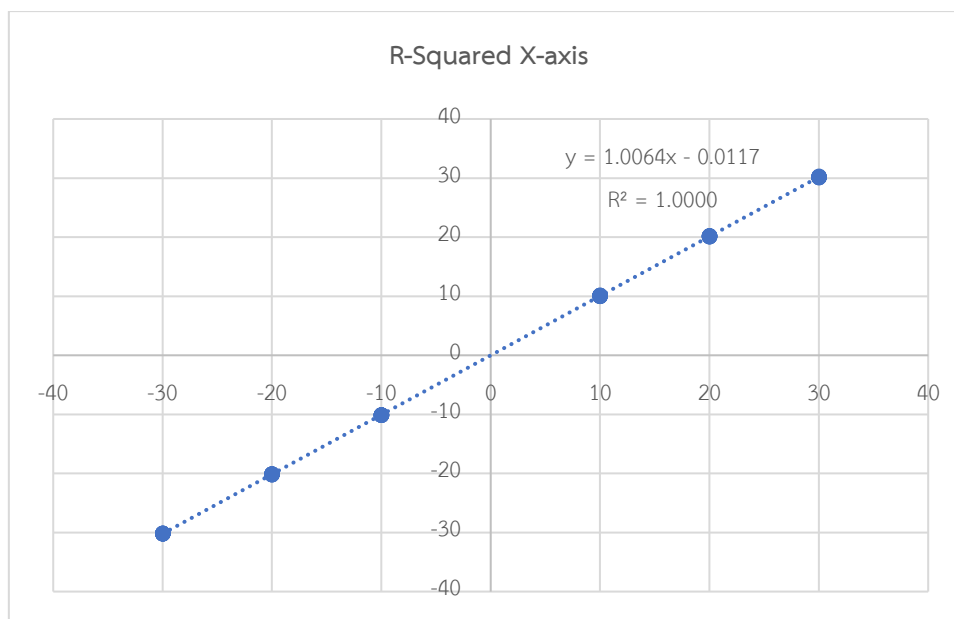
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบระยะเคลื่อนที่ของแกน X

ครั้งที่/ระยะ	X10	X20	X30	X-10	X-20	X-30
1	10	20.2	30.15	10.1	20.2	30.15
2	10.1	20.1	30.2	10.15	20.15	30.1
3	10	20.15	30.15	10.1	20.1	30.15
4	10.1	20.1	30.1	10.1	20.15	30.25
5	10.1	20.15	30.15	10.15	20.2	30.2
6	10	20.05	30.1	10.1	20.1	30.15
7	10.1	20.1	30.15	10.1	20.2	30.25
8	10.15	20.15	30.2	10.15	20.1	30.15
9	10.1	20.1	30.3	10.1	20.15	30.15
10	10.15	20.2	30.15	10.15	20.15	30.2
Mean	10.08	20.13	30.165	10.12	20.15	30.175
SD	0.06	0.05	0.06	0.03	0.04	0.05
SSE	0.09	0.19	0.30	0.15	0.24	0.33

จากตารางที่ 2 จากผลการทดสอบระยะการเคลื่อนที่แนวแกน X ผลการวิเคราะห์ผลลัพธ์ผลรวมของข้อผิดพลาดกำลังสอง (Error sum of squares, SSE) สูงสุดในระยะบวกคือ X30 มีค่า 0.30 และระยะลบคือ X-30 มีค่า 0.33 จะเห็นได้ว่าในระยะที่เพิ่มขึ้นในแนวแกน X จะมีค่า SSE ที่เพิ่มขึ้นด้วย และมีค่าความผันแปร (R-squared) มีค่าเท่ากับ 1.00 และลักษณะของกราฟเป็นในแนวเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 8

จากตารางที่ 3 จากผลการทดสอบระยะการเคลื่อนที่แนวแกน Y ผลการวิเคราะห์ผลลัพธ์ผลรวมของข้อผิดพลาดกำลังสอง (Error sum of squares, SSE) สูงสุดในระยะบวกคือ Y30 มีค่า 0.42 และระยะลบคือ Y-30 มีค่า 0.40 จะเห็นได้ว่าในระยะที่เพิ่มขึ้นในแนวแกน Y จะมีค่า SSE ที่เพิ่มขึ้นด้วย และมีค่าความผันแปร (R-Squared) มีค่าเท่ากับ 1.00 และลักษณะของกราฟเป็นในแนวเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 9

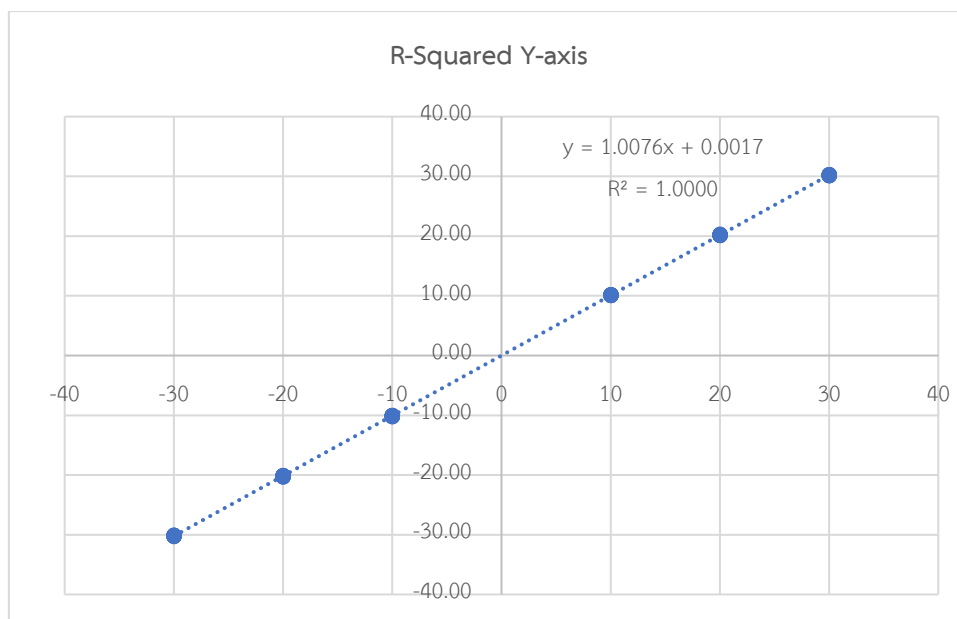
จากตารางที่ 4 จากผลการทดสอบระยะการเคลื่อนที่แนวแกน Z ผลการวิเคราะห์ผลลัพธ์ผลรวมของข้อผิดพลาดกำลังสอง (error sum of squares หรือ SSE) สูงสุดในระยะบวกคือ Z30 มีค่า 3.64 และระยะลบคือ Z-30 มีค่า 2.90 จะเห็นได้ว่าในระยะที่เพิ่มขึ้นในแนวแกน X จะมีค่า SSE ที่เพิ่มขึ้นด้วย และมีค่าความผันแปร (R-Squared) มีค่าเท่ากับ 0.99 และลักษณะของกราฟเป็นในแนวเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 8 กราฟแสดงข้อมูลค่าความผันแปร (R-squared) ในแนวนอน X

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบระยะเคลื่อนที่ของแกน Y

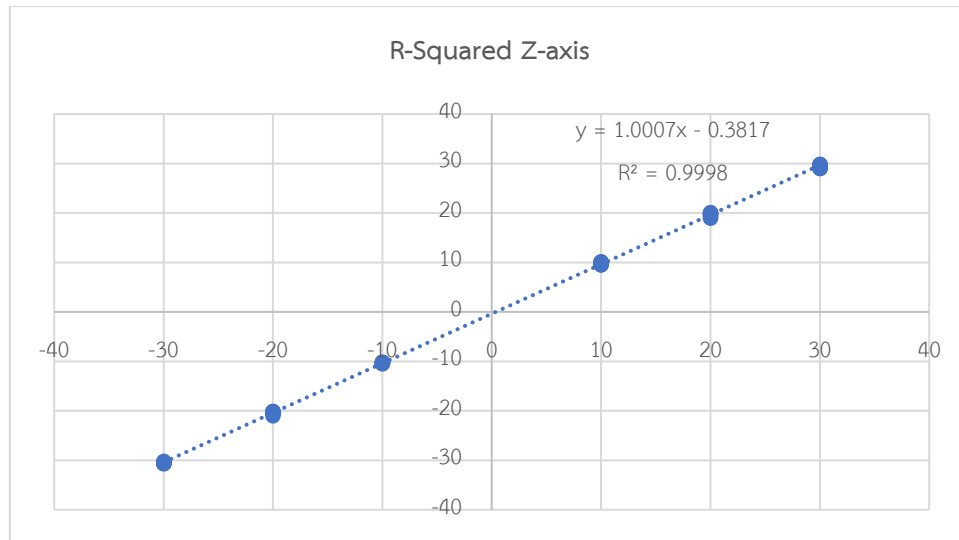
ครั้งที่/ระยะ	Y10	Y20	Y30	Y-10	Y-20	Y-30
1	10.15	20.2	30.15	10.1	20.2	30.15
2	10.1	20.2	30.3	10.1	20.1	30.3
3	10.2	20.1	30.3	10.2	20.15	30.1
4	10.1	20.15	30.15	10.15	20.15	30.15
5	10.15	20.2	30.15	10.05	20.3	30.15
6	10.1	20.2	30.3	10.1	20.1	30.3
7	10.2	20.15	30.1	10.1	20.3	30.2
8	10.1	20.15	30.15	10.15	20.15	30.15
9	10.1	20.3	30.1	10.25	20.1	30.2
10	10.2	20.15	30.2	10.2	20.15	30.2
Mean	10.14	20.18	30.19	10.14	20.17	30.19
SD	0.05	0.05	0.08	0.06	0.08	0.07
SSE	0.215	0.35	0.42	0.23	0.34	0.4



ภาพที่ 9 กราฟแสดงข้อมูลค่าความผันแปร (R-squared) ในแนวนอน Y

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบระยะเคลื่อนที่ของแกน Z

ครั้งที่/ระยะ	Z10	Z20	Z30	Z-10	Z-20	Z-30
1	9.8	19.5	29	10.2	21	30.6
2	9.5	19	29.6	10.5	20.5	30.7
3	10	19	29.8	10.3	20.3	30.6
4	9.5	19.8	29.8	10.2	20.2	30.2
5	10.1	19.7	29.6	10.3	20.5	30.6
6	9.8	20	29	10.5	20.5	30.6
7	9.5	20.1	29	10.3	20.3	30.4
8	9.8	19.6	29.8	10.2	20.2	30.6
9	9.6	19.8	29.6	10.3	20.1	30.5
10	10.1	20	29.8	10.3	20.2	30.4
Mean	9.77	19.65	29.5	10.31	20.38	30.52
SD	0.24	0.39	0.36	0.11	0.26	0.15
SSE	1.05	2.59	3.64	1.07	2.06	2.9



ภาพที่ 10 กราฟแสดงข้อมูลค่าความผันแปร (R-squared) ในแนวแกน Z

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากการพัฒนาระบบควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดเล็ก โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้ 3 รูปแบบคือ เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกน X แนวแกน Y และแนวแกน Z ผลการทดสอบทดสอบพบว่าสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดซีเอ็นซี โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ได้ถูกต้อง แนวแกน X ค่าความผันแปร (R-squared) มีค่าเท่ากับ 1 แนวแกน Y ค่าความผันแปร (R-squared) มีค่าเท่ากับ 1 และแนวแกน Z ค่าความผันแปร (R-squared) มีค่าเท่ากับ 0.99 โดยลักษณะกราฟทั้ง 3 แกน มีลักษณะเป็นในแนวเส้นตรง ในแนวแกน X และแกน Y เมื่อเปรียบเทียบในแนวแกน Z ค่า มีค่าแปรผันน้อยกว่า เนื่องจากชุดสปีนเดิลมอเตอร์ในแนวแกน Z มีการรับน้ำหนักในแนวตั้งที่มากกว่า การใช้งานระบบควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีบนเว็บเบราว์เซอร์ ช่วยลดปัญหาในการติดตั้งชุดโปรแกรมควบคุมบนระบบปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลได้

จากการศึกษา ออกแบบ และทดลอง ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ควรเพิ่มส่วนของการแจ้งเตือนในกรณีที่เครื่องกัดซีเอ็นซีมีการทำงานที่ผิดพลาด และทำการบันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูล
2. สามารถนำองค์ความรู้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเข้าไปใช้งานควบคุมเครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรม เพื่อรองรับอุตสาหกรรม 4.0 และ 5.0 ในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ

7. เอกสารอ้างอิง

- รวี อุตตมธนิทร์. (2541). การสร้างต้นแบบส่วนควบคุมเครื่องกัดแนวตั้งซีเอ็นซี. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- Aghenta, L.O., & Iqbal, T. (2019). Design and implementation of a low-cost, open source IoT-based SCADA system using ESP32 with OLED, ThingsBoard and MQTT protocol. **AIMS Electronics and Electrical Engineering**, 4(1), 57-86. Doi: [10.3934/ElectrEng.2020.1.57](https://doi.org/10.3934/ElectrEng.2020.1.57)
- Baig, M.J.A., Iqbal, M.T., Jamil, M., & Khan, J. (2021). Design and implementation of an open-Source IoT and blockchain-based peer-to-peer energy trading platform using ESP32-S2, Node-Red and, MQTT protocol. **Energy reports**, 7, 5733-5746.
- Kodali, R.K., & Anjum, A. (2018). **IoT based home automation using node-red**. In 2018 Second International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), Bangalore, India. Doi: [10.1109/ICGCIoT.2018.8753085](https://doi.org/10.1109/ICGCIoT.2018.8753085)
- Kodali, R. K., & Soratkal, S. (2016). **MQTT based home automation system using ESP8266**. In 2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC), pp.1-5. Doi: [10.1109/R10-HTC.2016.7906845](https://doi.org/10.1109/R10-HTC.2016.7906845)
- Patel, P.N.P., Pavagadhi, S.D., & Acharya, S.G. (2019). **Design and development of portable 3-Axis CNC router machine**. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 6(3), 1452-1455.
- Prianto, E., Maryadi, T.H.T., Sunomo, Malik, C. A. J., Purnomo, M. W., & Caecaria, O. M. (2019). Mini CNC Design to Increase Students' Programming and Control CNC Competencies. **Journal of Physics: Conference Series**, 1413. Doi: [10.1088/1742-6596/1413/1/012006](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1413/1/012006)
- Qureshi, M., Tungekar, M., & Hirani, A. (2019). **Design of Mini CNC using Arduino uno**. Retrieved from <http://ir.aiktclibrary.org:8080/xmlui/handle/123456789/3067>



- Rajalakshmi, A., & Shahnasser, H. (2017). **Internet of Things using Node-Red and alexa**. In 2017 17th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), QLD, Australia. Doi: [10.1109/ISCIT.2017.8261194](https://doi.org/10.1109/ISCIT.2017.8261194)
- Shashidhar, P.N., Yogesh, B.K., Kumar, H., & Somesh G.H. (2020). Design and Development of Mini CNC Machine for Small and Medium Scale Industries. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, 11(6), 505-510.
- Swamy, S.N., & Kota, S.R. (2020). An empirical study on system level aspects of Internet of Things (IoT). **IEEE Access**, 8, 188082-188134.
- Yousif, A.A., Ibrahim, M.A.T.B.I., Omer, M.O.S. & Mohamed, M.M.A. (2021). Design and Implementation of CNC Writing Machine Based on Arduino Micro-controller. **Journal of Karary University for Engineering and Science**. Doi: <https://doi.org/10.54388/jkues.v1i2.53>



การพัฒนาวิธีการทดสอบการโก่งของโมดิฟายโยชิตะ
เพื่อสร้างเส้นขีดจำกัดการย่นของวัสดุอะลูมิเนียมผสม
ด้วยวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

DEVELOPMENT OF MODIFIED YOSHIDA BUCKLING TEST TO
WRINKLING LIMIT CURVES ON ALUMINUM ALLOY SHEETS BY
FINITE ELEMENTS METHOD

ทณงค์ดี บุญญาณ^{1*}, ธราทิป ชัยมงคล²

Tanongsak Bunyan^{1*}, Taratip Chaimongkol

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน แขวงวังใหม่ กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330

² วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ แขวงวงศ์สว่าง กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10800

¹Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology, Wangmai, Bangkok, Thailand, 10330

²College of Industrial Technol, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Wong Sawang, Bangkok, Thailand, 10800

*Corresponding author e-mail: tanongsak.b@pit.ac.th

วันที่เข้ารับ 28 มกราคม 2565

วันที่แก้ไขบทความ 12 เมษายน 2565

วันที่ตอบรับบทความ 14 เมษายน 2565

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวิธีการทดสอบการโก่งตัวของโลหะแผ่นที่จะนำสู่การเสียหายด้วยการย่นโดยใช้วิธีการทดสอบการโก่งของโมดิฟายโยชิตะ วัสดุที่ใช้ทดสอบคือ อะลูมิเนียมผสมเกรด AA5052-H32 ความหนา 1 มิลลิเมตร ในทิศทางตามแนวรีดและขวางแนวรีด ในระหว่างการทดสอบการดึงชิ้นงานทั้งหมดได้ทำการวัดค่าความเครียดบนแผ่นชิ้นงานทดสอบด้วยระบบ Digital Image Correlation (DIC) ควบคู่ไปกับการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R และสมการการทำให้แข็งด้วยความเครียดแบบสวิตช์ เพื่อนำค่าความเครียดที่ได้ระบุตำแหน่งเริ่มเกิดการย่น (Wrinkling initiation) จากทฤษฎีการเบี่ยงเบนของเส้นทางความเครียดและนำจุดเบี่ยงเบนมาสร้างเส้นขีดจำกัดการย่น ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ทิศทางตามแนวรีดที่มีสัดส่วนความเครียดอยู่ที่ -0.5425 ทิศทางขวางแนวรีดมีสัดส่วนความเครียดอยู่ที่ -0.6848 ซึ่งเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R สามารถประเมินความแตกต่างกันของพื้นที่การขึ้นรูปได้ก่อนที่จะเสียหายด้วยการย่นได้อย่างแม่นยำ

คำสำคัญ: โมดิฟายโยชิตะ, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, เกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก

Abstract

This research is a development of buckling test of sheet metal causing wrinkling. This was conducted by using modified Yoshida buckling test. Aluminum alloy, AA5052-H32, with a thickness of 1.0 mm was tested in two directions: rolling direction and transverse direction. During the test process, the strain on the tested sheet was measured by using Digital Image Correlation (DIC) together with Finite Elements Method Model with anisotropic Hill'48 criterion and swift hardening equation. The strain value gained was used to identify wrinkling initiation from the theory of strain path change and the changed area was used to establish wrinkling limit curves. The results were found that in the rolling direction, the strain ratio was at -0.5425, and in the transverse direction, the ratio was at -0.6848. The anisotropic Hill'48 criterion was able to estimate the differences of the forming area before the damage occurred by wrinkling precisely

Keywords: Modified Yoshida buckling test, Finite elements method, Anisotropic yield criterion

1. บทนำ

การขึ้นรูปโลหะแผ่นจากวัสดุน้ำหนักเบาจำพวกอะลูมิเนียมผสม (Aluminum alloy) โดยเฉพาะเกรดพิเศษที่มีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูง ได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ในครัวเรือน แต่มีปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อการขึ้นรูปโลหะแผ่นอย่างหลีกเลี่ยงได้ยากคือ ปัญหาการเกิดรอยยับบนชิ้นงาน หลังจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ โดยสาเหตุการย่นดังกล่าวมักจะเกิดมาจากภาระภายนอกที่มากระทำ เช่น ความเค้นกด แรงดึงที่ไม่สม่ำเสมอ แรงเฉือนก่อให้เกิดเป็นภาระภายในคือความเครียด (Strain) ที่ส่งผลให้บริเวณนั้นมีการดัดตัวเสียรูปขึ้นมาเมื่อความเครียดมีความทวีคูณเพิ่มขึ้นมากก็จะทำให้เห็นเป็นรอยยับที่บริเวณผิวชิ้นงานได้อย่างชัดเจน (Banabic, 2010) เพื่อลดปัญหาการเกิดรอยยับจากกรณีที่เกิดขึ้นดังกล่าว Bayraktar *et al.* (2005) ได้ทำการทดสอบการโก่งของโยชิตะ เพื่อประเมินขีดจำกัดการโก่งตัวของโลหะแผ่นก่อนที่จะเสียหายด้วยการย่นได้แต่พบว่าบริเวณวิกฤตของการทดสอบ Yoshida buckling อยู่ในระดับความเครียดต่ำ (0.1% - 0.2%) ซึ่งยังไม่ครอบคลุมสำหรับการประเมินความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุอะลูมิเนียมผสมเกรดพิเศษที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ต่อมา Kim *et al.* (2000) ได้ทำการปรับปรุงขึ้นทดสอบโมดิฟายโยชิตะ โดยเริ่มจากการทำรูปทรงเพิ่มพื้นที่การจับยึด ให้สะดวกต่อการทดสอบใช้สัดส่วนความกว้างและความยาวที่แตกต่างกัน พบว่ามีระดับ

ความเครียดบริเวณวิกฤตเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 0.2% ถึง 0.25% ดังนั้นการทราบขอบเขตขีดจำกัดการย่นบนพื้นฐานการโค้งจึงมีความจำเป็นที่จะนำไปใช้ในการประเมินสภาพการย่นของวัสดุ การสร้างขอบเขตขีดจำกัดการย่นบนพื้นฐานการโค้งถือว่าเป็นทำนายพฤติกรรมเลียนแบบการย่นบริเวณผนัง (Non-flange wrinkling) จากงานวิจัยของ Han *et al.* (2015) ได้สร้างเส้นขีดจำกัดการย่นจากการทดสอบการโค้งของโมดไฟโยชิตะจากชิ้นทดสอบที่รูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกันด้วยวิธีตรวจสอบการเบี่ยงเบนของจุดความเครียด (Basification paths) ด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าบริเวณวิกฤตของชิ้นงานทดสอบมีระดับความเครียดที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมการเริ่มเกิดการย่นจนกระทั่งการเกิดการย่นแบบสมบูรณ์ โดย Won *et al.* (2019) ได้แสดงถึงเส้นขีดจำกัดการย่นที่มีความสำคัญในการประเมินความสามารถของการขึ้นรูปได้สำหรับโลหะแผ่นกับชิ้นงานที่ผ่านการลากขึ้นรูปลึกโดยใช้เส้น WLC ของวัสดุ TRIP1180 ทำนายควบคู่ไปกับการจำลองการลากขึ้นรูปในช่วงพลาสติกลักษณะความเสียหายของพื้นผิวชิ้นงาน โดยแสดงผลเป็นขอบเขตความปลอดภัยในการขึ้นรูป (Forming area) และขอบเขตการย่นบนพื้นฐานการโค้ง (Wrinkling area) ได้อย่างชัดเจนทำให้ทราบถึงความสามารถของการขึ้นรูปได้ของวัสดุก่อนที่จะเสียหายจากการย่นด้วยวิธีการทำนายโดยไม่ทำให้สิ้นเปลืองวัสดุในการทดลอง การสร้างเส้น WLC ไปใช้งานนั้นเพื่อให้การทำนายความแม่นยำได้มีเทคนิคการตรวจสอบความถูกต้องของเส้น WLC จากการจำลองและการทดลองโดย Du *et al.* (2020) ได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับเกณฑ์การครากของ Hill'48 ในการจำลองการทดสอบการโค้งของโมดไฟโยชิตะของวัสดุสแตนเลส 304 และการทดลอง พบว่าจุดความเครียดที่เบี่ยงเบนจากการจำลองเพื่อสร้างเส้น WLC มีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 2 % เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลอง

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาการสร้างเส้นขีดจำกัดการย่นในวัสดุอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5052-H32 ความหนา 1 มิลลิเมตร ในทิศทางตามแนวรีดและขวางแนวรีด เพื่อให้ครอบคลุมกับการประเมินความเสียหายจากการย่นในการขึ้นรูปวัสดุที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ด้วยการจำลองด้วยเกณฑ์การคราก Hill'48-R และตรวจสอบความเครียดบนแผ่นชิ้นงานทดสอบด้วยระบบ Digital Image Correlation (DIC) เพื่อที่จะทราบความสามารถในการขึ้นรูปได้ (Formability) ของวัสดุอะลูมิเนียมผสมเกรด AA5052-H32 ในแต่ละแนวรีดที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการนำวัสดุไปใช้งานในกระบวนการขึ้นรูปให้เหมาะสมก่อนจะเกิดความเสียหายด้วยการย่นบริเวณผนังของชิ้นงานจากการขึ้นรูป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

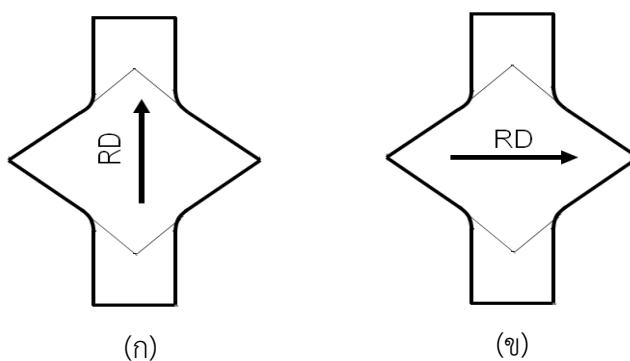
เพื่อพัฒนาสร้างเส้นขีดจำกัดการย่นบนพื้นฐานการโก่งสำหรับประเมินพื้นที่การขึ้นรูปได้ของวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด AA5052-H32 ทิศทางของแนวรีดแตกต่างกัน 2 ทิศทาง ได้แก่ ทิศทางตามแนวรีดและทิศทางขวางแนวรีด

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

สำหรับวิธีการดำเนินการเพื่อพัฒนาสร้างเส้นขีดจำกัดการย่นด้วยการทดสอบการโก่งของโมดิฟายโยซิตะ นั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ การเตรียมชิ้นทดสอบโมดิฟายโยซิตะด้วยทิศทางตามแนวรีดและทิศทางขวางแนวรีด การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R และการทดสอบการโก่งของโมดิฟายโยซิตะในห้องปฏิบัติการ

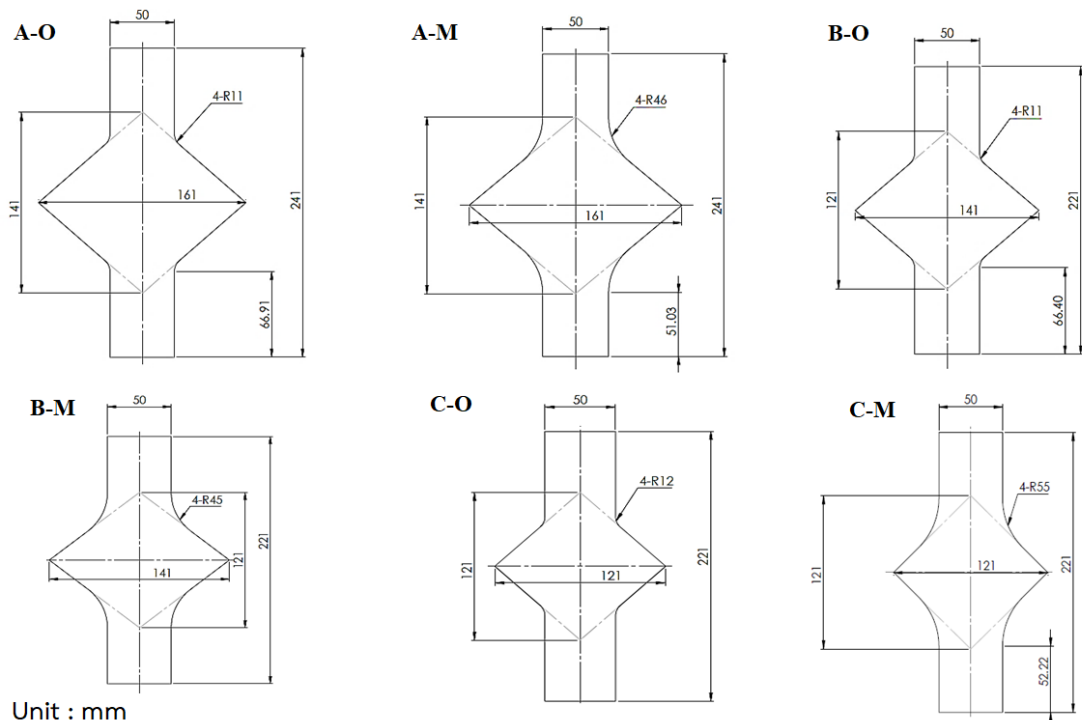
3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ในการทดสอบการโก่งของโมดิฟายโยซิตะ Han *et al.* (2014) ได้มีการเตรียมชิ้นงานทดสอบทั้ง 6 แบบ ในแนวทิศทางการรีดที่ 0 และ 90 องศาตามภาพที่ 1 โดยใช้ชิ้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร โดยมีรัศมีความโค้ง และสัดส่วนความกว้างต่อความยาวที่แตกต่างกัน และ ภาพที่ 2 ชื่อชิ้นทดสอบถูกแทนด้วยตัวอักษร A-O A-M B-O B-M C-O และ C-M โดยจะมีการเตรียมชิ้นงานสำหรับทดลองซ้ำชุดละ 3 ชิ้น และมีขนาดสัดส่วนความกว้างและความยาวที่แตกต่างกัน เพื่อให้เกิดความเครียดบริเวณวิกฤตได้ครอบคลุม



ภาพที่ 1 การตัดขึ้นทดสอบโมดิฟายโยซิตะทั้งสองแนวรีด

(ก) ทิศทางตามแนวรีด (ข) ทิศทางขวางแนวรีด



ภาพที่ 2 ขนาดความกว้าง ความยาว และรัศมีโค้ง ของชิ้นทดสอบโมดิฟายโยชิตะ

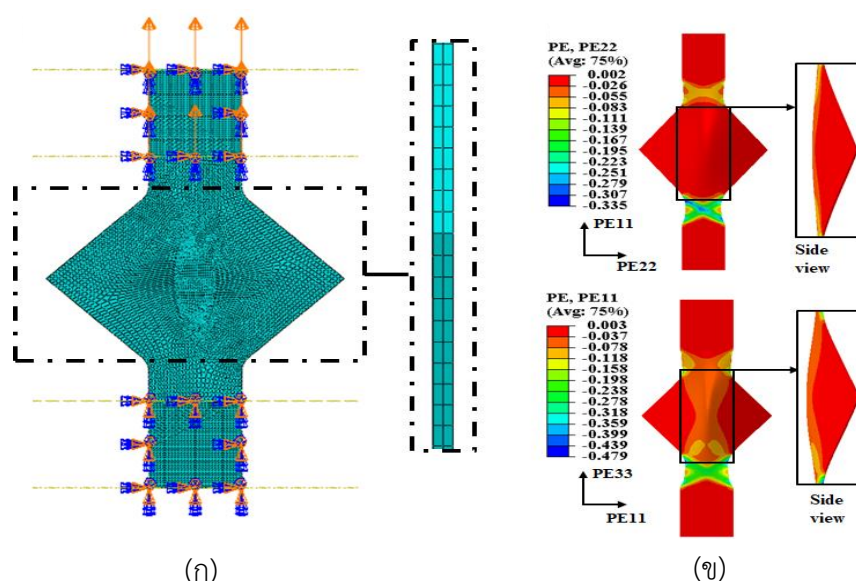
3.2 การจำลองเชิงตัวเลขจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองการทดสอบการโค้งโมดิฟายโยชิตะ

สร้างแบบจำลองพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบเป็นแบบทรงตัน (Solid) หลังจากนั้นจึงแบ่งแบบจำลองทรงตันเป็นเอลิเมนต์ (Solid elements) ทั้งชิ้นใช้ชนิดเอลิเมนต์ C3D8R จำนวน 2 ชั้น ผ่านความหนาโดยกำหนดให้เอลิเมนต์ทั้งหมดนั้นมีการเสียรูป (Deformed) และได้กำหนดขนาดเอลิเมนต์ (Element size) บริเวณพื้นที่วิกฤต (Local refinement) ที่ 0.5 mm การจัดตำแหน่งของแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 3 การจำลองการดึงทดสอบในงานวิจัยนี้ได้ใช้การคำนวณแบบพลวัตแบบชัดแจ้ง (Dynamic explicit) โดยกำหนดเกณฑ์การแตกแอนไอโซทรอปิกเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ แบบ Hill's 1948 planar anisotropic material model (Hill, 1948) ดังสมการที่ 1

$$2f(\sigma) = (G+H)\sigma_{xx}^2 + (F+H)\sigma_{yy}^2 - 2H\sigma_{xx}\sigma_{yy} + 2N\sigma_{xy}^2 = 1 \quad (1)$$

เมื่อ F, G, H และ N คือ ค่าคงตัวซึ่งแสดงคุณลักษณะแอนไอโซทรอปิก สามารถคำนวณหาได้จากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบการดึงแกนเดียวของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8 โดยนำค่าความเค้นครากของชิ้นทดสอบที่ 0 และ 90 องศา และตัวประกอบแอนไอโซทรอปิก

(r-value) ที่หาได้จากอัตราส่วนของความเครียดในแนวกว้างต่อความหนาจากชั้นทดสอบ ที่ 0° , 45° และ 90° การจำลองจะทำการทดสอบโดยการดึงขึ้นงานจนเกิดความเสียหายของชั้นทดสอบโมดิฟาย โยชิตะในทิศทางตามแนวรีดและทิศทางขวางแนวรีด เพื่อศึกษาบริเวณวิกฤตของชั้นทดสอบโดยการ นำเส้นแนวความเครียดที่ได้จากบริเวณวิกฤตมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดหลัก (Major strain) และความเครียดรอง (Minor strain) เพื่อที่จะทราบจุดเบี่ยงเบน (Bifurcation) ในการระบุว่าเป็นขอบเขตของการเสียหายด้วยการย่นของวัสดุ AA5052-H32 ในสองทิศทางว่ามีความ แตกต่างกันมากน้อยอย่างไร



ภาพที่ 3 แบบจำลองการทดสอบการโก่งของโยชิตะ (Yoshida buckling test)

ก) การกำหนดขอบเขตของการจำลอง (ข) ตัวอย่างผลลัพธ์ของการจำลอง

3.2.1 สมบัติวัสดุ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุอะลูมิเนียมผสม เกรด AA5052-H32 ความหนา 1.0 มิลลิเมตร โดย ได้นำโลหะแผ่นดังกล่าว ไปทำการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ตามมาตรฐาน ASTM E8 เพื่อที่จะ ได้ทราบความเค้นจริง (True stress) และความเครียดจริง (True strain) และตัวประกอบแอนไอโซ ทรอปิก (r-value) ถูกนำมาสร้างโค้งความเค้น-ไหลด ของวัสดุ AA5052-H32 อยู่บนพื้นฐาน ความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียดจริง ที่แสดงพฤติกรรมการณ์เริ่มต้นการครากตัว การ เริ่มเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic deformation) ตามตารางที่ 1 จากนั้นใช้สมการทำให้แข็งด้วย ความเครียดของสวิตต์ (Swift hardening law) ตามสมการที่ 2 เพื่อที่จะใช้ในการประเมินพฤติกรรม ของวัสดุในช่วงพลาสติกที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป ค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 2

$$\bar{\sigma} = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \quad (2)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ความต้านแรง

ε_0 คือ ความเครียดในช่วงยืดหยุ่น

ε_p คือ ความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร

n คือ เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของวัสดุ AA5052-H32 ความหนา 1 มิลลิเมตร

Test Direction	Yield Stress 0.2% (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	% Elongation Total	r-Value
0°	191.91	250.89	14.2	0.5058
45°	194.13	246.55	16.6	0.9298
90°	201.53	256.04	13.5	1.2798

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรจากสมการทำให้แข็งด้วยความเครียดของสวิตช์

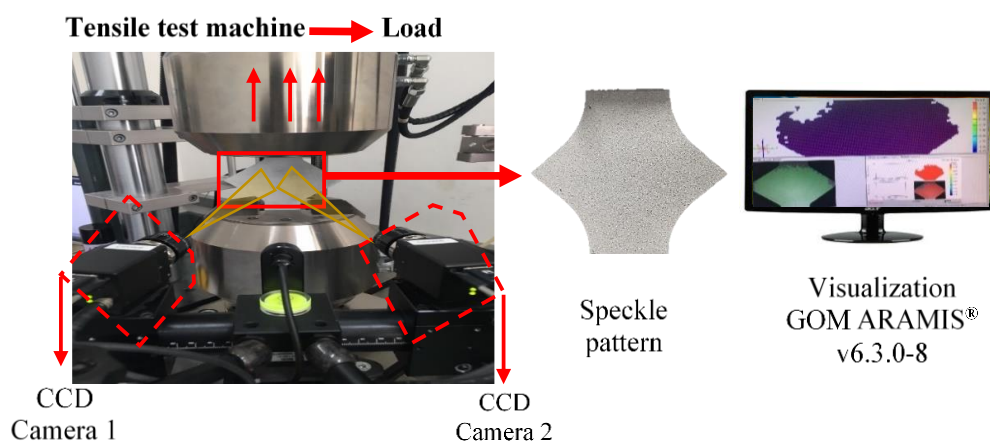
วัสดุ	สัมประสิทธิ์ความต้านแรง (K)	ความเครียดช่วงยืดหยุ่น (ε_0)	เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (n)
AA5052-H32	358.9449	0.0026	0.1236

3.3 การทดสอบการโก่งขึ้นงานโมดิฟายโพลิเอสเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Instron ขนาด 50 kN ควบคุมไปกับการวัดค่าความเครียดบนแผ่นขึ้นงานทดสอบด้วยระบบ DIC เมื่อทำความสะอาดชิ้นงานแล้วทำการพ่นสเปรย์ (Spackle patten) ลงบนผิวชิ้นงานโดยใช้สเปรย์สีขาวด้านชนิดสีที่ใช้ต้องเป็นสีที่ยึดตัว (Plastic dip) ไม่สะท้อนแสงพ่นเป็นสโตรกพ่นขึ้นงาน จากนั้นทิ้งไว้ 10-15 นาทีจนสีแห้งแล้วพ่นสเปรย์ทับจนหนาทั่วชิ้นงาน แล้วพ่นสเปรย์สีดำลงเป็นลวดลายเป็นระยะพ่นสเปรย์ดำควรมีระยะห่างประมาณ 1 ฟุต เมื่อพ่นสเปรย์สีดำแล้วจะพบว่าสีจะกระจายเป็นจุด (Dot) ความถี่ของจุดสีดำต้องตามมาตรฐาน ARAMIS®- 4M, 5M system ระหว่างพ่นสเปรย์ควรระมัดระวังไม่ให้สิ่งแปลกปลอมหรือฝุ่นตกลงไปเพื่อกันสีหลุดลอกออกจากผิว หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปจับยึดบนปากจับขึ้นงานโดยปากจับจะมีลายกันลื่นกันขึ้นงานเกิดการสลิประหว่างดึงตามภาพที่ 5 ส่วนการวัดค่า

ความเครียดขึ้นงานทดสอบได้ใช้เครื่องวัดความเครียดด้วยการเคลื่อนที่ ARAMIS® ตั้งระยะกล้องโฟกัส 34 CM ในถ่ายภาพเพื่อไปคำนวณวัดความเครียดบนโปรแกรม ARAMIS®-V6.3.0-8

การดึงขึ้นงานทดสอบโมดิฟายโยชิตะทั้ง 6 แบบต้องตั้งค่าวินาทีการบันทึกภาพให้สัมพันธ์กับความเร็วดึงทดสอบในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความเร็วดึงที่ 50 มิลลิเมตร/นาทีและความถี่ในการถ่ายภาพอยู่ที่ 1 วินาทีต่อ 1 ภาพ ดึงจนขึ้นงานแตกแล้วทำการหยุดเครื่องทดสอบและหยุดการถ่ายภาพจากกล้อง ARAMIS® แล้วบันทึกข้อมูลการทดสอบจากเครื่องทดสอบแรงดึง ได้แก่ แรง (Force) ระยะขจัด (Displacement) เวลา (Time) ในหน่วยที่เป็นวินาที ส่วนกล้อง ARAMIS® ทำการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมแล้วบันทึกข้อมูลในการทดสอบ คือลำดับภาพที่ขึ้นงานเริ่มเสียรูป (Stage) ค่าความเครียดหลักและค่าความเครียดรอง



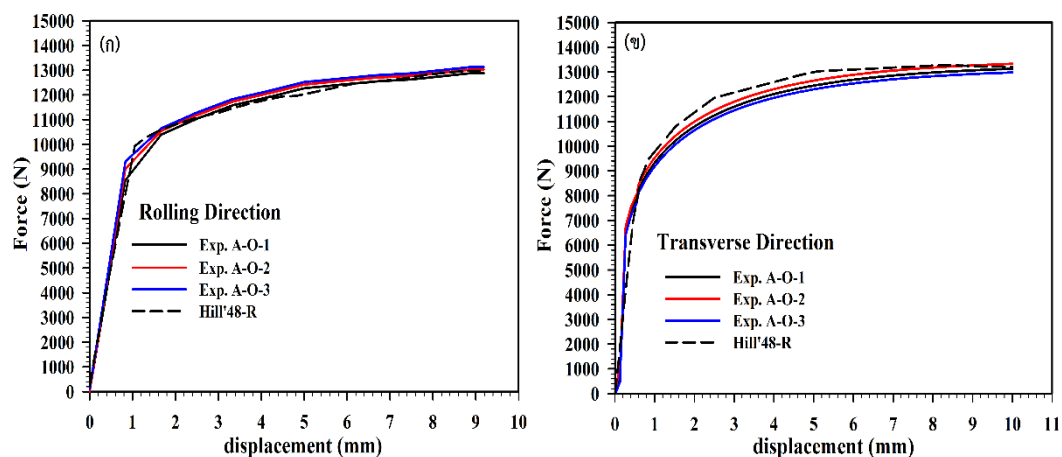
ภาพที่ 4 เครื่องทดสอบแรงดึงและเครื่องวัดความเครียดด้วยการเคลื่อนที่ ARAMIS®

4. ผลการวิจัย

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์

หลังจากการดึงทดสอบขึ้นงานโมดิฟายโยชิตะโดยมีการทดลองซ้ำชุดละ 3 ชิ้น ได้ทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเส้นโค้งแรงและระยะขจัดที่ขึ้นงานนั้นเกิดการเสียรูปกับผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยเกณฑ์การคราก Hill'48-R ของขึ้นงานโมดิฟายโยชิตะทั้งในทิศทางตามแนวรีดและทิศทางขวางแนวรีด ผลการจำลองและการทดลองพบว่าทิศทางขวางแนวรีด นั้นใช้แรงในการดึงขึ้นรูปมากกว่าทิศทางตามแนวรีด อันเนื่องมาจากสมบัติพลาสติก (r-value) นั้นมีค่ามากจึงเกิดการเสียรูปได้ยากกว่า ตามภาพที่ 5 (ก) และ (ข) และเพื่อเพิ่มความมั่นใจว่าแรงดึงขึ้นงานที่ระยะขจัดเดียวกันมีความไม่มีความแตกต่างกันและเป็นที่ยอมรับได้ที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติที่ 95% จึงได้ใช้การทดสอบทางสถิติแบบประชากร 2 กลุ่มโดยใช้การทดสอบแบบ t-test ดังแสดงผลการทดสอบทางสถิติดังตารางที่ 3 เนื่องจากขึ้นงานแต่ละกลุ่มนั้นมี Force-displacement ไม่เหมือนกันและจะมี

ตารางแสดงผลข้อมูลทางสถิติของชิ้นงานแต่ละกลุ่มจำนวนอีกมาก ผู้วิจัยแสดงผลการทดสอบสถิติของชิ้นงานกลุ่ม A-O ในทิศทางตามแนวรีด เมื่อพบว่าไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้งการจำลองและการทดลองจึงถือว่าโมเดลมีความถูกต้อง ส่วนชิ้นงานกลุ่มอื่นได้ทำการแสดงผลเป็นจุดความเครียดที่ได้จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ในแผนภาพความเครียดหลักและความเครียดรอง ภาพแสดงพื้นที่บริเวณวิกฤตของชิ้นงานทดสอบจาก DIC เทียบกับผลการจำลอง



ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแรงจากการจำลองกับการทดลองของชิ้นงานโมดิฟายโยชิเด ตัวอย่างชิ้นงานกลุ่ม A (ก) ทิศทางตามแนวรีด (ข) ทิศทางขวางแนวรีด

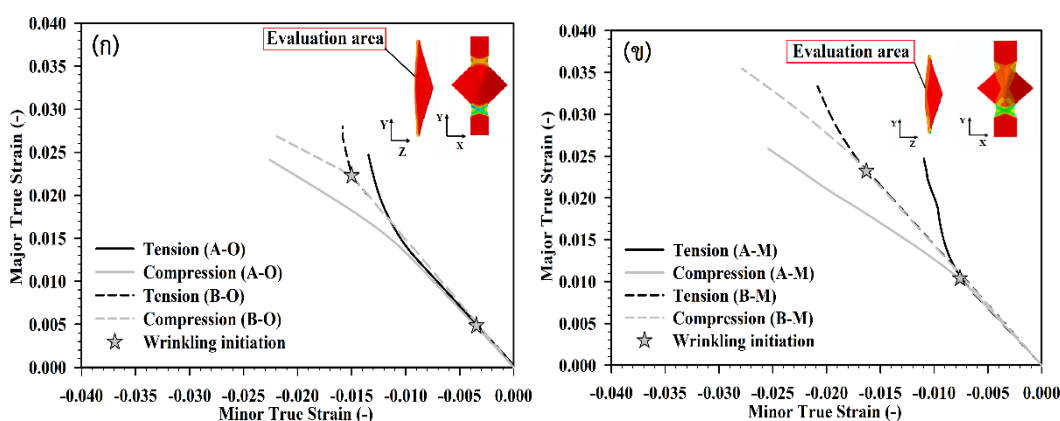
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบประชากร 2 กลุ่มระหว่างแรงดึงขึ้นรูปจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และแรงดึงขึ้นรูปการทดลองโดยไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของตัวอย่างชิ้นงานกลุ่ม A-O ในทิศทางตามแนวรีด

t-Test : Two-Sample Assuming Unequal Variances : Rolling Direction		
Mean	EXP. 13012.590	SIM 12879.257
Variance	EXP. 15833.333	SIM 10000.000
Observations	EXP. 3	SIM 3
Pearson Correlation	0.397	
Hypothesized Mean Difference	0.000	
df	2.000	
t Stat	1.835	
P(T<=t) one-tail	0.104	
t Critical one-tail	2.920	
P(T<=t) two-tail	0.208	
t Critical two-tail	4.303	
p value > 0.05	0.208	Reject the hypothesis H1
t Stat < t Critical		Reject the hypothesis H1
The Force-displacement between the simulation and experimental is non different. At the 95% confidence level		

ผลการทดสอบทางสถิติของประชากร 2 กลุ่ม โดยมี ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่ามีค่า p-value มีค่ามากกว่า 0.05 และค่า t Stat น้อยกว่า t Critical จึงยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) นั้นหมายความว่า แรงดึงขึ้นงานที่ระยะขจัดเดียวกันทั้งการจำลองและการทดลองตัวอย่างขึ้นงานกลุ่ม A-O พบว่าไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 นั้นแสดงว่าโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบการโก่งของโมติฟายโยชิตะมีความถูกต้อง

4.2 การระบุการเริ่มต้นของการย่นบนพื้นฐานการโก่ง

การพัฒนาเส้นโค้งขีดจำกัดการย่นจากการทดสอบการโก่งของโมติฟายโยชิตะ แสดงถึงขีดจำกัดการขึ้นรูป ของวัสดุ AA5052-H32 หนา 1 มิลลิเมตร ที่มีพื้นที่การขึ้นรูปได้ (Forming area) ก่อนที่จะเข้าพื้นที่การเสียหายด้วยการย่น (Wrinkling area) ในบริเวณวิกฤติ (Critical area) เส้นแนวความเครียด (Strain path) ในตำแหน่งที่เริ่มโก่งจะพบว่าเส้นแนวความเครียดจะเบี่ยงเบนออกจากกันตามงานวิจัยของ (Han *et al.*, 2014; Han *et al.*, 2015) และ Cheng *et al.* (2006) โดยวิธีการระบุการเริ่มต้นย่น อันเนื่องมาจากความเค้นกดส่งผลให้บริเวณวิกฤติมีผลทำให้เส้นทางความเครียดมีการเบี่ยงเบน ภาพที่ 6 ซึ่งก่อตัวเป็นการเริ่มต้นการย่นในการขึ้นรูปโลหะแผ่นเกิดจากส่วนประกอบของความเครียดสองชนิดได้แก่ พื้นที่ที่มีความเครียดดึง (Tension) และพื้นที่ที่มีความเครียดกด (Compression) ด้วยวิธีนี้สามารถนำมาสร้างเป็นแผนภาพขีดจำกัดการย่นโดยพิจารณาจากเส้นทางความเครียดที่เบี่ยงเบนออกจากกันนั้นเป็นจุดเริ่มต้นการย่น (Wrinkling initiation point)

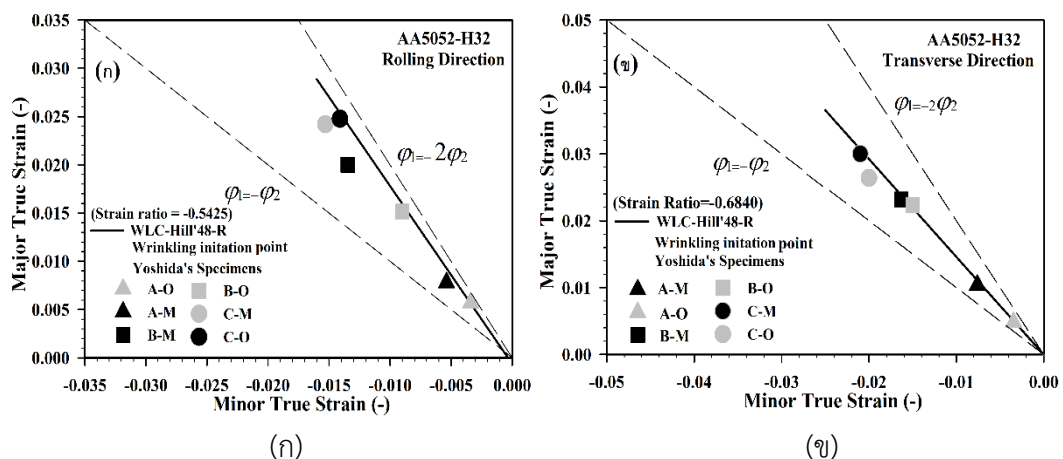


ภาพที่ 6 ตัวอย่างจุดเริ่มต้นการย่นของวัสดุ AA5052-H32 บนพื้นฐานเกณฑ์การคราก

แอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R (ก) ทิศทางตามแนวรีด (ข) ทิศทางขวางแนวรีด

ในสถานะการย่นบริเวณผนัง (Non-flange wrinkling) โดย Li *et al.* (2021) กล่าวว่าขอบเขตการขึ้นรูปอยู่ภายใต้สัดส่วนความเครียด $\phi = -2\phi_2$ คือในสภาวะการดึงแกนเดียว และ

$\varphi_1 = -\varphi_2$ สภาวะความเครียดเฉือนบริสุทธิ์ ผลจากการจำลองพบว่าชิ้นงานโมดิฟายโยชิเดะทั้ง 6 แบบแสดงผลเป็นจุดเริ่มต้นของการย่นเรียกจุดความเครียด (Strain point) โดยการทดสอบการดึงชิ้นงานในขนาดต่าง ๆ ในทิศทางตามแนวรีด และ ทิศทางขวางแนวรีด ทั้งสองทิศทางนั้นมีจุดที่ความเครียดเบี่ยงเบนจากนั้นนำจุดความเครียดมาทำการสร้างสมการเส้นตรงเพื่อที่จะทราบ พื้นที่ที่จะขึ้นรูปได้ และ พื้นที่ที่จะเสียหายด้วยการย่นตามภาพที่ 7

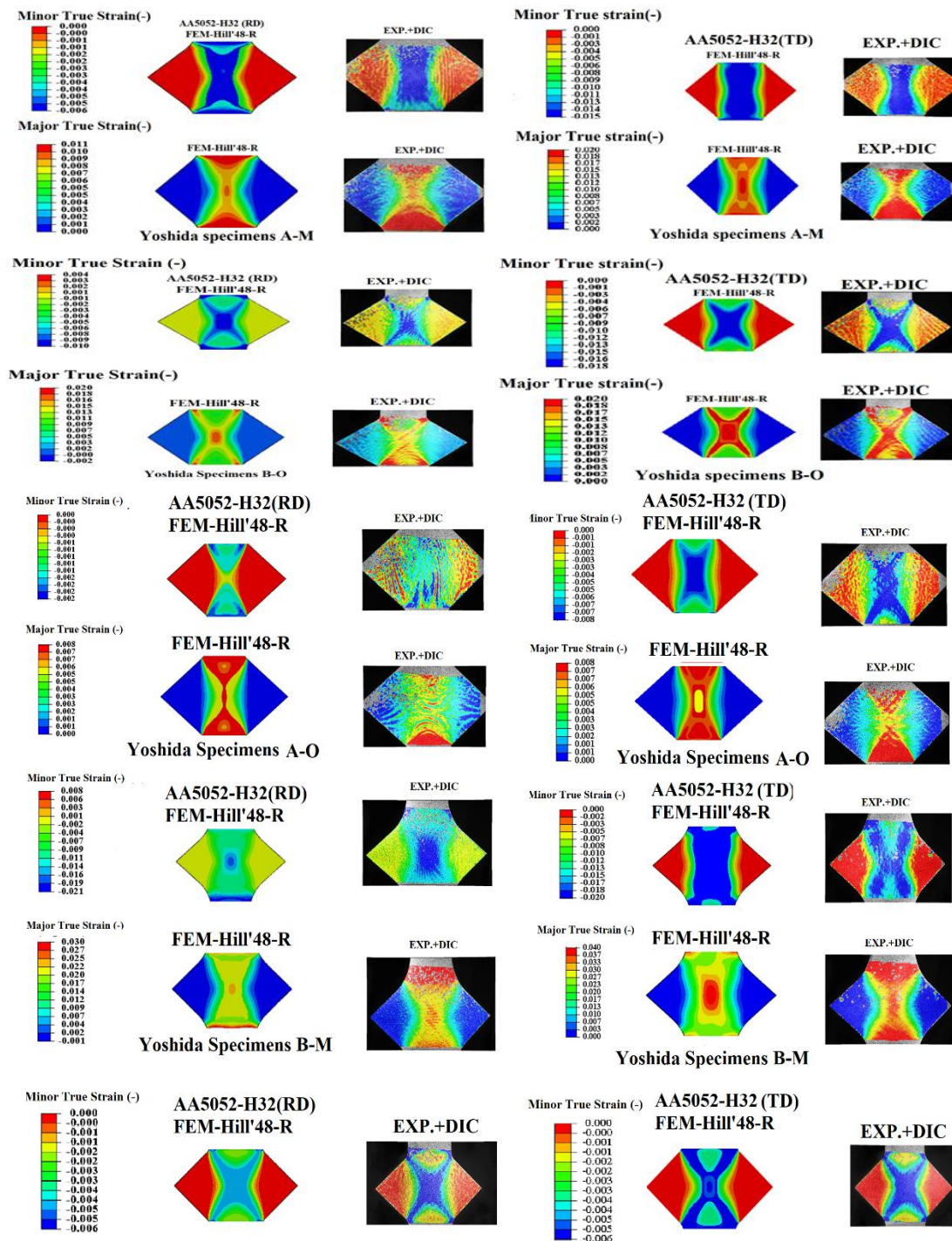


ภาพที่ 7 เส้นขีดจำกัดการย่นของ AA5052-H32 บนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R (ก) ทิศทางตามแนวรีด (ข) ทิศทางขวางแนวรีด

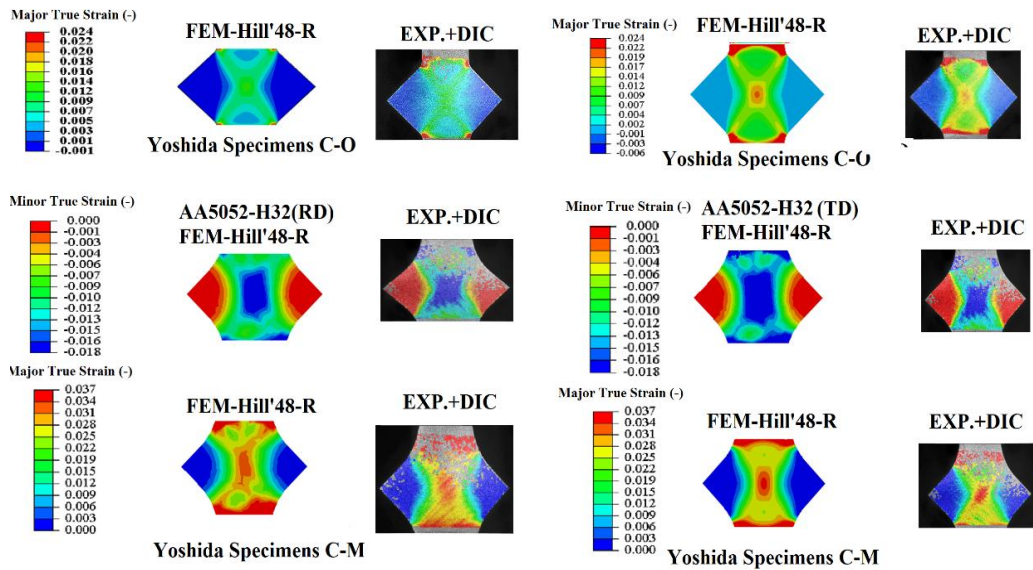
ผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นทดสอบโมดิฟายโยชิเดะ ด้วยเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกแบบ Hill'48-R บนพื้นฐานค่าสมบัติพลาสติกของวัสดุ พบว่าบริเวณวิกฤตของชิ้นงานทดสอบที่แสดงผลการจำลองนั้นมีความสอดคล้องกับการทดลองที่ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DIC นั้นมีบริเวณวิกฤตที่ใกล้เคียงกันตามงานวิจัยของ (Schleich *et al.* 2009; Du *et al.* 2020) ได้ทำการแสดงภาพการเสียรูปในตำแหน่งระยะขจัดเดียวกันโดยอ้างอิงมาจากจุดความเครียดที่ได้จากเส้นแนวความเครียดมีการเบี่ยงเบนโดยแสดงผล ภาพที่ 8 แสดงภาพเปรียบเทียบพื้นที่ความเสียหายในลักษณะค่าความเครียดหลักและความเครียดรอง ของชิ้นงานการทดสอบการโค้งงอโยชิเดะทั้งหมด

การทำทดลองชิ้นงานซ้ำได้ทำการแสดงจุดความเครียดที่ได้จากพื้นที่ความเสียหายจาก DIC ที่ระยะขจัดเดียวกันกับการจำลอง จากภาพที่ 8 จุดความเครียดทั้ง 6 จุดนั้นบ่งบอกสถานะการเริ่มต้นการย่นจะใช้ในการสร้างเส้น WLC ตามงานวิจัยของ (Du *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2015) โดยสมการควบคุมเชิงเส้นซึ่งอยู่บนข้อมูลจุดความเครียดที่บ่งบอกสถานะการเริ่มต้นการย่นบนพื้นฐานความเสียหายด้วยการโค้งงอทั้งการจำลองและการทดลองการทดสอบการโค้งงอโยชิเดะทั้ง 6 ชิ้นตาม

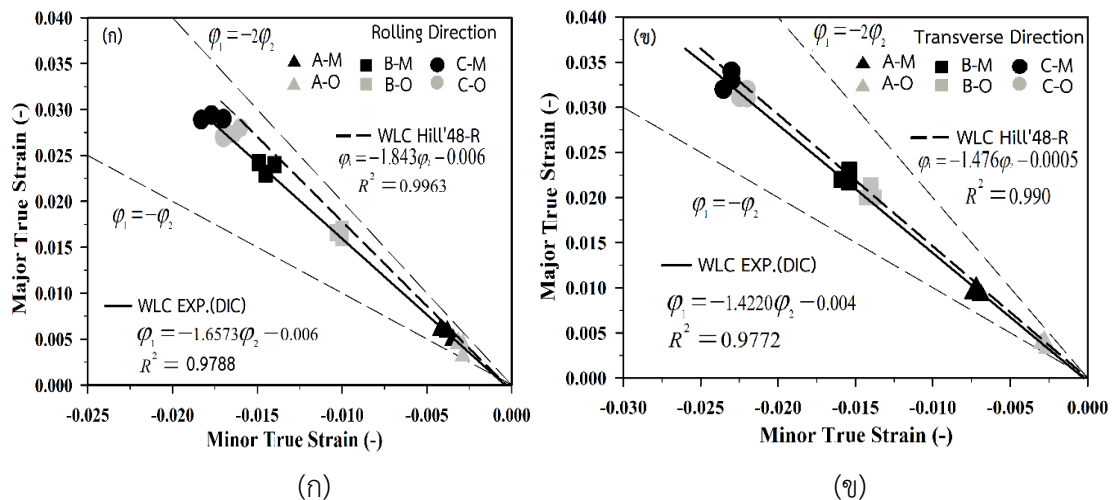
ภาพที่ 9 ที่มีค่าประมาณความคลาดเคลื่อนแนวรีดละ 2 % ซึ่งแสดงในงานวิจัยของ Du *et al.* (2020) และ การสร้างเส้นขีดจำกัดการย่น จากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 8 ตัวอย่างการตรวจสอบพื้นที่บริเวณวิกฤตของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับการวิเคราะห์ด้วย เทคนิค DIC ของชิ้นทดสอบโมติฟายโยชิดะ



ภาพที่ 8 ตัวอย่างการตรวจสอบพื้นที่บริเวณวิกฤตของการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับการวิเคราะห์ด้วย เทคนิค DIC ของชิ้นทดสอบโมติฟายโยชิเดะ (ต่อ)



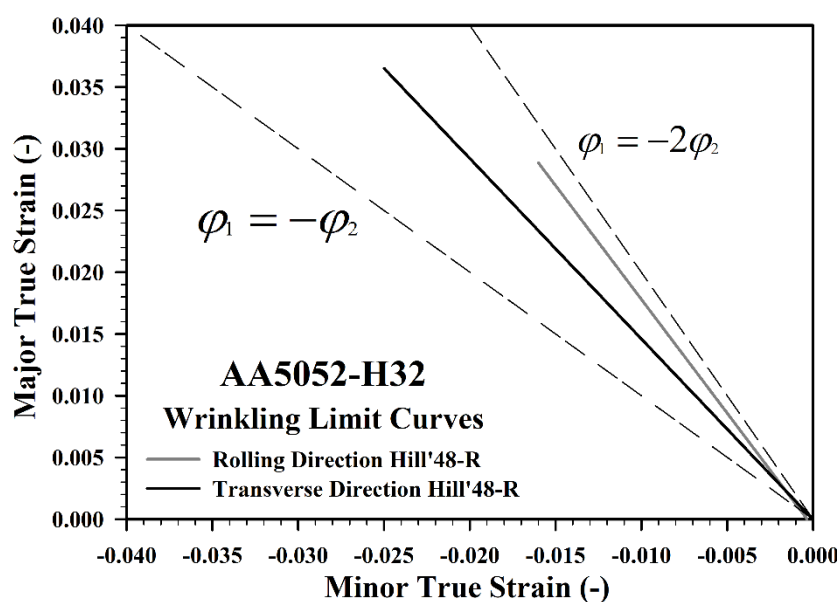
ภาพที่ 9 เส้นขีดจำกัดการย่นของ AA5052-H32 จาก DIC

(ก) ทิศทางตามแนวรีด (ข) ทิศทางขวางแนวรีด

4.3 การวิเคราะห์ผล

เส้นขีดจำกัดการย่นที่ได้จากการจำลองด้วยเกณฑ์การครากของ Hill'48-R ทั้ง 2 ทิศทางการรีด เมื่อถูกตรวจสอบความถูกต้องด้วยเทคนิค DIC แล้วจะนำไปทำการเปรียบเทียบพื้นที่การขึ้นรูปได้ ดังภาพที่ 10 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดหลักและความเค้นตรงของแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป พบว่าเส้นขีดจำกัดการย่นของวัสดุอะลูมิเนียมผสมสำหรับงานวิจัยนี้ มี

ผลการวิจัยความคล้ายคลึงกับผลการทดลองของ (Narayanasamy *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2021) โดยทำให้ในทิศทางตามแนวรีด มีสัดส่วนความเครียด (Strain ratio) อยู่ที่ -0.5425 และได้สมการควบคุมเชิงเส้นคือ $\phi_1 = -1.843\phi_2 - 0.006$ ซึ่งสังเกตได้ว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกับสถานะการดิ่งแกนเดียวตามภาพที่ 7(ก) ถ้าในระหว่างการขึ้นรูปการกระจายตัวของความเครียดบริเวณใดๆของชิ้นงานเมื่อถูกเปลี่ยนรูปและความเครียดกระจายตัวลงมาคร่อมเส้นขีด WLC นี้จะส่งผลให้บริเวณนั้นมีการเริ่มเสียรูปด้วยการย่นเกิดขึ้น ในทิศทางขวางแนวรีด นั้นมีสัดส่วนความเครียดอยู่ที่ -0.6848 ตามภาพที่ 7(ข) และได้สมการควบคุมเชิงเส้นอยู่ในรูปของความเครียดหลักและความเครียดรอง $\phi_1 = -1.476\phi_2 - 0.0005$ ที่ผลลัพธ์จากสมบัติทางกลของวัสดุมีการแตกต่างกันเนื่องมาจากค่าสมบัติพลาสติก (r-value) ตามตารางที่ 1 นั้นมีค่ามากกว่าจึงส่งผลทำให้เสียรูปได้ยากกว่าและมีพื้นที่การขึ้นรูปได้มากกว่า ทิศทางตามแนวรีดก่อนที่จะเสียหายด้วยการย่น



ภาพที่ 10 เส้นเส้นขีดจำกัดการย่นจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์บนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิกของ Hill'48-R

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

เส้นขีดจำกัดการย่นที่ถูกสร้างจากการทดสอบการโก่งของโมดิฟายโยชิตะสำหรับวัสดุ AA5052-H32 ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์บนพื้นฐานเกณฑ์การครากแอนไอโซทรอปิก Hill'48-R เพื่อใช้สำหรับประเมินความสามารถในการขึ้นรูปได้ก่อนที่จะเสียหายด้วยการย่นที่เกิดขึ้นบริเวณผนังในทิศทางตามแนวรีดและทิศทางขวางแนวรีดของโลหะแผ่นซึ่งความ

แตกต่างของผลการทดลองดังกล่าวนี้เป็นผลมาจากความไม่เท่ากันทุกทิศทางของวัสดุในงานวิจัยสามารถสรุปผลได้ตามนี้

1. การทดสอบการโค้งงอของโมดิฟายโพลิเอสเตอร์สามารถนำมาสร้างเส้นขีดจำกัดการย่นของวัสดุ AA5052-H32 ความหนา 1 มิลลิเมตรได้

2. ผลของการจำลองด้วยเกณฑ์การครากของ Hill'48-R และสมการการทำให้แข็งด้วยความเครียดของสวิตช์โดยใช้ค่าสมบัติทางกลของวัสดุที่ได้จากการทดสอบการดึง สามารถประเมินพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุได้ใกล้เคียงกับการทดลองดังแสดงในงานวิจัยของ (Du *et al.*, 2020; Du *et al.*, 2021)

3. ความแตกต่างกันของเส้นขีดจำกัดการย่นในทิศทางตามแนวรีดและทิศทางขวางแนวรีดมีความต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากค่า r -value ที่มีความต่างกันมากในตัววัสดุส่งผลให้มีความสามารถในการขึ้นรูปโดยตรงได้ดีกว่า

4. ค่าสัดส่วนความเครียดมากจะทำให้วัสดุขึ้นรูปได้ดีก่อนที่จะเกิดการย่น ซึ่งสอดคล้องกับการเปรียบเทียบเส้นโค้งแรง ดังแสดงในงานวิจัยภาพที่ 5 ดังนั้นควรจัดวางแนวทิศทางการรีดของวัสดุให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปเพราะฉะนั้นการนำเส้นขีดจำกัดการย่นไปใช้งานดังแสดงในงานวิจัยของ (Won *et al.*, 2019; Han *et al.*, 2015) ควรเลือกใช้เส้นขีดจำกัดการย่นให้ถูกต้องตรงตามทิศทางแนวการรีดของวัสดุที่นำมาใช้ในการขึ้นรูป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ให้ความสนับสนุนอุปกรณ์การวัดความเครียดด้วยการเคลื่อนที่บนโปรแกรม ARAMIS®-V6.3.0-8 และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ให้ความสนับสนุนการใช้งานโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS 2017 จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- Banabic, D. (2010). **Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation**. Springer Heidelberg Dordrecht London New York. Doi: 10.1007/978-3-540-88113-1
- Bayraktar, E., Isac, N., & Arnold G. (2005). Buckling limit diagrams (BLDs) of interstitial free steels (IFS): Comparison of experimental and finite element analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, 164, 1487-1494.

- Kim, J.B., Yoon, J.W., & Yang, D. Y. (2000). Wrinkling initiation and growth in modified Yoshida buckling test: finite element analysis and experimental comparison. **International journal of mechanical sciences**, 42(9), 1683-1714.
- Liewald, M., & Han, F. (2015, June). **A new approach for determination of the wrinkling limit curve (WLC) in deep drawing**. In Proceeding of Forming Technology Forum (FTF2015), Zurich (Vol. 29, p. 30).
- Won, C., Kim, H. G., Lee, S., Kim, D., Park, S., & Yoon, J. (2019). Wrinkling prediction for GPa-grade steels in sheet metal forming process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 102(9), 3849-3863.
- Du, B., Xie, J., Li, H., Zhao, C., Zhang, X., & Yuan, X. (2020). Determining factors affecting sheet metal plastic wrinkling in response to nonuniform tension using wrinkling limit diagrams. **Thin-Walled Structures**, 147, 106535.
- Hill, R. (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. **Mathematical and Physical Sciences**, 193(1033), 281-297.
- Han, F., & Liewald, M. (2014). A new method to enhance the accuracy of the buckling test using modified Yoshida sample. In **Advanced Materials Research**, 1018, 199-206. Doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.199](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.199)
- Schleich, R., Albiez, C., Papaioanu, A. & Liewald, M. (2009). **Investigation on simulation of buckling of aluminium sheet alloys**. In 7th European LS-DYNA Conference.
- Cheng, H.S., Cao, J., & Wang, H.P. (2006, January). **Experimental and numerical analysis of the buckling and post-buckling phenomenon in the Yoshida test**. In International Manufacturing Science and Engineering Conference, 47624, 249-256.
- Narayanasamy, R., & Narayanan, C.S. (2008). Forming, fracture and wrinkling limit diagram for if steel sheets of different thickness. **Materials & Design**, 29(7), 1467-1475.
- Li, H., Sun, H., Liu, H., & Liu, N. (2021). Loading conditions constrained wrinkling behaviors of thin-walled sheet/tube parts during metal forming. **Journal of Materials Processing Technology**, 296, 117199.



Du, B., Li, H., Xie, J., Song, P., Zhao, C., & Dong, G. (2021). Research on the establishment and influence mechanism of critical wrinkling limit diagram (WLD) of plate and shell forming under mold constraints. **Journal of Manufacturing Processes**, 64, 1047-1058.

ปั๊มน้ำความร้อนด้วยกำลังไอน้ำ THERMAL WATER PUMP WITH STEAM

จิรวัดน์ สิตรานนท์^{1*}, กิตติศักดิ์ วิธินันท์¹, ศรีมา แจ้คำ¹,

กรณัญญ์ นาคภิบาล², เอกภูมิ บุญธรรม³

Jirawat sitranon^{1*}, Kittisak Witinantakit¹, Sririma Jakhom¹

Koranat Narkpiban², Eakpoom Boonthum³

¹ สำนักวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ประเทศไทย 20110

² คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ประเทศไทย 20110

³ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹ School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,
Siracha, Chonburi, Thailand, 20110

² Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,
Siracha, Chonburi, Thailand, 20110

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

*Corresponding author e-mail: jirawat_si@rmott.ac.th

วันที่เข้าระบบ 11 มีนาคม 2565

วันที่แก้ไขบทความ 18 เมษายน 2565

วันที่ตอบรับบทความ 19 เมษายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหลักการทำงานของระบบปั๊มน้ำความร้อนด้วยกำลังไอน้ำ การใช้แหล่งพลังงานความร้อนในแบบต่างๆ การศึกษาระดับความสูง ปริมาณและอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น ปริมาณอากาศภายในระบบที่ส่งผลกระทบต่อ การขับเคลื่อนและการสูบน้ำ จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการใช้กำลังไอน้ำขับเคลื่อนและสูบน้ำเป็นแนวทางในการเพิ่มความสามารถในการปั๊มน้ำ โดยการอาศัยกำลังไอน้ำที่ผลิตได้ขับเคลื่อนน้ำและการระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็น การลดอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นและเพิ่มปริมาณน้ำหล่อเย็น รวมถึงการหล่อเย็นด้วยน้ำโดยตรงจะส่งผลให้ระบบสามารถสูบน้ำได้ ที่ระดับความลึกมากขึ้นได้ เนื่องจากการทำให้อุณหภูมิภายในถังสูบน้ำลดลงอย่างรวดเร็วจนเกิดการควบแน่นเป็นความดันสุญญากาศ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิภายในถังลดลง ความดันสัมบูรณ์ก็จะลดลงตามระบบจึงสูบน้ำที่ระดับความสูงมากขึ้น สัดส่วนปริมาณอากาศภายในระบบสามารถเพิ่มความดันในการขับเคลื่อนน้ำได้ แต่หลังจากการขับเคลื่อนน้ำเสร็จสิ้นแล้วจะต้องขับเคลื่อนอากาศภายในระบบออกพร้อมกับการระบายไอน้ำ เพื่อให้ระบบมีความดันใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศ เนื่องจากอากาศยุบตัวได้ยากจึงเป็นอุปสรรคในการควบแน่น ดังนั้นระบบจะต้องเริ่มเติมปริมาณอากาศใหม่ทุกรอบการทำงาน ในส่วนของประสิทธิภาพปั๊มน้ำจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบและปริมาณน้ำที่สูบได้กับระดับความสูงรวมในการปั๊มน้ำ ดังนั้นการลดอุณหภูมิภายในถังสูบน้ำในจังหวะการหล่อเย็นจะเพิ่มความดันสุญญากาศทำให้ระบบสูบน้ำได้ในระดับความลึกที่สูงขึ้น และแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพปั๊มน้ำ

จากการลดการสูญเสียพลังงานที่ป้อนเข้าระบบสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนรอบในการทำงานให้ได้มากกว่าหนึ่งรอบ และการเพิ่มปริมาณน้ำที่สูบได้ต่อรอบด้วยวิธีการเพิ่มขนาดถังสูบน้ำ เมื่อระบบสามารถสูบน้ำได้ในระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพปั๊มก็จะสูงขึ้นตาม

คำสำคัญ: การหล่อเย็นด้วยน้ำโดยตรง, ประสิทธิภาพปั๊มน้ำ, ปั๊มน้ำพลังงานความร้อน

Abstract

This research aimed to study operating principles of steam-powered thermal water pump, the use of various heat sources, height level study, coolant quantity and temperature, and air quantity in the system affecting driving and pumping water. From the previous studies, it was found that using steam to drive and pump water was a way to increase pumping capacity. This was relied on the steam power produced to drive water and release heat by the coolant. Reducing the coolant temperature, increasing the coolant volume, and direct water cooling allowed the system to pump water at greater depths. This was due to fast dropping temperature in the tank leading to condensation and vacuum pressure. Therefore, as the temperature inside the tank dropped, the absolute pressure also dropped, so the system was able to pump at a higher level. Moreover, the proportion of air inside the system could increase the water-driving pressure. Therefore, after driving water was completed, the air inside the system had to be released along with steam ventilation to get the system pressure to be as close to the atmospheric pressure as possible. Condensation was still problematic because air collapse was difficult, so the system needed filling new air in every operating cycle. In terms of pump efficiency, it depended on the input power into the system and the amount of water pumped and the total height of water pumping. Therefore, reducing the temperature inside the pumping tank during the cooling process was able to increase the vacuum pressure, and this allowed the system to pump at a greater depth. To increase pump efficiency by reducing the loss of energy supplied to the system can be achieved by increasing the number of operating cycles that is more than one cycle. In addition, by increasing the amount of water pumped per cycle and increasing the pump tank size when the system can pump water at a higher level, the pump efficiency is also increased.

Keywords: Direct water cooling, Pump efficiency, Thermal water pumping

1. บทนำ

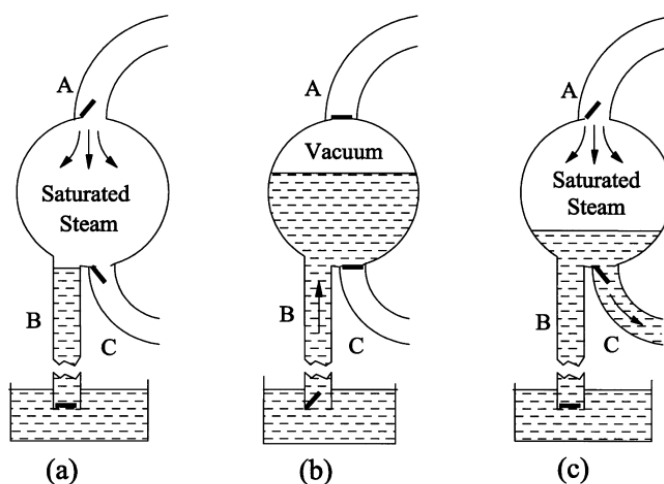
การใช้น้ำในการอุปโภคและบริโภคมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นตามการเจริญเติบโตของเศรษฐกิจ ทั้งภาคการเกษตร และภาคอุตสาหกรรม โดยภาคการเกษตรมีปริมาณการใช้น้ำสูงที่สุดถึงร้อยละ 75 และในภาคอุตสาหกรรมและการบริการมีปริมาณการใช้น้ำน้อยที่สุด (ร้อยละ 3) ส่วนในภาคอุปโภค ของครัวเรือนการใช้น้ำร้อยละ 4 ถ้าดูจากปริมาณการใช้น้ำจะพบว่าในภาคการเกษตรจะใช้พลังงานใน การขับเคลื่อนน้ำ (การสูบน้ำ) สูงขึ้นตามปริมาณการใช้น้ำ ซึ่งปัจจุบันการใช้พลังงานในการสูบน้ำ มี หลากหลายรูปแบบ มีทั้งการใช้ไฟฟ้า การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล การใช้กำลังไอน้ำ ดังนั้นพลังงานที่ใช้ใน การสูบน้ำจึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลการพบกับค่าใช้จ่ายในการอุปโภคและบริโภคน้ำโดยตรง ระบบสูบน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการใช้พลังงานสะอาด โดยระบบสูบน้ำพลังงาน แสงอาทิตย์ได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ไฟฟ้า และความร้อน การผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์สำหรับ การสูบน้ำในปัจจุบันมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง แต่ยังมีข้อจำกัดและมีความสูง เนื่องจาก การเปลี่ยนค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ายังมีประสิทธิภาพต่ำอยู่ ดังนั้นการใช้ความร้อนใน การสูบน้ำโดยการเปลี่ยนค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เป็นความร้อนโดยตรงจะมีประสิทธิภาพสูง (Mohamed *et al.*, 2022) โดยการอาศัยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานความร้อน การ พัฒนาระบบสูบน้ำให้มีปริมาณการสูบล้อมรอบสูงขึ้นโดยการเพิ่มขนาดถังสูบน้ำให้มีปริมาตรใหญ่ขึ้น แต่ระบบสามารถทำงานได้เพียงรอบเดียว (Sitranon *et al.*, 2014) แบบทางจำลองทางคณิตศาสตร์ ของการทำงานแบบต่อเนื่องของระบบสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำ ที่เพิ่มขนาดและจำนวนถังสูบน้ำให้ใหญ่ และมีจำนวนมากขึ้น ทำให้ระบบสามารถสูบน้ำได้หลายรอบต่อวัน และทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้ ปริมาณน้ำที่สูบได้ต่อวันมีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพปั้มน้ำสูงขึ้นตาม แต่เมื่อเพิ่มระดับ ความสูงในการสูบน้ำระบบจะต้องสร้างความดันสุญญากาศให้สามารถเอาชนะระดับความสูงที่ใช้ใน การสูบน้ำ และการสูญเสียของของไหลภายในท่อสูบน้ำด้วย (จิรวัดน์ และคณะ, 2563) โดยการศึกษา อุณหภูมิและปริมาณน้ำหล่อเย็นที่ส่งผลต่อระดับความสูงในการสูบน้ำ ยังประสบปัญหาการทำงานที่ สามารถดำเนินการสูบน้ำได้เพียงหนึ่งรอบการทำงาน (ฉัตรชัย และคณะ, 2564) ดังนั้น จากการศึกษา งานวิจัยที่ผ่านมาของระบบปั้มน้ำความร้อนด้วยกำลังไอน้ำ การศึกษาแนวทางการสูบน้ำด้วยความ ร้อนและวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา การใช้แหล่ง พลังงานความร้อนในรูปแบบต่างๆ การศึกษาปริมาณและอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น การศึกษาปริมาณ อากาศภายในระบบ การศึกษาระดับความสูงในการสูบน้ำ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพปั้มน้ำ รวมทั้งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพปั้มน้ำ

2. จุดเริ่มต้นของเครื่องสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำ

เครื่องจักรไอน้ำ (Steam engine) เป็นเครื่องยนต์ประเภทสันดาปภายนอก โดยจะใช้การต้ม น้ำให้เดือดจนกลายเป็นไอซึ่งคุณสมบัติของไอน้ำจะมีความดันสูง จึงนำเอาความดันของไอน้ำมาใช้ ผลักดันลูกสูบเพื่อให้เกิดแรงเอาไปใช้งาน สำหรับผู้ที่ริเริ่มนำหลักการของไอน้ำมาใช้ในเครื่องจักรเป็นคนแรกคือ โทมัส ซาเวอรี (Thomas Savery) โดยได้จดทะเบียนเครื่องจักรไอน้ำที่เขาได้ประดิษฐ์ขึ้น ในปี ค.ศ. 1698 ได้ใช้ชื่อว่า เครื่องสูบน้ำเซฟเวอรี (Savery pump) ถือว่าเป็นเครื่องยนต์เครื่องแรก ที่นำพลังงานไอน้ำมาใช้เป็นพลังงานกล (Jenness, 1961) ต่อมาในปี ค.ศ. 1712 โทมัส นิวโคเมน (Thomas Newcomen) ได้ออกแบบสร้างเครื่องสูบน้ำโดยได้ใช้ชื่อว่า เครื่องสูบน้ำแบบนิวโคเมน โดยถือเป็นเครื่องจักรไอน้ำแบบแรกที่ใช้จริง ทำงานด้วยความดันของบรรยากาศ ที่เรียกว่า Atmospheric engine ต่างกับเครื่องจักรไอน้ำรุ่นก่อน ซึ่งทำงานด้วยความดันของไอน้ำ และได้ใช้เป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังในอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลายทั่วยุโรป ซึ่งเครื่องจักรไอน้ำแบบบรรยากาศนี้ ถือได้ว่าเป็นเครื่องยนต์ไอน้ำที่เป็นพื้นฐาน ข้อเสียของเครื่องสูบน้ำของนิวโคเมน คือ 1) มีประสิทธิภาพต่ำมาก คือ ต่ำกว่าร้อยละ 1 เนื่องจากเมื่อฉีดน้ำเข้าไปในกระบอกสูบ ทำให้กระบอกสูบเย็น พอใส่ไอน้ำเข้าไปใหม่ ไอน้ำบางส่วนก็กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ทำให้เสียเวลาและไอน้ำเพื่อทำให้กระบอกสูบร้อนใหม่ และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก 2) การทำให้ก้านสูบหมุนวงล้อมีปัญหา วงล้อหมุนกระตุกๆ เนื่องจากลูกสูบให้กำลังเฉพาะตอนดูดลงเท่านั้น จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1763 เจมส์ วัตต์ (James Watt) ได้ทำการซ่อมเครื่องสูบน้ำของนิวโคเมน และปรับปรุงเครื่องจักรไอน้ำของนิวโคเมนให้ทำงานดีขึ้น โดยแก้ข้อเสียทั้งสองประการ พัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และใช้เชื้อเพลิงน้อยลง ตลอดระยะเวลา 128 ปี คือช่วงปี ค.ศ. 1763-1891 ระบบเครื่องจักรไอน้ำมีบทบาทสำคัญมากในภาค การเกษตรและอุตสาหกรรม เพราะใช้เชื้อเพลิงจากฟืนไม้หรือถ่านหิน จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1891 Jenness (1961) ได้เสนอหลักการสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยปั้มน้ำแบบซาเวรี ซึ่ง โทมัส ซาเวรี ได้จดสิทธิบัตรในปี ค.ศ. 1698 ที่ประเทศอังกฤษ หลักการทำงานของปั้มน้ำแบบซาเวรี ดังแสดงใน ภาพที่ 1

จากภาพที่ 1 เปิดวาล์ว A ให้ไอน้ำที่ผลิตจากพลังงานความร้อนไหลเข้ามาในถังและไล่อากาศ ออกทางวาล์ว C เมื่อไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงเย็นตัวลง จะเกิดการควบแน่นทำให้ความดันภายในถังต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ปิดวาล์ว A และวาล์ว C เปิดวาล์ว B ระบบจะสูบน้ำที่วาล์ว B เมื่อสูบน้ำเสร็จสิ้นจนกระทั่งภายในถังความดันภายในถังเท่ากับบรรยากาศ ปิดวาล์ว B แล้วเปิดวาล์ว A เพื่อให้ไอน้ำเข้าไปในถัง และดันน้ำออกที่วาล์ว C และทำงานในลักษณะเดียวกันในรอบต่อ ๆ ไป และได้ปรับปรุงการทำงานให้เป็นแบบอัตโนมัติ พบว่า ระบบจะต้องผลิตไอน้ำที่อุณหภูมิมากกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยให้ใช้ตัวรวมแสง Collector พื้นที่ 1 ตารางเมตร ดังภาพที่ 2 เป็นตัวรับรังสีอาทิตย์ แล้วส่งไปยังหม้อต้มน้ำ B เมื่อน้ำได้รับความร้อนก็จะระเหยจนกลายเป็นไอ ผ่านท่อไอน้ำ C ที่

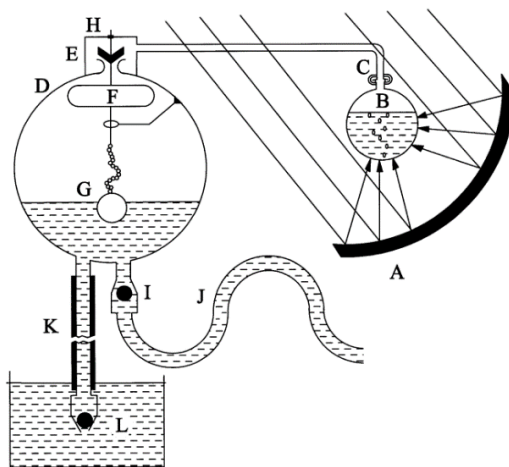
ยึดกับฝาหม้อต้มน้ำเพื่อความปลอดภัย ผ่านวาล์วกันกลับ E และเข้าสู่ถังขับเคลื่อน D วาล์วกันกลับ E จะปิดเมื่อระดับน้ำในถังขับเคลื่อน D ลดระดับลงจน ลูกกลอย G ต่ำลงจนถึงวาล์วกันกลับ E ลงมาปิด เมื่อน้ำในถังขับเคลื่อนถูกขับเคลื่อนออกที่วาล์ว I ผ่านท่อ J จนหมดจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำภายในถังขับเคลื่อน D ทำให้เกิดสุญญากาศและทำให้วาล์ว I ปิด ส่วนวาล์ว L ก็จะเปิดเนื่องจากการเกิดสุญญากาศภายในถังขับเคลื่อน D ทำให้ไอน้ำเข้าสู่ถังขับเคลื่อน D จนลูกกลอย F ดันวาล์ว E ให้เปิด เพื่อให้ไอน้ำไหลเข้าสู่ถังขับเคลื่อน D วาล์วกันกลับ L จะปิด และขับเคลื่อนน้ำในถัง D ออกโดยผ่านวาล์ว I เป็น 1 รอบการทำงาน ในงานวิจัยนี้ไม่ได้บอกรายละเอียดของความสูงในการสูบน้ำ



ภาพที่ 1 ปั๊มสูบน้ำแบบชาเวรี

(Jenness, 1961)

หลักการทำงานของเครื่องขับเคลื่อนน้ำโดยใช้พลังงานไอน้ำ ยศสวิน กายนันท์ (2543) ได้สมมูลสมการพลังงาน (Energy equation) เป็นสมการที่ได้จากการใช้หลักการทรงพลังงาน (Principle of conservation of energy) กับของไหลเคลื่อนที่ พลังงานที่เกิดจากของไหลเคลื่อนที่ประกอบไปด้วยพลังงานจากความดัน ความเร็ว และตำแหน่ง นอกจากนี้แล้วยังอาจมีพลังงานที่เพิ่มให้กับของไหลหรือพลังงานที่สูญเสียเกิดขึ้นอีกด้วย ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการเบอร์นูลลี กรณีของไหลอัดตัวไม่ได้และมีการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการไหลของของไหล ดังสมการที่ 1



ภาพที่ 2 ปัมป์สูบน้ำแบบซาเวรีทำงานอัตโนมัติ

(Jenness, 1961)

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 - h_L = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (1)$$

เมื่อ	P_1	=	ความดันไอของถังเก็บน้ำร้อน (กิโลปาสกาล)
	v_1	=	ความเร็วที่ทางเข้าท่อส่งน้ำไหลกลับ (เมตรต่อวินาที)
	z_1	=	ความสูงที่จุด 1 (เมตร)
	h_L	=	การสูญเสียความดันของของไหลที่ออกจากถังพลังงานไอน้ำจนถึงถังเก็บน้ำด้านบน (เมตร)
	P_2	=	ความดันที่ปลายท่อส่งน้ำไหลกลับ (กิโลปาสกาล)
	v_2	=	ความเร็วที่ปลายท่อส่งน้ำไหลกลับ (เมตรต่อวินาที)
	z_2	=	ความสูงระหว่างท่อทางเข้าถังเก็บน้ำด้านบนกับระดับน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (เมตร)
	ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	g	=	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)
	$\frac{P_1}{\rho g}$	=	เรียกว่า Pressure head, แทนพลังงานความดันต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล

อันเนื่องมาจากความดันในของไหล

$\frac{v_1^2}{2g}$ เรียกว่า Velocity head, แทนพลังงานจลน์ต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล อันเนื่อง

มาจากความเร็วของของไหล

z_1 เรียกว่า Elevation head, แทนพลังงานศักย์ต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล อันเนื่องมาจากระดับของของไหล

การทำงานของเครื่องขับเคลื่อนน้ำโดยใช้พลังงานไอน้ำ เป็นระบบที่พัฒนามาจากระบบการหมุนเวียนน้ำโดยใช้พลังงานความร้อน โดยการออกแบบจากหลักการพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของวัฏจักร ทำให้เกิดกระบวนการส่งความร้อนและปั๊มด้วย Pressurizing water และ Pressurizing vapor และมีการไหลเวียนความร้อนจากด้านบนสู่ด้านล่างโดยธรรมชาติ (Self-pumping) มีแหล่งผลิตความร้อนด้วยฮีตเตอร์เป็นระบบที่มีขนาดเล็ก ข้อดีของระบบสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องควบคุม (Self-controlling) ไม่มีการใช้ปั๊มด้วยไฟฟ้าและไม่มีการใช้ไฟฟ้าควบคุม วาล์วต่าง ๆ ในภาพที่ 3 แสดงหลักการทำงานพื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic) และ กลศาสตร์ของไหล (Fluid mechanic) จากภาพที่ 3 (ก) แสดงการสมดุลระหว่างความดัน ที่ปลายท่อทั้งสองข้างซึ่งมีระดับของไหลทั้งสองข้างอยู่ระดับเดียวกัน ไม่มีงานและความร้อนเข้าสู่ระบบ จะได้ดังสมการที่ 2

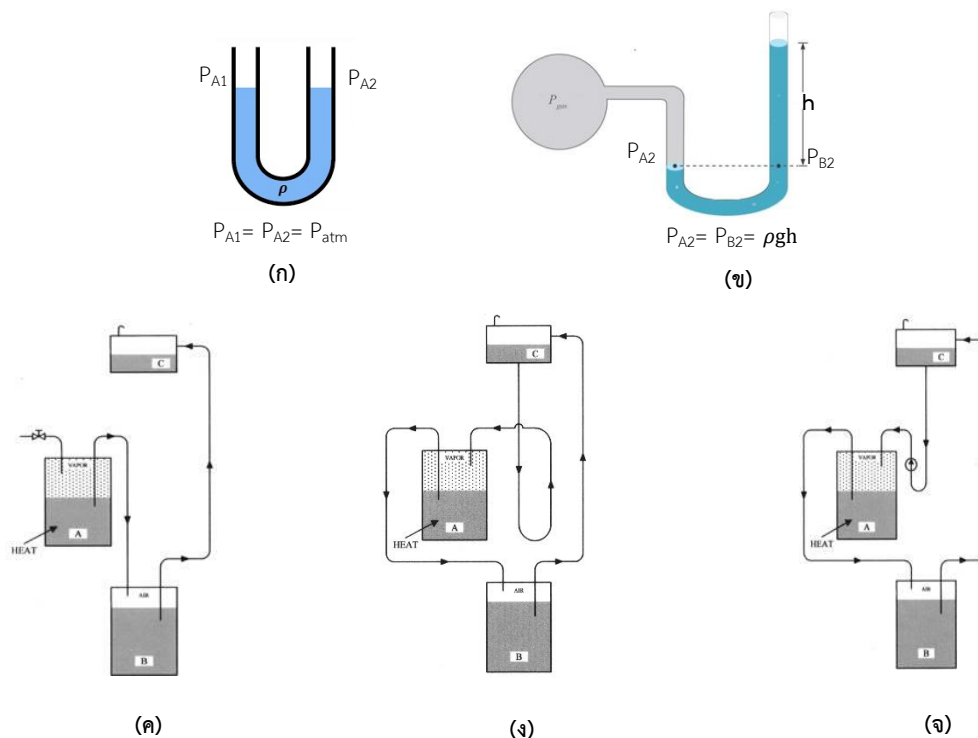
$$P_{A1} = P_{B2} = P_{atm} \quad (2)$$

เมื่อ P_{A1} = ความดันที่กระทำกับของเหลวท่อข้างซ้าย (กิโลปาสกาล)
 P_{B1} = ความดันที่กระทำกับของเหลวท่อข้างขวา (กิโลปาสกาล)
 P_{atm} = ความดันบรรยากาศ (กิโลปาสกาล)

ในภาพที่ 3 (ข) แสดงการให้ความร้อนเข้าสู่ระบบที่ภาชนะ A ของเหลวเมื่อได้รับความร้อนกลายเป็นไอน้ำมีความดันเท่ากับ P_{A2} แล้วไหลออกไปขับเคลื่อนของเหลวในท่อตัวอยู่ที่ข้างซ้าย มีระดับของเหลวลดลงและมีความดันที่ผิวของเหลวเท่ากับ P_{A2} ส่วนข้างขวาของเหลวมีระดับสูงขึ้นเท่ากับ h สามารถอธิบายได้ว่าความดัน P_{A2} และ P_{B2} อยู่ในระดับเดียวกันจะมีความดันที่เท่ากัน และ P_{B2} เป็นความดันที่เกิดจากน้ำหนักของของไหลที่มีความสูงเท่ากับ h สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3 ดังนี้

$$P_{A2} = P_{B2} = \rho gh \quad (3)$$

เมื่อ P_{A2} = ความดันไออิ่มตัวที่ภาชนะ A (กิโลปาสกาล)
 P_{B2} = ความดันที่เกิดจากความสูงของของไหล (กิโลปาสกาล)



ภาพที่ 3 หลักการพื้นฐานของเครื่องปั๊มน้ำโดยใช้พลังงานไอน้ำ
(ยศสวิน กายนันท์, (2543)

- ρ = ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
 g = ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)
 h = ความสูงของของไหล (เมตร)

จากความสัมพันธ์ในสมการ (3) ถ้าเราทราบค่า h สามารถคำนวณหาค่า P_{B2} ที่ใช้ในระบบการปั๊มน้ำของเหลวได้ ระบบมีการทำงานในลักษณะนี้ถือว่าการส่งความร้อนและปั๊มด้วย Pressurizing vapor (การปั๊มน้ำของเหลวด้วยไอ) ในภาพที่ 3 (ค) มีการทำงานคล้ายกับภาพที่ 3 (ข) มีการปรับปรุงให้ท่อส่งน้ำร้อนที่อยู่ในภาชนะ A ให้จุ่มอยู่ในของเหลวซึ่งภายในภาชนะ A บรรจุอากาศและของเหลว โดยมีท่อน้ำเข้าเปิด-ปิดด้วยวาล์วแล้วนำภาชนะ B มาต่อเข้ากับท่อทางออกของภาชนะ A โดยมีท่อทางเข้าภาชนะ B อยู่ในส่วนของอากาศและภายในบรรจุอากาศและของเหลว โดยมีท่อทางออกให้ของเหลวไหลขึ้นสู่ด้านบนเข้าภาชนะ C มีการทำงานของระบบดังนี้ เมื่อให้ความร้อนกับภาชนะ A อากาศ และของเหลวที่อยู่ภายในมีอุณหภูมิและความดันเพิ่มขึ้น อากาศส่วนหนึ่งไม่สามารถไหลออกได้เพราะวาล์วอยู่ในลักษณะปิด อากาศส่วนที่เหลือมีการขยายตัวขับเคลื่อนของเหลวที่

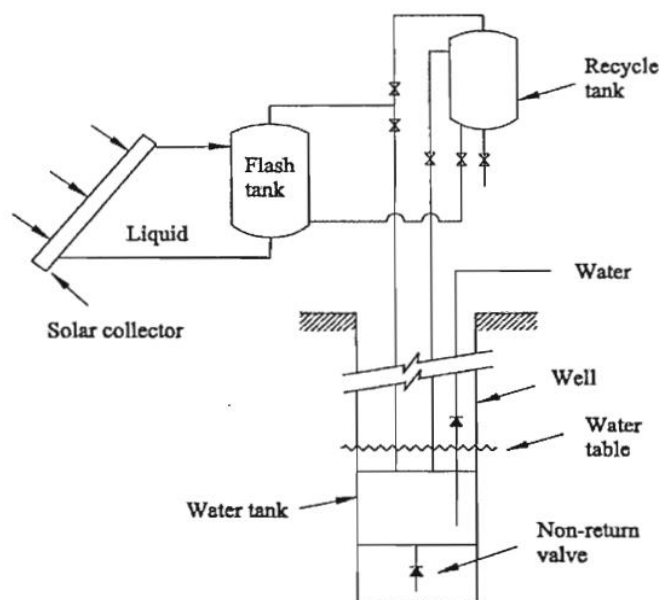
อยู่ภายในภาชนะ A ให้ไหลออกมาท่อส่งน้ำร้อนเข้าสู่ภาชนะ B แล้วมาถ่ายเทความร้อนให้กับของเหลวในภาชนะ B จากการพิจารณาสมดุลมวลที่ภาชนะ B พบว่ามวลที่ไหลเข้าภาชนะ B เท่ากับมวลที่ไหลออกจากภาชนะ B ของเหลวที่ไหลออกส่วนหนึ่งไหลขึ้นสู่ด้านบนเข้าภาชนะ C ได้ การทำงานที่หมุนเวียนในลักษณะนี้ถือว่าการส่งความร้อนและปั๊มด้วย Pressurizing water (การขับเคลื่อนของเหลวด้วยของเหลว) เมื่อภาชนะ A ได้รับความร้อนจนกระทั่งปลายท่อส่งน้ำร้อนที่อยู่ภายในมีระดับสูงกว่าของเหลว ไส้ส่วนหนึ่งสามารถไหลออกจากภาชนะ A เข้าสู่ภาชนะ B ทำให้มีความดันเพิ่มขึ้น ไอที่อยู่ภายในภาชนะ B ขับดันของเหลวให้ไหลออกทางท่อส่งน้ำ การทำงานลักษณะนี้เป็น การส่งความร้อนและปั๊มด้วย Pressure vapor จนกระทั่งปลายท่อส่งน้ำที่อยู่ในภาชนะ B มีระดับสูงกว่าของเหลว ไส้จากภาชนะ A และ B ไหลออกทางท่อส่งน้ำร้อนแล้วมาระบายไอที่ภาชนะ C ความดันของภาชนะ A และ B จึงมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ทำการเปิดวาล์วน้ำป้อนน้ำน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าไหลเข้าภาชนะ A และ B จนกระทั่งมีระดับน้ำภาชนะทั้งสองมีระดับเท่ากับก่อนการทดลองระบบจะมีการทำงานครบ 1 รอบ พร้อมทั้งจะทำงานในรอบต่อไป สามารถอธิบายได้ว่าระบบนี้มีการไหลเวียนของความร้อนจากด้านบนสู่ด้านล่าง (Downward heat transport system) ในภาพที่ 3 (ง) แสดงระบบการหมุนเวียนน้ำโดยใช้พลังงานความร้อนมีการส่งความร้อนและปั๊มด้วย Pressurizing water ระบบนี้มีการทำงานคล้ายกับระบบในภาพที่ 3 (ค) ซึ่งมีการพัฒนาและปรับปรุงเพิ่มจังหวะการป้อนน้ำจากถังน้ำป้อน C ที่อยู่ด้านบนน้ำป้อนมาเข้าภาชนะ A มีการทำงานในช่วงเริ่มต้นเหมือนกับระบบในภาพที่ 3 (ค) มีความแตกต่างของไอที่อยู่ภายใน ภาชนะ A สามารถที่ไหลย้อนกลับทางท่อน้ำป้อนแต่ไหลไม่สะดวกเพราะมีความดันด้านเกิดจากความสูงของน้ำในถังน้ำป้อนส่วนการทำงานเมื่อสิ้นสุดการระบายไอความดันที่ภาชนะ A และ B มีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ น้ำที่อยู่ในถังน้ำป้อนมีความดันสูงกว่าสามารถไหลเข้าสู่ภาชนะ A และ B ระบบสามารถทำงานในรอบต่อไปได้ จากการทดลองพบว่าระบบมีข้อเสียเกิดจากการสูญเสียความดันไอสวนหนึ่งไหลต้านกับความดันของน้ำป้อนในจังหวะการส่งความร้อนและปั๊ม ส่งผลให้ระบบทำงานได้ช้า ในภาพที่ 3 (จ) การพัฒนาและปรับปรุงระบบในภาพที่ 3 (ง) โดยการติดตั้งวาล์วกันกลับแบบลิ้นยกที่ท่อน้ำป้อนระหว่างแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงกับถังน้ำป้อน จากการทดลองพบว่าใช้ระยะเวลาการทำงานต่อรอบน้อยลง และมีการไหลเวียนของความร้อนมากขึ้นส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีการสูญเสียความดันไอในการส่งความร้อนและปั๊มในระหว่างที่ระบบทำงาน

จากการเริ่มต้นใช้กำลังไอน้ำมาประยุกต์ใช้กับการสูบน้ำหรือปั๊มน้ำ โดยอาศัยหลักการของความดันที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ที่เกิดจากแหล่งความร้อนที่ป้อนเข้าระบบ และการระบายความร้อน ทำให้ระบบสูบน้ำเป็นจังหวะขับเคลื่อนในช่วงที่อุณหภูมิสูง และสูบน้ำในช่วงที่อุณหภูมิต่ำ

3. การปั้มน้ำด้วยความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

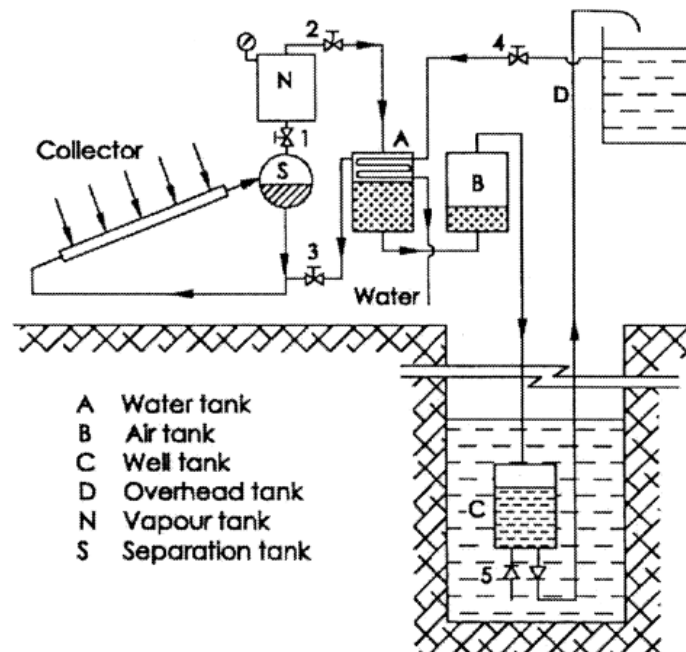
3.1 การหมุนเวียนสารทำงานแบบธรรมชาติ

Rao & Rao (1976) ใช้ปั้มน้ำพลังงานรังสีอาทิตย์สูบน้ำเพื่อการชลประทาน ซึ่งได้รับการพัฒนาทดสอบ ในบทความนี้ใช้หลักการเทอร์โมไดนามิกส์ และออกแบบปั้มได้อธิบายไว้ดังภาพที่ 4 ปั้มนี้ไม่มีอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนที่ยกเว้นวาล์วกันกลับ (Check valve) ไม่มีแหล่งกำลังมาเสริม หรือทักษะทางเทคนิคที่ต้องการในการทำงานของปั้ม ทำให้การออกแบบปั้มทั้งสองแบบเหมาะสมที่สุดสำหรับการยกน้ำในการชลประทานในที่ชนบท โดยปั้มนี้จะไม่มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบวัน แต่ในโอกาสที่ใช้สารทำงานที่ราคาแพง การศึกษาความเป็นไปได้ของปั้มชี้ให้เห็นว่าปั้มทั้งสองแบบได้จากการพัฒนาในทางเศรษฐศาสตร์ และเป็นประโยชน์กับชาวนาในประเทศอินเดียปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้มีความดันขับเคลื่อนให้น้ำเคลื่อนที่ในระดับที่สูงขึ้น การวิเคราะห์วัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์การทำงานของปั้มใช้เพนเทนเป็นสารทำงานทำให้เกิดความดันของน้ำในถังปิด ทำให้เกิดการสูบน้ำได้ในระดับที่สูงขึ้น เมื่อเกิดการควบแน่นทำให้เกิดสุญญากาศ จึงทำให้สูบน้ำเข้ามาในถังได้และเกิดการควบแน่นทำได้ 2 วิธี คือการใช้อากาศ และน้ำหล่อเย็นปั้ม เพื่อทำให้ควบแน่นของไอนอกจากนี้ก็ได้จากการปั้มจะส่งผลให้เกิดการควบแน่นได้เหมือนกัน



ภาพที่ 4 ระบบสูบน้ำพลังงานรังสีอาทิตย์แบบหล่อเย็นด้วยอากาศ

(Rao & Rao, 1976)



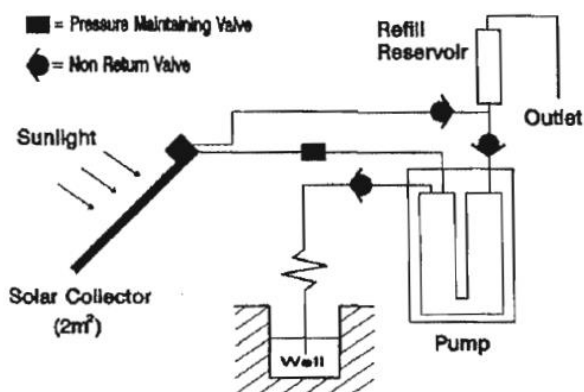
ภาพที่ 5 เครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้สารเอทิลเออร์เป็นสารทำงาน
(Wong & Sumathy, 2001)

Wong & Sumathy (2001) ได้ศึกษาการปั้มน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ หลักการทำงานของระบบนี้ทำงานโดยสารทำงาน (สารเอทิลเออร์) รับความร้อนจากตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบทำให้ระเหยกลายเป็นไอ เข้าสู่ถังเก็บไอ N เมื่อความดันไอของสารทำงานในถังเก็บไอน้ำมากขึ้นก็จะดันน้ำในถังเก็บน้ำ A ให้ไหลไปยังถังเก็บอากาศ B เมื่อน้ำเข้าไปในถังเก็บอากาศมากขึ้นทำให้ความดันของอากาศมีค่าสูงขึ้น อากาศก็จะดันน้ำในบ่อขึ้นสู่ถังเก็บน้ำด้านบน D หลังจากนั้นก็จะทำการหล่อเย็นสารทำงานเพื่อจะทำงานในรอบต่อไป จากการทดลองพบว่า ระดับความสูง (จากตำแหน่ง C ถึง D) เครื่องสามารถส่งน้ำขึ้นไปได้ 10 เมตร แสดงดังภาพที่ 5

3.2 การหมุนเวียนสารทำงานกำลังไอน้ำ

Picken *et al.* (1997) ได้ทำการทดลองตัวเก็บสะสมพลังงานความร้อนรังสีอาทิตย์ ที่ทำให้เกิดอุณหภูมิมากถึง 200 องศาเซลเซียส ความพอเพียงในการสร้างความดันไอน้ำที่ 15 บาร์ (ความดันสัมบูรณ์) หรือการส่งน้ำไปยังถังด้านบนที่ประมาณ 150 เมตร ซึ่งเครื่องส่งน้ำจะเป็นตัวขับน้ำโดยตรง โดยใช้น้ำในการขับเคลื่อนราคาต้นทุนไม่แพงด้วยเหตุนี้ปริมาณที่ส่งน้ำจึงมีข้อจำกัดของปริมาณไอน้ำที่เกิดขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วจะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง เนื่องจากสูญเสียความร้อนระหว่างกระบวนการระบายความร้อนระบบนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยมีการบรรจุท่อระบายความร้อนในท่อระบายน้ำออก ซึ่งเป็นอุปกรณ์อย่างง่าย ความร้อนที่ใส่ให้แก่ไอน้ำนั้นเกิดขึ้นโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไอน้ำดังภาพที่ 6 พื้นฐานหลักในจุดประสงค์ของระบบที่แสดงให้เห็นถึงแบบผังของระบบที่มี 2 หลักการใน

จุดประสงค์ของระบบที่แสดงให้เห็นถึงแบบผังของระบบที่มี 2 หลักการพื้นฐานของระบบเครื่องส่งน้ำ และตัวสะสมพลังงานความร้อน ซึ่งตัวเก็บสะสมและสัมผัสประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 24 ราคาตัวสะสมพลังงานความร้อน 350 ปอนด์ต่อตารางเมตร ได้ถูกนำมาใช้ เพราะลักษณะที่เป็นชุดซึ่งถูกใช้ใน ห้องปฏิบัติการทดลองอุปกรณ์นี้มีลักษณะเปราะบาง เพราะทำมาจากวัสดุที่ไม่เหมาะสม จึงต้อง ออกแบบใหม่ให้แข็งแรง ซึ่งทางเลือกที่เป็นไปได้ที่ต้องการใช้เครื่องส่งน้ำจากด้านบน ซึ่งก็คือ เครื่องส่งน้ำทางเดียว น้ำที่เคลื่อนไปด้วยไอน้ำที่กระบอกสูบทางด้านซ้าย (กระบอกสูบ A ในภาพที่ 6) ปริมาตรของไอน้ำจะลดลงเมื่อระดับน้ำถูกส่งผ่านมายังจุดต่ำสุด ที่ “U” เครื่องส่งน้ำนี้มีค่าใช้จ่ายที่ ราคาไม่แพงมากเพราะใช้ไอน้ำ และเครื่องส่งน้ำนี้ทำงานที่วัฏจักร Papin



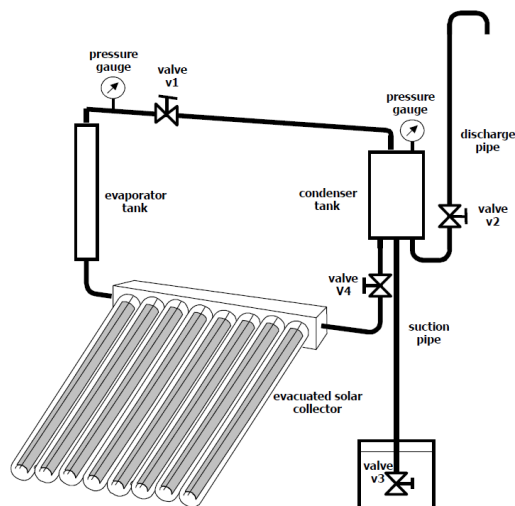
ภาพที่ 6 แผนภาพระบบของเครื่องส่งน้ำ

(Picken *et al.*, 1997)

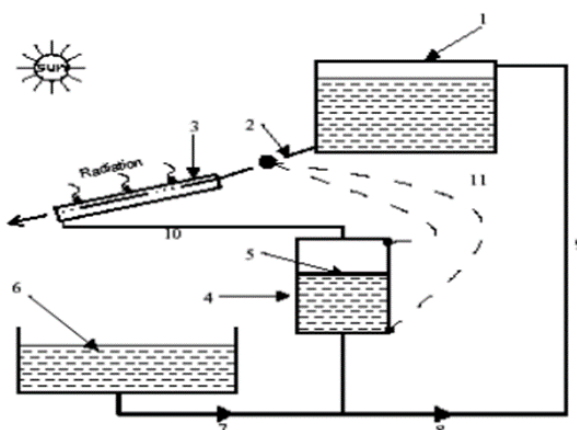
Liengindathaworn *et al.* (2002) ได้เปลี่ยนอุปกรณ์ให้ความร้อน จากเดิมใช้ฮีตเตอร์เป็น พลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศ ดังภาพที่ 7 ผลการทดลองพบว่า อัตราการ รับพลังงานความร้อนของถังระเหยไม่คงที่ ต้องขึ้นกับปริมาณรังสีอาทิตย์ และต้องใช้เวลานานขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการใช้ฮีตเตอร์ เพราะอัตราการจ่ายพลังงานของฮีตเตอร์นั้นคงที่ ทำให้อัตราการ รับพลังงานของถังระเหยคงที่

Das & Gopal (2004) ได้ศึกษาการปั้มน้ำด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์โดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็น สารทำงาน ในประเทศอินเดีย ในปี ค.ศ. 2003 โดยหลักการทำงานของระบบนี้ใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์ พื้นที่ 1 ตารางเมตร รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์แล้วถ่ายเทให้กับสารทำงานซึ่งในระบบนี้ใช้ ไฮโดรเจนเป็นสารทำงาน ไฮโดรเจนก็จะขยายตัวดันลูกสูบหมายเลข 5 ให้เคลื่อนที่ลงด้านล่างเกิดแรง ขับดันน้ำจากถังเก็บหมายเลข 4 ขึ้นสู่ถังเก็บหมายเลข 1 หลังจากลูกสูบเคลื่อนที่ลงไปแล้ว วาล์ว ควบคุมหมายเลข 2 จะปล่อยน้ำหล่อเย็นไหลผ่านตัวรับรังสีระบายความร้อนให้กับก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซ

ไฮโดรเจนก็จะหลุดตัวตั้งลูกสูบหมายเลข 5 ขึ้นด้านบนดูดน้ำดูดน้ำผ่านวาล์วหมายเลข 7 ไปเก็บไว้ในถังเก็บหมายเลข 4 เพื่อที่จะทำงานต่อไป ซึ่งวงจรการทำงานของระบบแสดงดังภาพที่ 8 จากการวิจัยพบว่าระบบปั้มน้ำพลังงานรังสีอาทิตย์ใช้ไฮโดรเจนเป็นสารทำงานสามารถปั้มน้ำได้สูงสุด 3000 ลิตรต่อวัน ที่ระดับความสูง 15 เมตร ประสิทธิภาพของระบบปั้มน้ำพลังงานรังสีอาทิตย์มีค่าร้อยละ 1.5



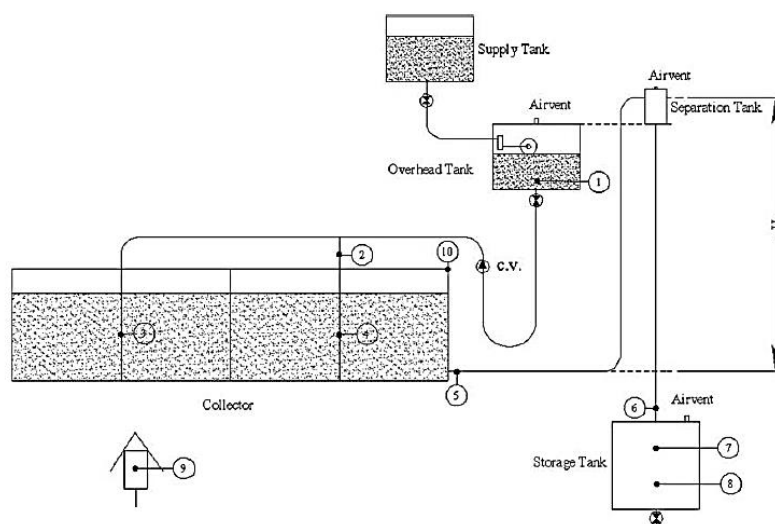
ภาพที่ 7 เครื่องสูบน้ำพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์
(Liengjindathaworn *et al.*, 2002)



ภาพที่ 8 วงจรการทำงานของปั้มน้ำพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารทำงาน
ที่มา: Das and Gopal (2004)

Sutthivirode *et al.* (2009) ได้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของระบบทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียนด้วยกำลังไอน้ำ ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของระบบ ดังแสดงใน

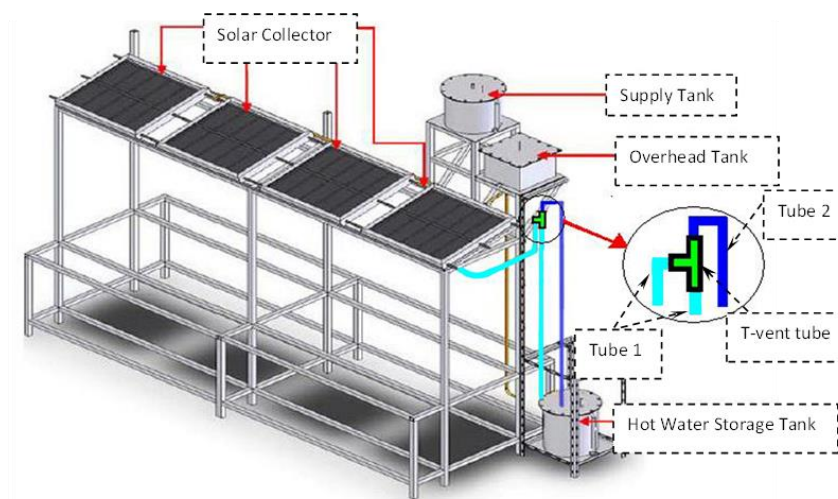
ภาพที่ 9 เมื่อแผงรับรังสี Solar collector ได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์น้ำและอากาศที่อยู่ภายในจะมีอุณหภูมิและความดันเพิ่มขึ้น และขับเคลื่อนน้ำภายในแผงรับรังสีให้ไหลออกไปเก็บในถังเก็บน้ำร้อน จนระดับน้ำในแผงต่ำกว่าท่อทางออกของแผงทำให้ความดันภายในแผงเท่ากับความดันบรรยากาศ และน้ำที่อยู่ในถังพักน้ำด้านบนก็ไหลผ่านวาล์วกันกลับ เนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก จะเกิดการควบแน่นของไอน้ำร้อน และอากาศยุบตัวเกิดสุญญากาศดูดน้ำที่เหลืออยู่ในถังเก็บน้ำด้านบนให้ไหลเข้ามาในแผงรับรังสีและหมุนเวียนน้ำในวัฏจักรต่อไป มีค่าปริมาณความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อนมีค่าเท่ากับ 3269.3 กิโลจูล อุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนมีค่าเท่ากับ 59 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพเชิงความร้อนร้อยละ 17.4 และสามารถผลิตน้ำร้อนได้ 58.1 ลิตรต่อวัน



ภาพที่ 9 วงจรการทำงานของระบบทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานรังสีอาทิตย์หมุนเวียน
ด้วยกำลังไอน้ำโดยนำความร้อนมาใช้งานโดยตรง
(Sutthivirode *et al.*, 2009)

Sitranon *et al.*, (2014) ได้ปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยกำลังไอน้ำ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังภาพที่ 10 โดยลดการสูญเสียความร้อนของไอน้ำที่ระบายสู่บรรยากาศ โดยการต่อท่อสามทางเพื่อนำไอน้ำมาระบายในถังเก็บน้ำร้อน และเปิดสู่บรรยากาศภายในถังเก็บน้ำร้อน การปรับระดับความสูงในการส่งน้ำทำให้ทราบถึงอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้ ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำลดลง อุณหภูมิของน้ำร้อนก็จะลดลงตามลำดับ และจะทำให้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าระดับความสูงในการส่งน้ำมากขึ้น อุณหภูมิของน้ำร้อนจะสูงขึ้นและปริมาณน้ำลดลง ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้สูงสุด 89.9 ลิตรต่อวัน ที่ระดับความสูง 0.5 เมตร และอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผลิตได้ 64.6 องศาเซลเซียส ที่ระดับความสูง 1 เมตร ประสิทธิภาพปั๊ม

ร้อยละ 0.0012 ประสิทธิภาพทางความร้อนร้อยละ 41.2 เมื่อเทียบกับระบบก่อนหน้านี้นี้ของ Sutthivirode ประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 17.4 ในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10



ภาพที่ 10 เครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยกำลังไอน้ำ

(Sitranon *et al.*, 2014)

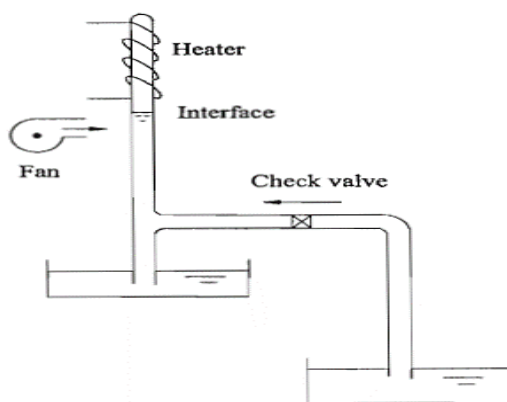
จากงานวิจัยที่ใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ในการปั๊มน้ำและผลิตน้ำร้อนพบว่าประเภทของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบรวมแสง สามารถผลิตอุณหภูมิได้สูง แต่ไม่สามารถหมุนเวียนหรือปั๊มน้ำได้ด้วยตัวเองต้องอาศัยปั๊มน้ำที่ใช้พลังงานจากภายนอก ตัวรับรังสีแบบแผ่นราบผลิตอุณหภูมิได้ ไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่เหมาะในการผลิตไอน้ำ แต่สามารถหมุนเวียนสารทำงานได้ทั้งแบบธรรมชาติ และแบบบังคับ ซึ่งจะเหมาะสมความต้องการในการผลิตน้ำร้อนเป็นหลัก และแบบท่อสุญญากาศ (Liengindathaworn *et al.*, 2002) ที่สามารถผลิตอุณหภูมิได้สูงจนเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำได้ จึงเหมาะสมที่จะเลือกมาเป็นแหล่งพลังงานความร้อน ในส่วนของการลดการสูญเสียไอน้ำในจังหวะที่ระบบเปิดสู่บรรยากาศ Sitranon *et al.* (2014) ได้พัฒนาวาล์วสามทางที่ลดการสูญเสียไอน้ำ โดยให้ไอน้ำที่เปิดสู่บรรยากาศผ่านวาล์วสามทางไปยังถังเก็บน้ำร้อนแทน

4. การปั๊มน้ำโดยตรงจากกำลังไอน้ำ

4.1 การสูบน้ำแบบขับเคลื่อนน้ำ

Seldon *et al.* (1976) ได้ศึกษาระบบปั๊มน้ำไฮดรอลิก ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนเพื่อขับเคลื่อนน้ำ โดยควบคุมการไหลของของเหลวด้วยวาล์วกันกลับ อาศัยกลไกการสั่นของไอน้ำ

ของเหลว ที่เกิดขึ้นจากความร้อนเป็นการทำงานของระบบปั้มน้ำ จึงนำมาใช้กับปั้มน้ำในพื้นที่กันดาร อุปกรณ์ที่ใช้แสดงในภาพที่ 11 ประกอบด้วย หลอดแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ยาว 12.5 เซนติเมตร ปลายด้านบนปิด เต็มไปด้วยน้ำและทำความร้อนด้วยฮีตเตอร์ จนกลายเป็นไอน้ำเกิดความดันขึ้น ผ่านพดลและลงอ่างเก็บน้ำด้านบน และไม่สามารถไหลไปยังอ่างเก็บน้ำด้านล่างได้ เนื่องจากติวลวกลับกัน เมื่อ น้ำไหลออกจนหมดทำให้ความดันลดลง น้ำอีกด้านของวาล์วกลับกันก็ไหลเข้ามาพบกับไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูง จึงเกิดการควบแน่น และเกิดความดันสุญญากาศดูดน้ำจากอ่างเก็บน้ำด้านล่างขึ้นมาไว้ที่อ่างเก็บน้ำด้านบนจนความดันเท่ากัน น้ำในหลอดแก้วปลายปิดด้านบนก็เริ่มขยายตัวและสร้างความดันต่อไป จากการทดลองระดับความสูงในการส่งน้ำแตกต่างกันออกไป และเพิ่มขึ้นตามการให้พลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 43 และ ร้อยละ 11 ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ 2.5 และ 36 เซนติเมตร ตามลำดับ การวัดปริมาตรของเหลวในแนวตั้งประมาณ 6 มิลลิเมตรต่อนาที่ การขับเคลื่อนน้ำวัฏจักรจากด้านบนที่ให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ และควบแน่นดูดน้ำจากอ่างน้ำด้านล่างขึ้นมาไว้ที่อ่างน้ำด้านบน ดังนั้นการเคลื่อนที่ของเหลว ทำหน้าที่เป็นลูกสูบวาล์ว และคล้ายคลึงกับลูกสูบเครื่องยนต์ไอน้ำ

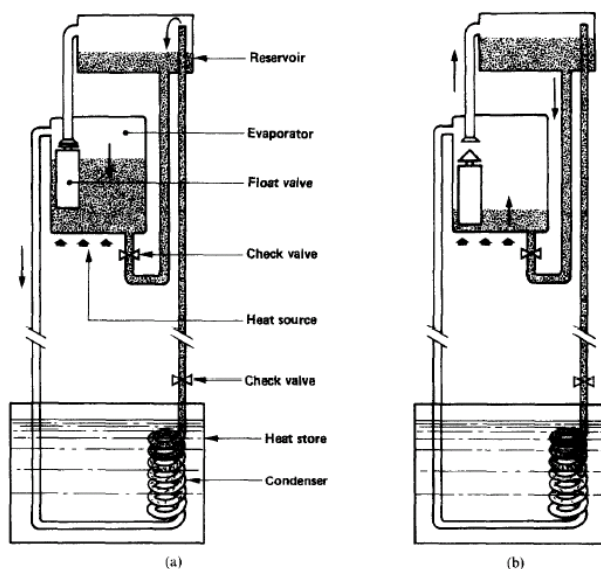


ภาพที่ 11 โครงสร้างของระบบปั้มน้ำของ Sheldon
(Seldon et al., 1976)

Beni & Frisen (1985) ได้นำหลักการทำงานของ Self-pumping มาใช้ประโยชน์ในการหมุนเวียนสารทำงาน ซึ่งใช้ถึงความดันที่ติดตั้งอยู่ภายในถังเก็บน้ำร้อน ดังภาพที่ 12 มีหลักการทำงานของใช้ความดันของสารทำความเย็น ที่ผลิตได้มาทำให้ของไหลเกิดการหมุนเวียนภายในระบบ ปริมาณความร้อนที่ใช้ระเหยของเหลวให้กลายเป็นไอน้ำภายในเครื่องระเหย (Evaporator) จะได้รับความร้อนจากฮีตเตอร์ การติดตั้งเครื่องระเหยอยู่ด้านบน โดยไอที่ผลิตได้หมุนเวียนมากลั่นตัวที่เครื่องกลั่นด้านล่างของเหลวที่กลั่นตัวจะถูกส่งกลับไปยังเครื่องระเหยอีกครั้งด้วยความดันไอที่ผลิตได้ ระยะเวลาการ

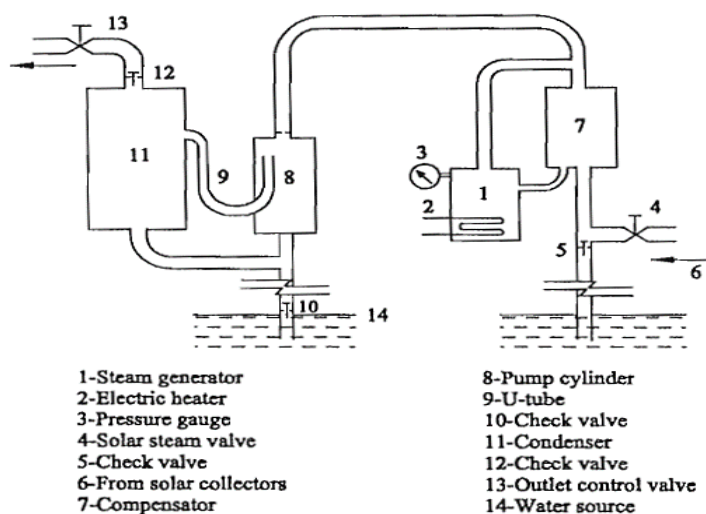
ทำงานของระบบจะถูกควบคุมโดยการทำงานของลูกลอย ติดตั้งที่ด้านข้างของเครื่องระเหย ผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิในถังเก็บความร้อนสูงถึง 85 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีรอบการทำงานต่ำ เนื่องจากไอของสารทำงานที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกควบแน่นที่ถังเก็บน้ำร้อนทำให้สูญเสียความดันในการขับเคลื่อนของเหลวของสารทำงานที่ใช้ในการหมุนเวียนสารทำงาน

El-Mallah & Mohamad (1989) ได้ทดสอบเดินเครื่องปั๊มน้ำความร้อนดังภาพที่ 13 ที่พัฒนาจากห้องปฏิบัติการ โดยออกแบบให้เหมาะสมกับแหล่งน้ำดี้นเท่านั้น ปัจจุบันมีการทดสอบเพื่อรับรองมาตรฐานการทำงานของปั๊มไอน้ำความดันต่ำที่เกิดจากหม้อต้มน้ำ ด้วยเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าไอน้ำนี้ สามารถสร้างได้จริงโดยใช้พลังงานความร้อนรังสีอาทิตย์ วัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพขนาดของระบบเพื่อประสิทธิภาพสูงสุด หลักการทำงานเริ่มแรกเติมน้ำให้เต็มระบบปั๊มน้ำให้ความร้อนน้ำด้วยไฟฟ้าทำให้น้ำในถังต้มกลายเป็นไอ เกิดความดันไปขับเคลื่อนน้ำในถังสูบน้ำให้ดันน้ำในถังควบแน่นไหลกลับผ่านท่อจนความดันเท่ากันทำให้เกิดการควบแน่นเกิดเป็นสุญญากาศดูดน้ำจากด้านล่างขึ้นมาแทนที่เดิมจนมีความดันเท่ากับถังต้มน้ำ และเริ่มทำงานในรอบต่อไป



ภาพที่ 12 แผนภาพประกอบการทำงาน (a) วาล์วลูกลอยปิด (b) วาล์วลูกลอยเปิด

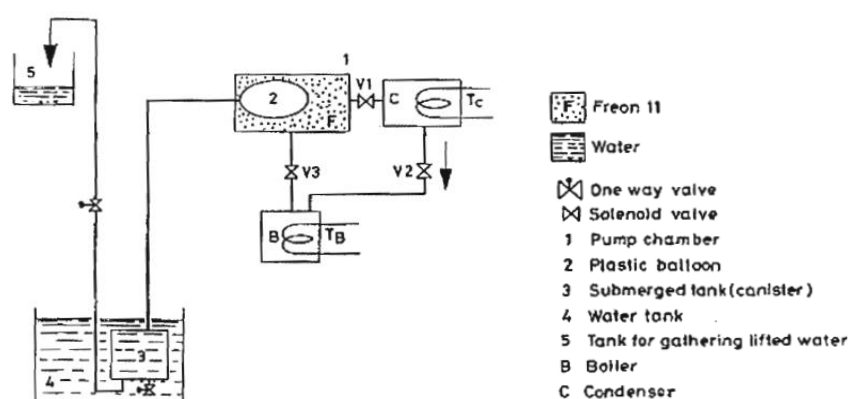
(Beni & Frisen, 1985)



ภาพที่ 13 ระบบการทำงานของปั๊มไอน้ำ
(El-Mallah & Mohamad, 1989)

Al-Haddad *et al.* (1996) ได้ทดสอบการทำงานของปั๊มน้ำโดยใช้หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ประดิษฐ์ขึ้น แสดงวงจรดังภาพที่ 14 ประกอบด้วยห้องกักเก็บที่บรรจุสารทำงาน CFC 11 (เป็นมาตรการสูงสุดที่ใช้สังเกตสารฮาโลเจน ไฮโดรคาร์บอน มาตรการป้องกันล่องหนนี้ได้นำมาป้องกันล่องหน เพื่อป้องกันความเสี่ยงต่อสุขภาพ หรือความเสียหายของชั้นบรรยากาศโลก) ลูกลอยพลาสติกใช้เป็นที่เติมอากาศเข้า ถูกติดตั้งด้านในของห้องพักน้ำที่เชื่อมต่อกับถังโลหะ ซึ่งถังโลหะจะถูกจุ่มลงในถังน้ำและจัดวางอย่างเหมาะสม โดยจะมีวาล์วกันกลับเชื่อมต่อกับถังน้ำ เครื่องสูบน้ำที่อยู่ห้องพักน้ำจะเชื่อมกับส่วนอื่นๆ ของเครื่องมือ เช่น ท่อทางเดินของน้ำเชื่อมจะเชื่อมต่อและควบคุมด้วยวาล์วอิเล็กทรอนิกส์ (V1 V2 และ V3) เครื่องต้มน้ำที่มีปริมาตร V ถูกเติมสารไว้ครึ่งหนึ่ง คือ สาร CFC 11 ถูกปกคลุมด้วยคอยล์ทองแดง ซึ่งสร้างการถ่ายเทความร้อนทั้งพื้นที่ (AB) ไปยังเครื่องต้มน้ำร้อนที่มาจากไอน้ำร้อน TB และออกมาสู่อุณหภูมิต่ำ TBO ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน UB คอยล์ทองแดง (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว) ซึ่งวางเปลือยอยู่ การประยุกต์ใช้สาร CFC 11 ที่มีลักษณะเป็นไอจะถูกระบายความร้อนที่พื้นที่ AC และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ในห้องเก็บน้ำจะมีลูกลอยติดตั้งอยู่ลูกลอยนี้ทำจากโพลีทีลิน ห้องเก็บน้ำที่ช่องดูดทำจากกระจกเอาไว คอยสังเกตดูการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทำงานโดยอาศัยอุปกรณ์ คือ เครื่องต้มน้ำ และตัวระบายความร้อนไปถึงท่อทางต่างๆ สภาพอุณหภูมิคงที่ TB และ TC โดยลำดับวัฏจักรที่เกิดขึ้นนั้นจะประกอบด้วยวิธีการทำความร้อน และวิธีการทำความเย็นระหว่างกระบวนการให้ความร้อน และวิธีการทำความเย็นระหว่างกระบวนการให้ความร้อน ความร้อนของสาร CFC 11 จะเป็นไอที่เครื่องต้ม และผ่านไปห้องลูกลอยระหว่างวิธีการนี้ความดันและอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และมีความดัน 18.186 ปอนด์ต่อ

ตารางนี้ โดยลำดับ ผลสำเร็จที่ได้จากเงื่อนไขเหล่านี้ คือลูกลอยได้ถูกกดลงอากาศจึงถูกปล่อยเข้าไปยังถังน้ำที่ติดอยู่กับผิวน้ำ ทำให้มีการเคลื่อนที่ของน้ำ ตัวคอนเดนเซอร์ (C) จะทำให้สาร CFC 11 ซึ่งเป็นไอเย็นตัวลงผลที่ได้คือ ความดัน และอุณหภูมิจะลดลงจาก 12.82 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ต่อจากนั้นน้ำไหลจาก (T1) ไปยัง (T2) ผ่านวาล์วก้นกลับ น้ำจะเข้าไปแทนที่ในเครื่องสูบน้ำก่อนที่จะไปที่ (T3) วาล์วก็ทำงานอย่างสมบูรณ์ วาล์วทั้งหมดจะถูกควบคุมโดยวาล์ว 3 ตัว (V1 V2 และ V3) ซึ่งจะทำให้เกิดวัฏจักรใหม่ต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ

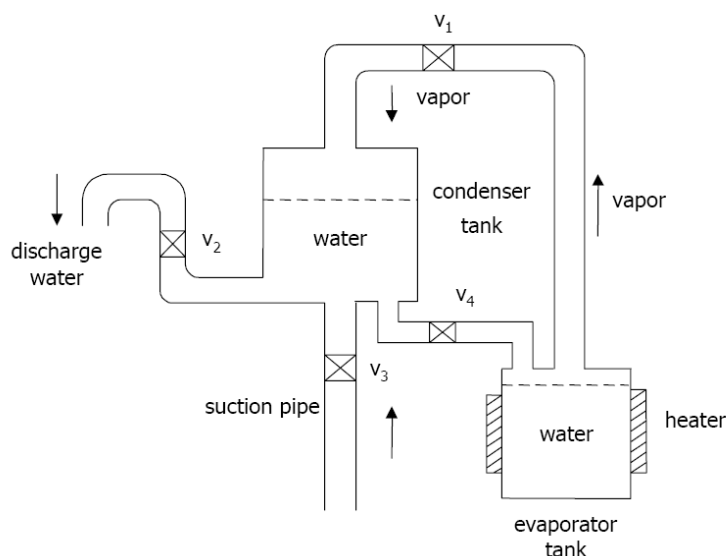


ภาพที่ 14 วงจรการทำงานของเครื่องปั๊มน้ำโดยใช้หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์

(Al-Haddad *et al.*, 1996)

Liengjindathaworn *et al.* (2002) ได้ศึกษาการสูบน้ำโดยใช้พลังงานความร้อนจากฮีตเตอร์ ระบายความร้อนอากาศ เครื่องสูบน้ำประกอบด้วย ถังระเหย (Evaporator tank) ถังควบแน่น (Condenser tank) และตัวกำเนิดพลังงานความร้อน (Heater) ดังภาพที่ 15 ซึ่งความลึกสูงที่ใช้ในการศึกษาการสูบน้ำอยู่ 2.5 เมตร และความสูงในการส่งน้ำสูงสุด 4 เมตร ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิการทำงานของระบบอยู่ระหว่าง 80-120 องศาเซลเซียส และมีขั้นตอนการทำงานดังนี้ 1. ช่วงให้ความร้อน เมื่อให้พลังงานไฟฟ้ากับตัวกำเนิดความร้อน (Heater) พลังงานความร้อนจะทำให้น้ำที่อยู่ในถังระเหย (Evaporator) มีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นไปเรื่อยตามเวลาที่ได้รับความร้อน จนกระทั่งความดันในถังสูง 2. ช่วงจ่ายน้ำ เมื่อความดันถังระเหยสูง เปิดวาล์ว V1 และ V2 ให้น้ำจากถังระเหยเข้าไปขับเคลื่อนน้ำไปยังถังควบแน่นและไหลออกทางวาล์ว V2 จนกระทั่งความดันภายในถังเท่ากับความดันภายนอกน้ำจะหยุดไหล แล้วปิด V1 และ V2 3. ช่วงระบายความร้อน หลังจากสิ้นสุดช่วงจ่ายน้ำ แล้วปล่อยให้ถังควบแน่นถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ อุณหภูมิและความดันภายในถังลดลงทำให้น้ำในถังเกิดการควบแน่น ความดันในถังควบแน่นลดลงต่ำกว่าความดันบรรยากาศ จนกระทั่งความดันเกือบจะไม่ลดลงอีก 4. ช่วงสูบน้ำ หลังจากช่วงระบายความร้อน เปิดวาล์ว V3 น้ำ

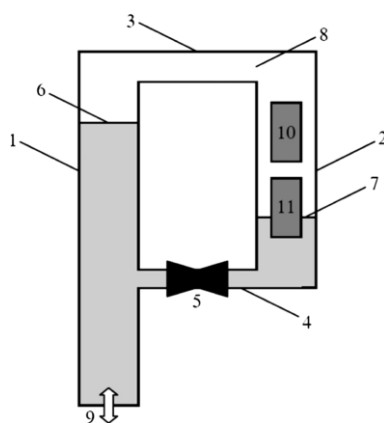
ในถังด้านล่างจะถูกสูบขึ้นผ่านวาล์ว V3 มายังถังควบแน่น จนกระทั่งน้ำหยุดไหล จึงปิดวาล์ว V3 5. ช่วงเติมน้ำ เมื่อสิ้นสุดช่วงสูบน้ำแล้ว จะเปิดวาล์ว V1 และ V4 ทำให้น้ำจากถังควบแน่นไหลลงไปเติมในถังระเหยที่อยู่ต่ำกว่า จนกระทั่งน้ำในถังมีระดับตามต้องการ จึงปิดวาล์ว V1 และ V4 เมื่อสิ้นสุดช่วงเติมน้ำแล้ว ก็กลับไปเริ่มต้นช่วงการให้ความร้อนใหม่หมุนเวียนในลักษณะเดียวกันไปเรื่อย ๆ



ภาพที่ 15 เครื่องสูบน้ำพลังงานความร้อนจากฮีตเตอร์
(Liengjindathaworn *et al.*, 2002)

Markides & Smith (2011) ได้การสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นพลังงานกล (Heat engine) เกรดต่ำ สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุด ผลของตัวแปรต่างๆ ของอุปกรณ์ส่วนสำคัญในการออกแบบที่ต้องใช้ความระมัดระวัง สำหรับความเหมาะสมของอุปกรณ์ คือ วาล์วป้อนกลับ ลูกสูบกำลัง ปริมาตรแอเดียแบติก และความต้านทานความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การเคลื่อนที่ของสารทำงาน ระบบความร้อน ที่มีความสามารถในการแปลงความร้อนระดับต่ำมาใช้งานให้เกิดประโยชน์ โดยวิธีการนำไปใช้ของเทคโนโลยีการใช้ความร้อนต่ำ การระเหยจะเกิดขึ้นเมื่อสารทำงานของเหลวสัมผัสกับแหล่งความร้อนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (หมายเลข 10) จึงเกิดไอของสารทำงาน (หมายเลข 8) เคลื่อนที่ผ่านท่อตัวยู (หมายเลข 3) ไปซัดดันของเหลวของสารทำงานอีกด้านหนึ่ง จากระดับที่หมายเลข 6 ออกทางท่อสูบน้ำ (หมายเลข 9) โดยมีลูกสูบกำลัง (หมายเลข 1) แสดงการเคลื่อนที่ของของเหลวของสารทำงานจนกระทั่งไอของสารทำงานสัมผัสกับแหล่งความเย็นที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (หมายเลข 11) จะเกิดการควบแน่นสูบน้ำของเหลวของสารทำงานทางท่อสูบน้ำ (หมายเลข 9) ระดับของเหลวของสารทำงานที่เกิดความแตกต่างที่ระดับหมายเลข 6 กับระดับหมายเลข 7 ทำให้ออกของเหลวของสารทำงานที่อยู่สูงกว่าไหลมายัง

ระดับที่ต่ำกว่า เพื่อรักษาระดับของเหลวของสารทำงาน โดยผ่านวาล์วป้อนกลับ (หมายเลข 9) ทางท่อป้อนกลับ (หมายเลข 4) ทำให้ระดับของเหลวของสารทำงานด้านขวา สัมผัสกับแหล่งความร้อนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (หมายเลข 10) จึงเกิดกระบวนการทำงานขึ้นอีกรอบ ดังภาพที่ 16 การออกแบบที่มีประสิทธิภาพจะมีความต้านทานวาล์วป้อนกลับต่ำ การเชื่อมต่อที่ท่อตัว유มีระยะลดลง และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ โดยเส้นผ่าศูนย์กลางของลูกสูบกำลังขนาดเล็กลงแต่ความยาวเพิ่มขึ้น มีขนาดใหญ่โดยเฉลี่ยรวมทั้งปริมาตรไอน้ำที่อยู่ด้านบนของอุปกรณ์ด้วย รวมทั้งการปรับปรุงการถ่ายโอนความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การปรับปรุงสิ่งเหล่านี้มีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพร้อยละ 50 ที่สัมพันธ์กับกฎข้อที่สอง และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.8

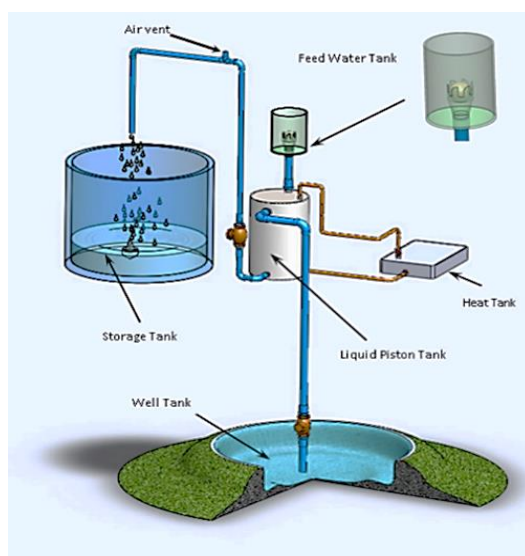


ภาพที่ 16 ระบบการทำงานของอุปกรณ์เปลี่ยนความร้อนเป็นพลังงานกลแบบไม่มีแรงเสียดทาน
(Markides & Smith, 2011)

เกรียงไกร และคณะ (2556) ได้ทำงานวิจัย เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของระบบปั๊มสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำ โดยการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ ซึ่งความร้อนเหลือทิ้งนั้นที่ได้จากการขับเคลื่อนของน้ำภายในถังขับเคลื่อน โดยแหล่งความร้อนที่ใช้ในการผลิตไอน้ำสามารถเลือกใช้ได้หลากหลาย อาทิเช่น แสงอาทิตย์ ถ่านไม้ชีวมวลต่างๆ เพื่อใช้ทดแทนพลังงานไฟฟ้า และเชื้อเพลิง การทำงานของระบบประกอบด้วย ช่วงให้ความร้อนแก่น้ำภายในถังผลิตไอน้ำ ไอน้ำที่เกิดขึ้นและอากาศจะเข้าสู่ถังขับเคลื่อนในช่วงการขับเคลื่อนน้ำ เพื่อขับเคลื่อนน้ำไปยังถังน้ำร้อน และส่วนที่เกินจะถูกเก็บไว้ที่ถังเก็บน้ำ เมื่อขับเคลื่อนน้ำจนหมดแล้ว ไอน้ำ-อากาศจะไหลออกสู่บรรยากาศภายนอก ทำให้เข้าสู่ช่วงการหล่อเย็น โดยน้ำหล่อเย็นจะไหลสู่ถังขับเคลื่อนด้วยแรงโน้มถ่วง ทำให้มีการกลั่นตัวของไอน้ำ มีสุญญากาศเกิดขึ้นที่ถังขับเคลื่อน จึงสามารถสูบน้ำขึ้นมาได้ ในการวิจัยนี้ทำการทดลองที่ระดับความสูงในการจ่ายน้ำ 1 เมตร และใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3000 วัตต์ เป็นแหล่งพลังงานในการผลิตไอน้ำ จากการทดลองพบว่า ปั๊มน้ำระบบนี้ มีค่าปริมาณความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำมีค่าเท่ากับ 16.7 เมกะ

จุล อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยภายในถังน้ำร้อน 46.44 องศาเซลเซียส อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยภายในถังเก็บน้ำ 40.42 องศาเซลเซียส สามารถผลิตน้ำร้อนได้ 246.4 ลิตร และส่งน้ำไปเก็บที่ถังได้ถึง 47 รอบ ภายใน 2 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพความร้อนอยู่ที่ร้อยละ 77.47 และประสิทธิภาพปั๊มอยู่ที่ร้อยละ 0.023 ตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานของระบบ คือ อุณหภูมิน้ำภายในถังขับเคลื่อน และอุณหภูมิน้ำที่เติมให้แก่ถังผลิตไอน้ำ ซึ่งจำนวนรอบการทำงานของระบบจะเพิ่ม และลดการใช้พลังงานจากฮีตเตอร์ ถ้าอุณหภูมิน้ำที่เติมเข้าไปมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิน้ำสิ่งแวดล้อม

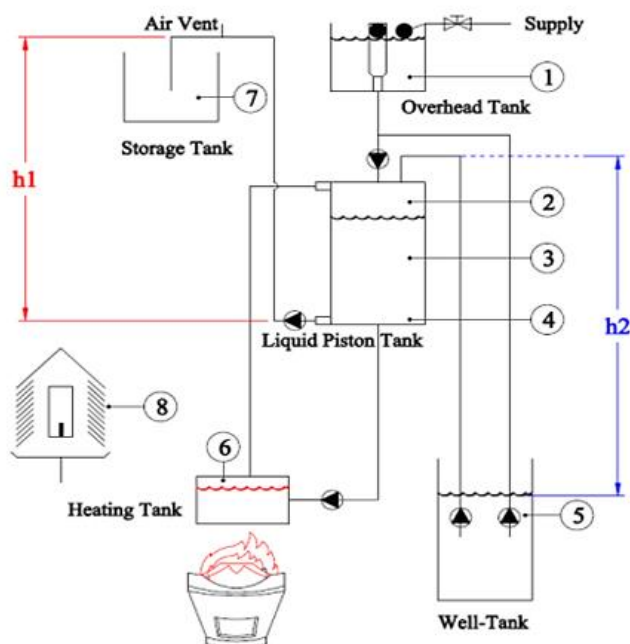
Sitranon *et al.* (2014) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของปั๊มน้ำความร้อนด้วยกำลังไอน้ำแบบอัตโนมัติ ดังภาพที่ 17 จำนวนรอบการทำงานและปริมาณน้ำที่สูบได้จะลดลงเมื่อความสูงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการสูบน้ำที่ระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นระบบจะสูญเสียความเสียดทานภายในท่อ และต้องใช้ความดันสูญญากาศเพิ่มขึ้นตามระดับความสูง ทำให้ระยะเวลาในการสูบน้ำแต่ละรอบเพิ่มมากขึ้นตามความสูงในการสูบน้ำ ระยะเวลาในการสูบน้ำจะขึ้นอยู่กับความเร็วของน้ำที่ไหลเข้าถัง ส่งผลให้ที่ระดับความสูงเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพปั๊มก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย แต่เนื่องจากปริมาณน้ำจะลดลงที่ความสูงเพิ่มขึ้น ดังนั้นจากการวิจัยนี้พบว่าประสิทธิภาพปั๊มสูงสุดร้อยละ 0.0489 ที่ระดับความสูง 2 เมตร ปริมาณน้ำที่สูบได้สูงสุด 218 ลิตร ที่ระดับความสูง 2 เมตร สัดส่วนปริมาตรอากาศที่ส่งผลต่อการทำงานของระบบ การเติมปริมาณอากาศเข้าระบบส่งผลให้จำนวนรอบในการทำงานเพิ่มมากขึ้น แต่ในทางกลับกันปริมาณน้ำที่สูบได้ก็จะลดลงตามสัดส่วนของปริมาตรอากาศที่เติม



ภาพที่ 17 ปั๊มสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำแบบอัตโนมัติ

(Sitranon *et al.*, 2014)

ภาคตัด และคณะ (2558) ได้ทดสอบ เครื่องสูบน้ำพลังงานความร้อนจากถ่านไม้ มีขั้นตอนการทำงานอยู่ 4 ขั้นตอน คือ 1. ขั้นตอนการให้ความร้อน (Heating) เมื่อน้ำในถังผลิตไอน้ำได้รับความร้อนจะมีอุณหภูมิ และความดันเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเดือดกลายเป็นไอลงเข้าสู่ถังขั้วดันน้ำอย่างต่อเนื่อง 2. ขั้นตอนการหมุนเวียนน้ำร้อนในระบบ (Water circulation) เมื่อความดันภายในถังขั้วดันสูงขึ้นเนื่องจากไอน้ำที่ผลิตได้ จนกระทั่งมีค่ามากกว่าค่าเฮดความสูงด้านส่งน้ำ น้ำในถังจะถูกขั้วดันให้ไหลออกไปเก็บยังถังเก็บน้ำ และวาล์วก้นกลับจะปิดกั้นไม่ให้ไอน้ำภายในท่อไหลออกสู่ถังเติมน้ำด้านบน ซึ่งช่วงการขั้วดันน้ำจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งระดับน้ำภายในถังขั้วดันลดลงต่ำกว่าท่อส่งน้ำ ระบบจึงเข้าสู่การทำงานในขั้นตอนต่อไป 3. ขั้นตอนการระบายไอน้ำในระบบ (Vapor circulation) เมื่อระดับน้ำภายในถังลดลง ไอน้ำที่มีความดันจะไหลออกไประบายที่ทางออก ดังนั้นอุณหภูมิและความดันภายในถังขั้วดันลดลง ช่วงการระบายไอน้ำภายในถังขั้วดันน้ำ จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความดันไอน้ำภายในถัง มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศภายนอก ระบบจึงเข้าสู่การทำงานในขั้นตอนต่อไป 4. ขั้นตอนการสูบน้ำเข้าสู่ระบบ (Suction) เมื่อความดันไอน้ำภายในถังมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศภายนอก น้ำจากถังเติมน้ำด้านบน ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำและอยู่สูงกว่า สามารถไหลผ่านวาล์วควบคุมโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกไหลเข้าสู่ถังขั้วดันน้ำ ทำให้เกิดความดันสุญญากาศขึ้นภายใน ดูดน้ำจากถังจำลองบ่อน้ำที่อยู่ด้านล่าง เมื่อขั้นตอนการสูบน้ำเสร็จสิ้น จะครบ 1 รอบการทำงาน ระบบพร้อมที่จะทำงานในรอบต่อไปได้ โดยใน 1 รอบการทำงาน ระบบสามารถหมุนเวียนน้ำได้ 9.5 ลิตรต่อรอบ ระบบปั๊มน้ำพลังงานความร้อนจากถ่านไม้ประกอบด้วย อุปกรณ์หลัก 6 ส่วน คือ 1. ถังเติมน้ำด้านบน (Overhead tank) 2. ถังเก็บน้ำร้อน (Storage tank) 3. ถังผลิตไอน้ำ (Heating tank) 4. ถังขั้วดันน้ำ (Liquid piston tank) 5. ถังจำลองบ่อน้ำ (Well tank) 6. วาล์วไหลทางเดียว (Check valves) ดังแสดงในภาพที่ 18 ปริมาณน้ำหล่อเย็นเท่ากับ 400 มิลลิลิตร ความสูงด้านส่งน้ำ (h_1) และดูดน้ำ (h_2) เท่ากับ 1 เมตร ขนาดท่อสูบน้ำ 19 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ขนาดถังขั้วดันน้ำขนาด 9 ลิตร ทำการทดลองภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ระบบปั๊มน้ำพลังงานความร้อนจากถ่านไม้สามารถผลิตน้ำร้อนได้เท่ากับ 66.5 ลิตร อุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้เฉลี่ย 41.7 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงเพียงพอสำหรับการใช้ในที่อยู่อาศัย ระบบจะเริ่มทำงานเมื่ออุณหภูมิภายในถังขั้วดันมากกว่า 98 องศาเซลเซียส การเติมเชื้อเพลิงให้สม่ำเสมอช่วยเพิ่มจำนวนรอบในการปั๊มน้ำได้ รวมถึงการออกแบบเตาให้สามารถป้อนเชื้อเพลิงได้ง่ายขึ้นอาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง สรุปได้ว่าระบบปั๊มน้ำพลังงานความร้อนสามารถทำงานได้เมื่อใช้ถ่านไม้เป็นแหล่งให้ความร้อน เป็นการลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลหรือไฟฟ้าให้กับเกษตรกรในชนบทได้



ภาพที่ 18 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและส่วนประกอบของระบบปั้มน้ำพลังงานความร้อน
(ภาณุศักดิ์ และคณะ, 2558)

4.2 การสูบน้ำแบบขับเคลื่อนอากาศ

Sitranon *et al.* (2014) ได้ประยุกต์การนำระบบปั้มน้ำความร้อนด้วยกำลังไอน้ำ โดยการใช้ไอน้ำขับเคลื่อนอากาศ ไปทดลองใช้งานจริงสำหรับการเกษตร การแทนที่ปริมาตรอากาศด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ ทำให้เกิดความดันสุญญากาศได้ก็ต่อเมื่อเกิดการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ไอน้ำภายในถังเกิดการยุบตัวลง เนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำ ความความดันภายในจึงเป็นสุญญากาศ และสูบน้ำจากแหล่งน้ำเข้ามาเก็บเพื่อรอการนำไปใช้งานต่อไป โดยใช้พลังงานความร้อนจากฟืนเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ พบว่าระบบสามารถสูบน้ำที่ระดับความลึกได้ 3 เมตร และสูบน้ำเต็มความจุถังในปริมาตร 204 ลิตร แต่ระบบสามารถทำงานได้เพียงแค่วันเดียว

จิรวุฒิ และคณะ (2563) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำแบบต่อเนื่อง การจำลองการทำงานอย่างต่อเนื่องของระบบสามารถลดการใช้พลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบได้ เนื่องจากระบบเริ่มต้นให้ความร้อนในช่วงแรกเท่านั้น ที่ทำให้น้ำอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเกิดการเดือดที่ 100 องศาเซลเซียส และหลังจากนั้นก็รักษาระดับของอุณหภูมิไว้ให้ได้ 100 องศาเซลเซียส ตลอดจนจบการทำงาน ทำให้ระบบไม่ต้องป้อนพลังงานมากในการให้ความร้อน ประสิทธิภาพปั้มน้ำสูงสุดร้อยละ 1.86 ต่อมา ฉัตรชัย และคณะ (2564) ได้ศึกษาปริมาณน้ำหล่อเย็นและอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ส่งผลกับความดันสุญญากาศภายในระบบ เมื่อปริมาณน้ำหล่อเย็นมากขึ้น อุณหภูมิผสมระหว่าง

ไอน้ำและน้ำหล่อเย็นก็จะลดลง ส่งผลให้ความดันสัมบูรณ์ลดลงต่ำกว่าความดันบรรยากาศ เกิดเป็นความดันสุญญากาศมากขึ้นตามปริมาณน้ำหล่อเย็น เช่นเดียวกับการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นให้ต่ำกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมก็จะส่งผลให้ความดันสุญญากาศเพิ่มขึ้นตาม

จากงานวิจัยการใช้ไอน้ำปัมน้ำโดยตรงมีทั้งการใช้ไอน้ำขับเคลื่อนน้ำก่อนสูบน้ำ และการขับเคลื่อนอากาศก่อนสูบน้ำ การขับเคลื่อนน้ำก่อนสูบน้ำจะสูญเสียความร้อนในการผลิตไอน้ำ และสูญเสียความดันที่ใช้ในการขับเคลื่อนน้ำ แต่ระบบแบบที่ขับเคลื่อนน้ำก่อนการสูบน้ำจะทำงานอัตโนมัติที่ใช้ถังขับเคลื่อนและถังสูบน้ำถึงเดียว และยังมีข้อจำกัดเรื่องขนาดถังที่มีปริมาตรคงที่ได้น้อย เนื่องจากถ้าถังมีขนาดใหญ่ก็จะสูญเสียพลังงานในการขับเคลื่อนน้ำที่มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการเติมปริมาณอากาศก็จะช่วยเพิ่มความดันที่ใช้ในการขับเคลื่อนน้ำ จึงเป็นแนวทางในการลดการสูญเสียความดันในช่วงการขับเคลื่อนน้ำ แต่ก็มีผลต่อปริมาณน้ำที่สูบได้ต่อรอบจะลดลง เนื่องจากปริมาตรน้ำจะถูกแทนที่ด้วยปริมาตรอากาศที่เติมเข้าระบบ การขับเคลื่อนอากาศภายในถังสูบน้ำเป็นการแทนที่อากาศด้วยไอน้ำ และทำการหล่อเย็นโดยตรงจะทำให้ระบบใช้พลังงานลดลงกว่าการขับเคลื่อนน้ำ และยังสามารถเพิ่มขนาดของถังสูบน้ำได้ ทำให้ระบบสามารถสูบน้ำต่อรอบได้ในปริมาตรที่มากขึ้น แต่ระบบยังไม่สามารถทำงานต่อเนื่อง หรือทำงานได้หลายรอบ ดังนั้นจึงได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ออกแบบถังสูบน้ำให้มีจำนวนมากกว่าหนึ่งถัง เพื่อรองรับการทำงานแบบต่อเนื่อง ผลที่ได้จากการจำลองพบว่าระบบสามารถสูบน้ำได้หลายรอบติดต่อกัน ซึ่งเป็นแนวทางในการเพิ่มปริมาณน้ำที่สูบได้ต่อวัน และส่งผลโดยตรงกับการเพิ่มประสิทธิภาพปัมน้ำ การเพิ่มประสิทธิภาพปัมน้ำนอกจากปริมาณน้ำที่สูบได้แล้ว ยังมีตัวแปรที่ส่งผลอีกหนึ่งตัวแปรนั่นก็คือ ระดับความสูงในการสูบน้ำ เมื่อระดับความสูงในการสูบน้ำเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพปัมน้ำก็จะเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้นการเพิ่มระดับความสูงในการสูบน้ำจึงต้องเพิ่มความดันสุญญากาศให้มากขึ้นตามเพิ่มเอาชนะความสูงในการสูบน้ำ และการสูญเสียของของไหลภายในท่อ การเพิ่มความดันสุญญากาศทำได้โดยการเพิ่มปริมาณน้ำหล่อเย็นและลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น จากงานวิจัยของฉัตรชัย และคณะ (2564) พบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำหล่อส่งผลต่อความดันสุญญากาศได้มากกว่าการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น เนื่องจากการลดอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นให้ต่ำกว่าความอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการทำมาความเย็น ดังนั้นระดับความสูงในการสูบน้ำที่แตกต่างกันก็จะใช้ปริมาณน้ำหล่อเย็นที่แตกต่างกันด้วยตามความเหมาะสม

5. สรุปผล

การใช้แหล่งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อนสำหรับการสูบน้ำเป็นทางเลือกหนึ่ง แต่มีข้อจำกัดการใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ไม่สามารถควบคุมช่วงเวลาในการสูบน้ำได้ จึงต้องสูบน้ำเพื่อการกักเก็บเท่านั้น เป็นการบริหารจัดการการใช้ใช้อย่างมีระบบ สำหรับการใช้อย่างมีประสิทธิภาพแบบหลอดแก้วสุญญากาศในการสูบน้ำ สามารถผลิตอุณหภูมิได้สูงและหมุนเวียนได้แบบ

ธรรมชาติเหมาะกับการใช้สูบน้ำ การใช้ไอน้ำขับเคลื่อนและสูบน้ำโดยตรงสามารถช่วยลดการสูญเสียความร้อนระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำงานได้ การเติมอากาศมีส่วนช่วยเพิ่มความดันในการขับเคลื่อนน้ำทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วแต่จะได้ปริมาณน้ำที่สูบลดน้อยลง การพัฒนาโดยการลดจังหวะการขับเคลื่อนน้ำปรับเปลี่ยนมาขับเคลื่อนอากาศแทนนั้นจะยิ่งช่วยลดการสูญเสียความร้อนที่ใช้ในการผลิตไอน้ำและลดระยะเวลาในสูบน้ำแต่ละรอบ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มปริมาณการสูบน้ำต่อรอบให้สูงขึ้นตามปริมาตรของถังสูบน้ำ ในส่วนของระดับความสูงในการสูบน้ำที่เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ประสิทธิภาพปั้มน้ำเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้นการเพิ่มระดับความสูงในการสูบต้องใช้ความดันสุญญากาศที่มากขึ้นตามความสูง และการเพิ่มความดันสุญญากาศจะต้องลดอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นหรือเพิ่มปริมาณน้ำหล่อเย็น เพราะฉะนั้นการเติมปริมาณอากาศ การลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น และการเพิ่มปริมาณน้ำหล่อเย็น จะขึ้นอยู่กับระดับความสูงในการขับเคลื่อนน้ำและสูบน้ำ

แนวทางการพัฒนาระบบสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำที่การขับเคลื่อนอากาศ โดยการเพิ่มจำนวนถังในการสูบน้ำและการควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ เพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และการเติมน้ำในถังผลิตไอน้ำเพื่อรักษาระดับน้ำภายในถังเป็นแนวทางให้ระบบสามารถผลิตไอน้ำได้ตลอดเวลา

6. กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- เกรียงไกร เถลิ้มธารังค์, พิชัย นามประกาย, และนริส ประทินทอง. (2556) **ปั้มสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำโดยการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้**. ในการประชุมวิชาการแห่งชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 10, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.
- จิรวัดน์ สิตรานนท์, กิตติวุฒิ ศุทธิวิโรจน์, และณัฐพล รุ่งประแสง. (2563). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการศึกษาระดับความสูงในการสูบน้ำของระบบสูบน้ำความร้อนด้วยกำลังไอน้ำแบบต่อเนื่อง. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**, 15(3), 89-100.
- ฉัตรชัย อุ่นวิเศษ, จิรวัดน์ สิตรานนท์, และกิตติวุฒิ ศุทธิวิโรจน์. (2564). การศึกษาอุณหภูมิและปริมาณน้ำหล่อเย็นที่ส่งผลต่อความดันสุญญากาศของปั้มสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำ. **วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน**, 4(3), 107-120.

- ภาณุศักดิ์ มูลศรี, ปองพล รักการงาน, ชลิตล อินยาศรี, และกังสตาล สกุลพงษ์มาลี. (2558, พฤศจิกายน). **เครื่องสูบน้ำพลังงานความร้อนจากถ่านไม้สำหรับชุมชน**. ในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี.
- ยศสวิน กายนันท์. (2543). **การหมุนเวียนน้ำโดยใช้พลังงานความร้อน**. (ประกาศนียบัตรบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- Al-Haddad, A.A., Enaya, E., & Fahim, M.A. (1996). Performance of a thermodynamic. **Applied Thermal Engineering**, 16(4), 321-334.
- Beni G.D., & Friesen R. (1985). Passive downward heat transport experimental results of a technical unit. **Solar Energy**, 34(2), 127-134.
- Das, D., & Gopal, M.R. (2004). Studies on a metal hydride based solar water pump. **International Journal of Hydrogen Energy**, 29, 103-112.
- El-Mallah, A.A., & Mohamad, M.A. (1989). Development of solar energy operated Water pumping system. **Proceeding of the International Solar Energy Society Japan**, 3, 2025-2029.
- Jenness, J. R., Jr. (1961). Some consideration relative to a solar power savery water pump. **Solar Energy**, 5(2), 58-60.
- Liengjindathaworn, S., Kirtikara, K., Namprakai, P., & Kiatsiroat, T. (2002). Parametric studies of a pulsating-steam water pump. **International Journal of Ambient Energy**, 23(1), 37-46.
- Markides, C.N., & T.C.B. Smith, T.C.B. (2011). A dynamic model for the efficiency optimization of an oscillatory low grade heat engine. **Energy**, 36(12), 6967-6980.
- Mohamed, O., Lotfi, M.L., Mohamed, O., Wasim, J., & Mohamed, R.E. (2022) Solar water-pump thermal analysis utilizing copper-gold/engine oil hybrid nanofluid flowing in parabolic trough solar collector: Thermal case study. **Case Studies in Thermal Engineering**, 30(9), 1017561-17.
- Picken, D.J., Seare, K.D.R., & Goto, F. (1997). Design and development of water Piston solar powered steam pump. **Solar Energy**, 61(3), 219-224.
- Rao, D. P., & Rao, K. S. (1976). Solar water pump for liff irrigation. **Solar Enersy**, 18(5), 405-411.

- Seldon, J. W., Crane, R.A., & Kranc, S. C. (1976). Pumping action from heat-driven Oscillations in a liquid-vapour column. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 9(10), 1419-1425.
- Sitranon, J., Lertsatitthanakorn, C., Namprakai, P., Namprakai, N., Suparos, T., & Roonprasang, N. (2014). Parametric consideration of a thermal water pump and application for agriculture. **Journal of Solar Energy Engineering (ASME)**, 137(3), 03100601-12.
- Sitranon, J., Lertsatitthanakorn, C., Namprakai, P., Namprakai, N., Suparos, T., & Roonprasang, N. (2014). Performance enhancement of solar water heater with a thermal water pump. **Journal of Energy Engineering (ASCE)**, 141(4), 0401403601-10.
- Sutthivirode, K., Namprakai, P., & Roonprasang, N. (2009). A new version of a solar water heating system coupled with a solar water pump. **Applied Energy**, 86(9), 1423-1430.
- Wong, Y.W., & Sumathy, K. (2001). Performance of a solar water pump with ethyl-ether as working fluid. **Renewable Energy**, 22(1-3), 389-394.

การออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่สะท้อนอัตลักษณ์
เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห จังหวัดพิษณุโลก
SOUVENIR DESIGN THAT REFLECTS THE IDENTITY OF BAN
TAOHAI POTTERY, PHITSANULOK PROVINCE

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

วันที่เข้ารับ 2 มีนาคม 2565

วันที่แก้ไขบทความ 25 เมษายน 2565

วันที่ตอบรับบทความ 26 เมษายน 2565

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหจังหวัดพิษณุโลก 2) เพื่อออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่สะท้อนอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหจังหวัดพิษณุโลก 3) เพื่อประเมินแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่พัฒนาขึ้น ผลการวิจัยพบว่า 1) อัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห คือ เนื้อแกร่งมีส่วนผสมของกรวด และทรายเนื้อเป็นสีเทา สีน้ำตาล หรือสีน้ำตาลดำ ตกแต่งผลิตภัณฑ์เป็นรูปทรงเรขาคณิตด้วยการกดประทับลาย การขูดขีดให้เกิดลาย การใช้ลูกกลิ้งกดลาย และการตกแต่งด้วยการปั้นแปะลายขดनुनตัวรูปตัว “อุ” ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหมีความโดดเด่นมากที่สุด และเคลือบผิวผลิตภัณฑ์เป็นสีน้ำตาลเข้มไปจนถึงสีดำ 2) การออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ของที่ระลึกโดยใช้แนวคิดในการออกแบบจากรูปร่างรูปทรงของเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห และการตกแต่งลวดลายขดनुนตัวรูปตัว “อุ” มีผลการออกแบบ จำนวน 6 แบบ 3) ผลการประเมินออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ของที่ระลึก ทั้ง 6 แบบ มีความเหมาะสมอยู่ในระดับมาก โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.65-4.00 ซึ่งรูปแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ของที่ระลึกที่ได้คะแนนเฉลี่ยสูงสุด 3 อันดับแรก เรียงตามลำดับคะแนน ได้แก่ แบบD ($\bar{X}$ =4.00) แบบA ($\bar{X}$ =3.91) และ แบบC ($\bar{X}$ =3.84)

คำสำคัญ: การออกแบบผลิตภัณฑ์, เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห, ของที่ระลึก, อัตลักษณ์

Abstract

This research has three objectives as follows, first, to study the characteristics of the ceramic souvenir product designs in Ban Taohai, Phitsanulok; second, to design new souvenir products that reflect the Ban Taohai identity; and third, to evaluate the newly developed ceramic souvenir products. This research started with the analysis and synthesis of data from related previous research regarding Ban Taohai pottery products. The study then developed a concept for a process of designing the ceramic souvenir products. The evaluation of the ceramic product design was conducted together with 11 experts. The results of their evaluation were as follows. First, Ban Taohai pottery products included stoneware mixed with gravel and sand, and the clay used can be gray, brown, and red colors. They were decorated with geometric shapes pattern using pressing, scratching, rolling, and molding and pasting techniques. The use of these techniques, together with dark brown to black glazing, made the Ban Taohai pottery products more unique and outstanding. Second, the ceramic souvenir design that was developed by adopting the concept of Ban Taohai unique patterns resulted in 6 patterns of low relief decoration (“อุ” shape. Third, the evaluation of the new ceramic souvenir product design, which has 6 patterns, was rated as “highly appropriate level” with an average score at 3.65-4.00. The top 3 most satisfactory patterns were pattern D ($\bar{X}$ =4.00), pattern A ($\bar{X}$ =3.91), and pattern C ($\bar{X}$ =3.84).

Keywords: Product design, Ban Taohai pottery, Souvenir, Identity

1.บทนำ

ชุมชนบ้านเตาไห ตำบลห้วยรอ อำเภอมือง จังหวัดพิษณุโลก เป็นชุมชนเก่าแก่ อยู่ติดริมฝั่งแม่น้ำน่านด้านทิศเหนือของตัวเมืองพิษณุโลก และมีพื้นที่ติดกับวัดตาปะขาวหาย ซึ่งในอดีตเป็นชุมชนที่เป็นแหล่งผลิตเครื่องปั้นดินเผาที่สำคัญของเมืองพิษณุโลก ซึ่งจากการขุดค้นทางโบราณคดีของกรมศิลปากร พบว่าแหล่งเครื่องปั้นดินเผาวัดตาปะขาวหาย หรือบ้านเตาไห มีอายุประมาณ 500-600 ปี ซึ่งเป็นการผลิตเพื่อใช้ในท้องถิ่นและส่งขายต่างประเทศ และเป็นแหล่งเตาเผาเครื่องปั้นดินเผาขนาดใหญ่ซึ่งคาดว่ามียานวนประมาณ 40-50 เตา (สุรพินโญ, 2543)

จนกระทั่งปี พ.ศ.2558 ผู้นำชุมชนได้แนวคิดว่าควรมีการฟื้นฟูเพื่อผลิตเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหในเชิงอนุรักษ์ขึ้นมาใหม่ จึงรวมตัวกันตั้งวิสาหกิจชุมชนเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหขึ้นมา และทำงานผลิตเครื่องปั้นดินเผาในลักษณะการอนุรักษ์เพื่อจัดแสดงโชว์ลวดลายเครื่องปั้นดินเผาตาม

แบบโบราณ เช่น แจกัน แก้ว และจาน โดยยังไม่ได้ผลิตเพื่อการจัดจำหน่าย ซึ่งจากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับแนวทางการพัฒนาการดำเนินงานของวิสาหกิจชุมชนบ้านเตาไห เมื่อปี 2561 (โชติ, 2561) พบว่า การบริหารงานของกลุ่มยังขาดการประชาสัมพันธ์ให้หน่วยงานภายนอกได้รู้ถึงคุณลักษณะพิเศษของหัตถกรรมเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห ขาดการส่งเสริมด้านการขายสู่ตลาดใหญ่ๆ ขาดการควบคุมคุณภาพสินค้า และยังการสนับสนุนจากองค์การที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาสินค้าให้ได้มาตรฐานสำหรับการจัดจำหน่าย ซึ่งทางกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห มีความต้องการในการพัฒนาสินค้าให้ได้มาตรฐานสำหรับการจัดจำหน่าย การออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิตให้สามารถควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้มีมาตรฐานตลอดจนเพิ่มกำลังการผลิตพร้อมกับต้องการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่สามารถใช้อัตลักษณ์ของบ้านเตาไหในการสร้างจุดเด่นในบรรจุภัณฑ์ให้เป็นจดจำของลูกค้าและประชาสัมพันธ์ชุมชนให้เป็นที่รู้จัก

ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห จังหวัดพิษณุโลก เพื่อใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่สะท้อนอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งผลการวิจัยจะเป็นการสื่อสารอัตลักษณ์และวัฒนธรรมของท้องถิ่นผ่านผลิตภัณฑ์เซรามิกได้อย่างกว้างขวางทำให้อัตลักษณ์ของท้องถิ่นเป็นที่รู้จักมากยิ่งขึ้น และยังเป็นการสร้างโอกาสในการพัฒนาต่อยอดผลิตภัณฑ์โบราณไปสู่ผลิตภัณฑ์สมัยใหม่ เพื่อเข้าสู่ช่องทางการตลาดที่หลากหลายตลอดจนการส่งเสริมการท่องเที่ยวชุมชนต่อไป

2.วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหจังหวัดพิษณุโลก
- 2.2 เพื่อออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่สะท้อนอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหจังหวัดพิษณุโลก
- 2.3 เพื่อประเมินแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ของที่ระลึกที่พัฒนาขึ้น

3.วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่สะท้อนอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหจังหวัดพิษณุโลกครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหจังหวัดพิษณุโลก โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. การศึกษาอัตลักษณ์ของเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห โดยผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตการศึกษาดังนี้ 1) ลักษณะเนื้อดินของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห 2) ชนิดของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห 3) ลักษณะการตกแต่งผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห 4) ลวดลายของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห และ 5) เครื่องหมายสัญลักษณ์ของช่างปั้น

2. วิเคราะห์ข้อมูลจากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยด้านอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหจังหวัดพิษณุโลก โดยการวิเคราะห์เชิงเนื้อหา (Content analysis) และสรุปผลการศึกษาอัตลักษณ์เป็นแนวคิดเบื้องต้นในการออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก

ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่สะท้อนอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหจังหวัดพิษณุโลก ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินการไว้ดังนี้

1. ออกแบบรูปร่างรูปทรงของผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก โดยการใช้รูปร่างรูปทรงของเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหเป็นแนวคิดในการออกแบบ

2. ถอดลวดลายที่มีการปั้นตกแต่งบนผิวผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหโดยการคัดเลือกแบบเจาะจงลวดลายที่สะท้อนอัตลักษณ์ของเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหมากที่สุด เพื่อนำไปใช้ออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกต่อไป

3. ออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่สะท้อนอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหจากการออกแบบรูปร่างรูปทรงในขั้นตอนที่ 1 และการออกแบบลวดลายที่สะท้อนอัตลักษณ์ของเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหมากที่สุดจากขั้นตอนที่ 2 โดยเขียนภาพร่างผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก (Sketch design) จำนวน 6 แบบ โดยที่ผู้วิจัยได้กำหนดแบบเจาะจง (Purposive sampling) ให้รูปแบบของผลิตภัณฑ์เป็นแก้วเซรามิกส์ของที่ระลึกเพื่อสะดวกต่อการผลิตจริงในอนาคตสะดวกต่อการขนส่งและสามารถนำไปใช้งานได้

ขั้นตอนที่ 3 ประเมินแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่พัฒนาขึ้น ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินการไว้ดังนี้

1. สร้างแบบประเมินแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกโดยผู้วิจัยได้กำหนดหัวข้อเกณฑ์การประเมินเพื่อคัดเลือกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก ซึ่งประยุกต์จากงานวิจัยของ สิงหา และนิรัช (2555); วิมลีน และอรรถพร (2562) ดังนี้ 1) ด้านการถ่ายทอดอัตลักษณ์ ได้แก่ 1.1) ผลิตภัณฑ์มีสีสันและลวดลายที่สามารถสื่อถึงอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห 1.2) ผลิตภัณฑ์มีรูปแบบโดยรวมที่สามารถสื่อถึงอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห 2) ด้านความสวยงาม ได้แก่ 2.1) ผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบที่มีความสมดุล 2.2) ผลิตภัณฑ์มีสีสันและลวดลายที่เหมาะสมสัมพันธ์กัน 2.3) ผลิตภัณฑ์มีรูปแบบโดยรวมเหมาะสม 3) ด้านความคิดสร้างสรรค์ ได้แก่ 3.1) ผลิตภัณฑ์มีรูปแบบไม่ซ้ำแบบเดิม 3.2) ผลิตภัณฑ์มีรูปแบบที่น่าสนใจและมีเอกลักษณ์ 4) ด้านหน้าที่ใช้สอย ได้แก่ 4.1) ผลิตภัณฑ์มีความเหมาะสมต่อการผลิตจริง 4.2) ผลิตภัณฑ์มีความเหมาะสมเป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ของที่ระลึก

2. ประเมินคุณภาพเชิงเนื้อหาของแบบประเมินภาพร่างผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก (Index of item objective congruence) ผู้วิจัยทำการคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญโดยใช้วิธีแบบเจาะจง (Purposive sampling) จำนวน 3 ท่าน เพื่อประเมินความสอดคล้องของเนื้อหาการประเมินกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย ซึ่งมีเกณฑ์สำหรับการประเมินดังต่อไปนี้ มีความคิดเห็นว่าหัวข้อคำถามวัด

ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ ให้คะแนน คือ +1 มีความคิดเห็นว่ามันใจ ให้คะแนนคือ 0 และ มีความคิดเห็นว่าหัวข้อคำถามไม่สามารถวัดได้ตรงตามวัตถุประสงค์ ให้คะแนนคือ -1 โดยที่เกณฑ์ค่าดัชนีความสอดคล้อง ตั้งแต่ 0.5 ขึ้นไป จึงยอมรับว่าคำถามในแบบประเมินมีความเหมาะสม

3. ประเมินแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่พัฒนาขึ้น โดยผู้วิจัยทำการคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิ
โดยวิธีแบบเจาะจง (Purposive sampling) จำนวน 11 ท่าน เพื่อประเมินแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก
ที่พัฒนาขึ้น ได้แก่ วิสาหกิจชุมชนเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห ตำบลท้าวรอ จังหวัดพิษณุโลก จำนวน 2
ท่าน ผู้ทรงคุณวุฒิด้านเซรามิกส์ จำนวน 3 ท่าน ผู้ทรงคุณวุฒิด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ จำนวน 3
ท่าน ผู้ทรงคุณวุฒิด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชน จำนวน 3 ท่าน โดยใช้เกณฑ์การประเมินดังนี้
คะแนนเฉลี่ย 4.21-5.00 หมายถึง เหมาะสมมากที่สุด คะแนนเฉลี่ย 3.41-4.20 หมายถึง ความ
เหมาะสมมาก คะแนนเฉลี่ย 2.61-3.40 หมายถึง ความเหมาะสมปานกลาง คะแนนเฉลี่ย 1.81-2.60
หมายถึง ความเหมาะสมน้อย คะแนนเฉลี่ย 1.00-1.80 หมายถึง เหมาะสมมาน้อยที่สุด

4. ผลการวิจัย

การออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่สะท้อนอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไผ่จังหวัดพิษณุโลกครั้งนี้ มีผลการวิจัยออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ผลการศึกษาอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหจังหวัดพิษณุโลก มีผล
การศึกษาดังนี้

1. ลักษณะเนื้อดินของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหที่ค้นพบมี 2 ประเภท (ประมวล และมณี, 2550; สุรพินโญ, 2543) คือ

1.1 เครื่องปั้นดินเผาเนื้อธรรมดา ซึ่งพบในชั้นดินปัจจุบันมากที่สุดเนื่องจากมีความ
แข็งแกร่งไม่มากนัก ทำด้วยดินเหนียวที่มีกรวด และทราย เมื่อเผาเสร็จแล้วเนื้อดินจะกลายเป็นสีเทา
เข้มและสีอิฐ ส่วนใหญ่ทำเป็นภาชนะในครัวเรือน ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหเนื้อธรรมดา

1.2 เครื่องปั้นดินเผาเนื้อแกร่ง มีขนาดต่างๆ กันตั้งแต่ขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-4 เซนติเมตร จนถึงขนาดใหญ่ สูงถึง 80 เซนติเมตร ดินที่นำมาใช้ทำเป็นดินที่ผ่านการเตรียมอย่างดี เมื่อเผาแล้วเนื้อดินจะกลายเป็นสีเทา สีน้ำตาล สีน้ำตาลอมเทา ภาชนะบางชิ้นเคลือบด้วยน้ำสลิปสีน้ำตาลดำ ส่วนใหญ่ทำเป็นไห และแจกัน ดังภาพที่ 2



(ก)

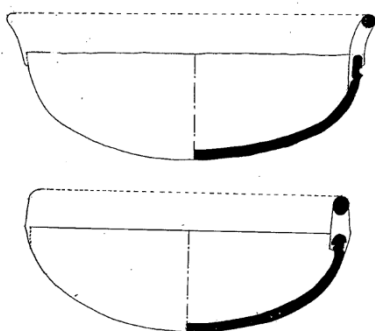


(ข)

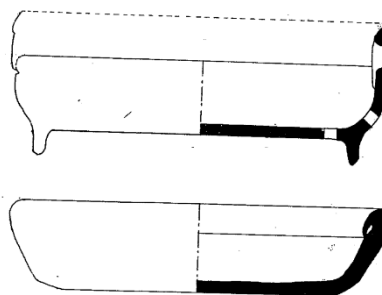
ภาพที่ 2 เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหเนื้อแกร่ง และลักษณะของเคลือบ

(ก) เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหเนื้อแกร่ง (ข) ลักษณะเคลือบเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห

2. ชนิดของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห ซึ่งผู้วิจัยได้แบ่งหัวข้อตามลักษณะเนื้อดิน และประเภทของผลิตภัณฑ์ซึ่งมีการค้นพบผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 3 – 4 และตารางที่ 1



(ก)

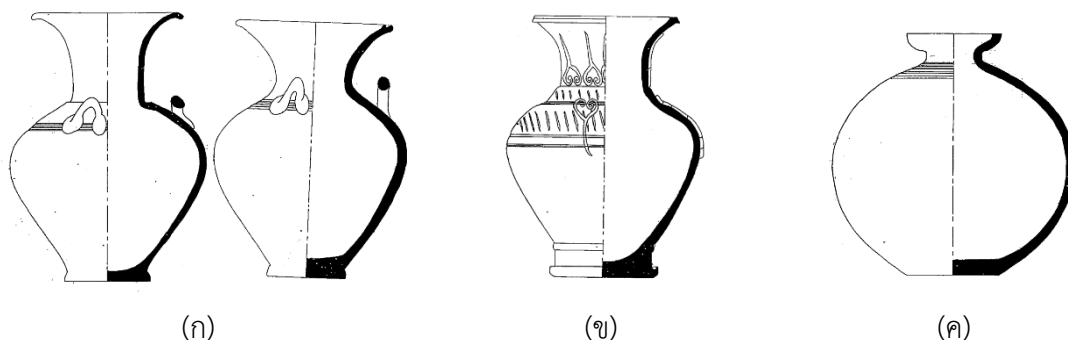


(ข)

ภาพที่ 3 เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหเนื้อธรรมดาประเภทเครื่องใช้ในครัว

(ก) หม้อปากกว้างมีหู 2 หู ก้นคล้ายวงกลม

(ข) หม้อปากกว้างมีหู 2 หู ก้นกลมและก้นแบบมีขาและรูที่ก้นหม้อ



ภาพที่ 4 เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหเนื้อแกร่งประเภทเครื่องใช้ในบ้าน

(ก) ไหปากกว้างแบบ 4 หู (ข) ไหปากกว้างไม่มีหู (ค) แจกันทรงกลม

ตารางที่ 1 ชนิดของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห จังหวัดพิษณุโลก (ประมวล และมณี, 2550; สุรพินโญ, 2543)

ประเภทผลิตภัณฑ์	เครื่องปั้นดินเผาเนื้อธรรมดา	เครื่องปั้นดินเผาเนื้อแกร่ง
1.เครื่องใช้ในครัว	1.หม้อปากกว้าง 2.ชามปากกว้าง 3.ครก 4.เตาหุงข้าว 5.อ่าง	1.หม้อปากแคบ 2.ชามปากกว้าง 3.ครก 4.ถ้วย 5.อ่าง
2.เครื่องใช้ในบ้าน	1.ไหทรงสูง 2.กระปุกปากกว้าง 3.ขวด 4.ตุ๊กตา	1.ไหปากกว้างหรือไหปากแคบ 2.กระปุกปากกว้าง 3.ขวด 4.แจกันทรงกลม
3.วัสดุการก่อสร้าง	กระเบื้องมุงหลังคา	-
4.อุปกรณ์ฝนยา	-	ชามฝนยา ถ้วยฝนยา
5.อุปกรณ์การเผาผลิตภัณฑ์	-	ก๊อที่ใช้สำหรับรองกันระหว่างผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นตัวป้องกันการติดกัน

3. ลักษณะการตกแต่งผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห มีการค้นพบการตกแต่งผลิตภัณฑ์ (ประมวล และมณี, 2550; สุรพินโญ, 2543) ดังนี้

3.1 ลักษณะการตกแต่งด้วยการกดประทับลายหรือตีด้วยไม้ที่แกะลายไว้ (Paddle designs) โดยทำการตกแต่งใน 3 ลักษณะคือ 1) กดประทับลายเฉพาะบริเวณคอ 2) กดประทับลายจากลำตัวถึงคอ และ 3) กดประทับลายทั้งใบ

3.2 ลักษณะการตกแต่งด้วยการปั้นหุทำเป็นรูปคล้ายห่วง ไหขนาดเล็กและขนาดกลางจะมี 3 หุ ส่วนไหขนาดใหญ่จะมี 4 หุ

3.3 ลักษณะการตกแต่งด้วยการใช้เครื่องมือขูดขีดให้เกิดลาย

3.4 ลักษณะการตกแต่งด้วยการปั้นแปะนูนต่ำลายขดทาบกับผิวผลิตภัณฑ์

3.5 ลักษณะการตกแต่งด้วยการใช้นิ้วมือและเล็บกดให้เกิดลาย

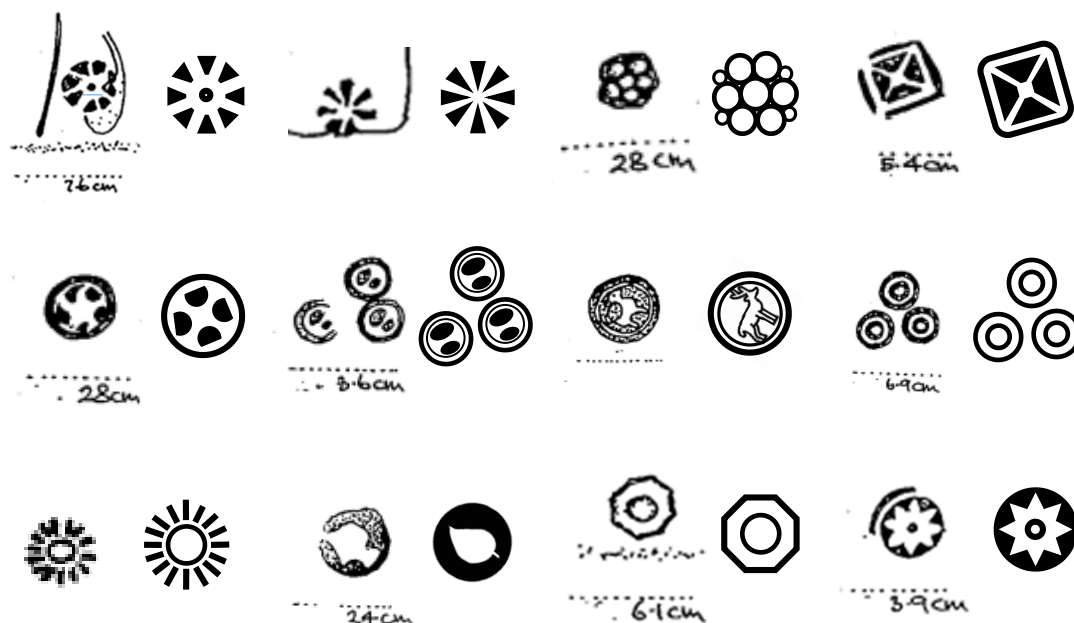
3.6 ลักษณะการตกแต่งด้วยการเคลือบสีน้ำตาลดำ

4. ลวดลายของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห มีการค้นพบการตกแต่งลวดลายบนผิวผลิตภัณฑ์ คือ 1) ลวดลายนูนต่ำรูปตัว “อุ” 2) ลวดลายที่เกิดจากเครื่องมือขูดขีดและเครื่องมือกด และ 3) ลายลวดลายที่เกิดจากการใช้ลูกกลิ้งกดลาย (สุรพินโญ, 2543) ซึ่งผู้วิจัยได้คัดลอกลวดลายที่ผิวผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห ได้ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การตกแต่งลวดลาย “อุ” ที่ผิวผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห

5. เครื่องหมายสัญลักษณ์ของช่างปั้น เป็นลายหรือเครื่องหมายที่ช่างปั้นหม้อไหกลุ่มบ้านเตาไหทำไว้ที่ภาชนะ ปรากฏทั้งภาชนะเนื้อดินธรรมดาและเนื้อแกร่ง เป็นรูปทรงเรขาคณิต เช่น วงกลม สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม รูปวงในวงกลม ลายดาบ ใบไม้ กากบาทในรูปวงกลม ลายดาว และวงกลมซ้อนวงกลม ลายรูปตัว T, X, 7, U และเส้นที่มาจากการใช้เล็บกด มีตั้งแต่เส้นตรงเส้นเดียวไปถึง 5 เส้น แต่ที่พบมากที่สุดคือที่ขีดเป็นเส้นตรง 2 เส้น (สุรพินโญ, 2543) ดังภาพที่ 6

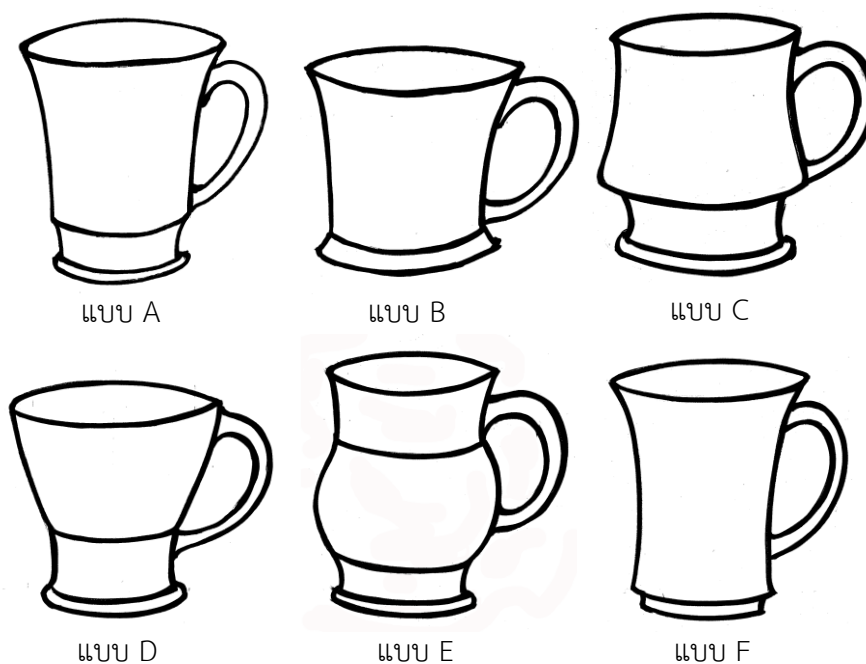


ภาพที่ 6 เครื่องหมายสัญลักษณ์ของช่วงปั้นเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห

6. ผลการวิเคราะห์อัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหจังหวัดพิษณุโลก เป็นแนวคิดเบื้องต้นในการออกแบบเครื่องประดับ ได้ดังนี้ อัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห คือ เนื้อแกร่งมีส่วนผสมของกรวด และทราย เนื้อเป็น สีเทา สีน้ำตาล หรือสีน้ำตาลดำ ซึ่งเกิดจากปริมาณของสนิมเหล็ก (Fe_2O_3) ที่มีอยู่ในวัตถุดิบที่นำมาใช้ทำผลิตภัณฑ์ ดังนั้นตัวที่ทำให้เกิดสีในเนื้อผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหที่สำคัญนั้นคือแร่เหล็กหรือสนิมเหล็ก และตกแต่งผลิตภัณฑ์เป็นรูปทรงเรขาคณิตด้วยการกดประทับลายการขูดขีดให้เกิดลาย การใช้ลูกกลิ้งกดลาย และการตกแต่งด้วยการปั้นแปะลายขูดขุนตำรูปตัว “อุ” ที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหมีความโดดเด่นมากที่สุด และเคลือบมีสีน้ำตาลดำ

ขั้นตอนที่ 2 ผลการออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่สะท้อนอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหจังหวัดพิษณุโลก มีผลดังนี้

1. ออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกโดยการใช้เส้นของรูปร่างรูปทรงเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหที่เป็นอัตลักษณ์โดดเด่นที่สุด ได้แก่ แจกันปากกว้างแบบ 4 หู และแบบไม่มีหูเป็นแนวคิดในการออกแบบ ได้จำนวน 6 แบบ ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ออกแบบรูปร่างรูปทรงของผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก

2. ถอดลวดลายที่มีการปั้นตกแต่งบนผิวผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหโดยการคัดเลือกแบบเจาะจงลวดลายที่สะท้อนอัตลักษณ์ของเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหมากที่สุด เพื่อนำไปใช้ออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ของที่ระลึก ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ลวดลายบนผิวผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห

3. ผลการออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่สะท้อนอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห จำนวน 6 แบบ ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่สะท้อนอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห

ขั้นตอนที่ 3 ผลการประเมินแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่พัฒนาขึ้น มีผลการวิจัยดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งรูปแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่พัฒนาขึ้นทั้ง 6 แบบ มีผลการประเมินอยู่ในระดับมาก โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.65-4.00 โดยแบบที่ได้ค่าคะแนนเฉลี่ยสูงสุด 3 อันดับแรกเรียงตามลำดับคะแนน ได้แก่ แบบ D ($\bar{X} = 4.00$) แบบ A ($\bar{X} = 3.91$) และ แบบ C ($\bar{X} = 3.84$)

ตารางที่ 2 ผลการประเมินแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่พัฒนาขึ้น

หัวข้อการประเมิน	ผลการประเมิน											
	แบบ A		แบบ B		แบบ C		แบบ D		แบบ E		แบบ F	
	$\bar{X}$	S.D.	$\bar{X}$	S.D.	$\bar{X}$	S.D.	$\bar{X}$	S.D.	$\bar{X}$	S.D.	$\bar{X}$	S.D.
1.ด้านการถ่ายทอดอัตลักษณ์												
1.1 มีสีสันทและลวดลายที่สามารถสื่อถึงอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห	3.82	0.75	3.73	0.90	3.73	0.90	4.09	0.70	3.82	0.75	3.73	0.79
1.2 มีรูปแบบโดยรวมที่สามารถสื่อถึงอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห	4.00	0.63	3.91	0.83	3.91	0.83	4.09	0.70	3.73	0.79	3.64	0.92
2. ด้านความสวยงาม												
2.1 มีการจัดองค์ประกอบที่มีความสมดุล	3.91	0.7	3.91	0.83	3.82	0.75	3.82	0.75	3.73	0.65	3.55	0.69
2.2 มีสีสันทและลวดลายเหมาะสมสัมพันธ์กัน	3.73	0.65	3.73	0.65	3.73	0.79	4.00	0.63	3.55	0.69	3.64	0.67
2.3 มีรูปแบบโดยรวมเหมาะสม	3.82	0.75	3.73	0.65	3.64	0.81	3.91	0.83	3.55	0.69	3.64	0.67
3. ด้านความคิดสร้างสรรค์												
3.1 มีรูปแบบไม่ซ้ำแบบเดิม	3.64	0.81	3.36	0.67	3.91	0.94	3.73	0.65	3.73	0.79	3.55	0.69
3.2 มีรูปแบบที่น่าสนใจและมีเอกลักษณ์	3.91	0.70	3.73	0.65	3.91	0.83	4.00	0.77	3.64	0.81	3.64	0.67
4. ด้านหน้าที่ใช้สอย												
4.1 มีความเหมาะสมต่อการผลิตจริง	4.18	0.60	3.91	0.83	3.82	0.75	4.18	0.60	3.64	0.81	3.64	0.81
4.2 มีความเหมาะสมเป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ของที่ระลึกได้	4.18	0.75	4.00	0.77	4.09	0.94	4.18	0.60	3.91	0.83	3.82	0.87
ค่าเฉลี่ยรวม	3.91		3.78		3.84		4.00		3.70		3.65	
แปลผล	มาก		มาก		มาก		มาก		มาก		มาก	

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่สะท้อนอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหจังหวัดพิษณุโลก สามารถอภิปรายผลตามวัตถุประสงค์การวิจัย ได้ดังนี้

1. ผลการศึกษาอัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหจังหวัดพิษณุโลก มีผลการศึกษาดังนี้ ลักษณะเนื้อดินของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห ที่ค้นพบมี 2 ประเภท คือ เนื้อธรรมดา และเนื้อแกร่ง แบ่งชนิดของผลิตภัณฑ์เป็น เครื่องใช้ในครัว เครื่องใช้ในบ้าน วัสดุการก่อสร้าง อุปกรณ์ฟนยา และอุปกรณ์การเผาผลิตภัณฑ์ โดยมีลักษณะการตกแต่งทั้งการกดประทับลาย การปั้นหุ การขูดขีด การปั้นแปะ การใช้น้ำกวาดลาย และการเคลือบสีน้ำตาลดำ ซึ่งลวดลายของผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหที่มีความโดดเด่นและถือเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวมากที่สุดคือ ลวดลายนูนตัวรูปตัว “อุ” และมีการปั๊มเครื่องหมายสัญลักษณ์ของช่างปั้นในหลากหลายรูปแบบสัญลักษณ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ สนิท (2546) ที่พบว่าเนื้อดินบ้านเตาไหมีสีเทาดำและเคลือบมีสีดำ

2. การออกแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกในครั้งนี้ โดยผู้วิจัยได้ออกแบบของที่ระลึกเป็นแก้วเซรามิกส์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ รจนา (2560) ที่มีผลการวิจัยเรื่องแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาเตาแม่น้ำน้อย สิงห์บุรี ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ภาชนะเครื่องดื่ม ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้รูปร่างรูปทรงของเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหเป็นแนวคิดในการออกแบบ ได้จำนวน 6 แบบ และออกแบบลวดลายบนผิวผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห ด้วยลวดลายนูนตัวรูปตัว “อุ” ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาแนวทางการดำเนินการกลุ่มวิสาหกิจของ โชติ (2561) ที่กล่าวว่าต้องแสดงคุณลักษณะพิเศษของเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไหที่แตกต่างจากที่อื่นให้ภายนอกได้รับรู้และสอดคล้องกับแนวทางการวิจัยของ สุวิทย์ (2555); กฤตยชญ์ และคณินิต (2561) ที่สรุปผลการวิจัยได้ว่าการพัฒนาเครื่องปั้นดินเผาต้องมีการออกแบบให้สอดคล้องกับอัตลักษณ์และลักษณะเฉพาะถิ่น

3. รูปแบบผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่พัฒนาขึ้นทั้ง 6 แบบ มีผลการประเมินอยู่ในระดับมาก โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.65-4.00 โดยแบบที่ได้คะแนนเฉลี่ยสูงสุด 3 อันดับแรกเรียงตามลำดับคะแนน ได้แก่ แบบD ($\bar{X}$ =4.00) แบบA ($\bar{X}$ =3.91) และ แบบC ($\bar{X}$ =3.84)

จากผลการวิจัยดังกล่าว สามารถสรุปผลได้ดังนี้คือ ผลิตภัณฑ์แก้วเซรามิกส์ของที่ระลึกใช้แนวคิดในการออกแบบจากรูปร่างรูปทรงของเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห และออกแบบการตกแต่งด้วยลวดลายขดนูนตัวรูปตัว “อุ” มีการเคลือบผิวผลิตภัณฑ์เป็นสีน้ำตาลเข้มไปจนถึงสีดำ จำนวน 6 แบบ ซึ่งรูปแบบที่ได้คะแนนเฉลี่ยการประเมินสูงสุด 3 อันดับแรก ได้แก่ แบบD แบบA และแบบC

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ทำให้การดำเนินการวิจัยตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ มา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- กฤตยชญ์ คำมิ่ง และคณินนิต ปทุมมาเกษตร. (2561). การศึกษาและพัฒนาตลาดเครื่องปั้นดินเผา
มอญภาคกลางเพื่อออกแบบผลิตภัณฑ์. **วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ในพระบรม
ราชูปถัมภ์**, 13(3), 54-64.
- โชติ บดีรัฐ. (2561). แนวทางการพัฒนาการดำเนินงานของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มหัตถกรรม
เครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห อำเภอมะนัง จังหวัดพิษณุโลก. **วารสารมนุษยศาสตร์และ
สังคมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม**, 12(2), 388-408
- ประมวล โตสวัสดิ์, และมณี ใจแน่น, (2550). **การจัดการความรู้ : กรณีศึกษาชุมชนตาปะขาวหาย.**
(วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- รจนา จันทราสา. (2560). การศึกษามรดกวัฒนธรรมกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ตามแนวคิดเศรษฐกิจ
สร้างสรรค์ : กรณีศึกษาเครื่องปั้นดินเผาเตาแม่ข่ายน้อย สิงห์บุรี. กรมส่งเสริมวัฒนธรรม
กระทรวงวัฒนธรรม.
- วิมลสิน สันตจิต, และอรรถพร ฤทธิเกิด. (2562). การศึกษาอัตลักษณ์ทางวัฒนธรรมโนราห์เพื่อ
ประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องประดับ. **วารสารครุศาสตร์อุตสาหกรรม**, 18(2), 127-139.
- สนธิ ปิ่นสกุล. (2546). **การศึกษาเนื้อดินและพัฒนาน้ำเคลือบเพื่อผลิตเครื่องปั้นดินเผา :**
กรณีศึกษาเครื่องปั้นดินเผาวัดตาปะขาวหาย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ).
มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- สิงหา ปารมภ์, และนิรัช สุดสังข์. (2555). การออกแบบของที่ระลึกโดยใช้อัตลักษณ์เครื่องแต่งกาย
ของชุมชนไทลื้อ บ้านหนองบัว อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน. **วารสารวิชาการ ศิลปะ
สถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร**. 2(2), 25-34
- สุรพินโญ พลาลพล. (2543). **การอนุรักษ์และการสืบสานวัฒนธรรมเครื่องปั้นดินเผาวัดตาปะขาว
หาย อำเภอมะนัง จังหวัดพิษณุโลก.** (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ).
มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- สุวิทย์ อินทิพย์. (2555). การพัฒนางานหัตถกรรมเครื่องปั้นดินเผาในเอกลักษณ์ของชุมชนมอญปาก
เกร็ดสำหรับเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมสมัย. **วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง**, 5(2), 89-101.

การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ของการปลูกผักสลัดแบบ
ไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ในแต่ละฤดูกาล ของจังหวัดนครสวรรค์
THE COMPARISON OF PRODUCTION AND LOGISTICS COSTS
BETWEEN HYDROPONIC AND ORGANIC GROWING METHODS OF
SALAD VEGETABLE FOR EACH SEASON IN NAKHON SAWAN

อาสาพห์ อุตตาลกาญจนา

Asan Uttankanchana

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ อ.เมือง จ.นครสวรรค์ ประเทศไทย 60000

Faculty of Agriculture Technology and Industrial Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University,

Muang, Nakhon Sawan, Thailand, 60000

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

วันที่เข้ารับ 13 เมษายน 2565

วันที่แก้ไขบทความ 25 เมษายน 2565

วันที่ตอบรับบทความ 26 เมษายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ ในจังหวัดนครสวรรค์ โดยใช้การวิเคราะห์ต้นทุนฐานกิจกรรมเข้ามาช่วยวิเคราะห์ต้นทุนในแต่ละกิจกรรมของการปลูกผักสลัด เพื่อหาแนวทางการลดต้นทุนของการปลูกผักสลัดทั้ง 2 วิธี ให้สามารถแข่งขันกับตลาดอื่นได้ มีการสุ่มตัวอย่างด้วยวิธีแบบเจาะจง เป็นการสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้ประกอบการธุรกิจปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ พร้อมทั้งลูกจ้างจำนวน 10 คน พบว่า ต้นทุนรวมการปลูกผักสลัดทั้งหมด ต้นทุนการผลิต และต้นทุนโลจิสติกส์ของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์มีค่าสูงกว่าแบบอินทรีย์ ต้นทุนรวมทั้งหมดของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ในฤดูร้อน มีค่าเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 128 บาทต่อกิโลกรัม และ 75-178 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และผู้ประกอบการไฮโดรโปนิคส์ 2 ได้มีการสูญเสียผักสลัดทั้งหมดเนื่องจากสภาพอากาศและน้ำที่ร้อนจัด จึงต้องยกเลิกการผลิตในฤดูร้อน มีต้นทุนต่ำสุดในฤดูหนาว เท่ากับ 68-69 บาทต่อกิโลกรัม และ 35-53 บาทต่อกิโลกรัม ต้นทุนการผลิตมีร้อยละส่วนสูงกว่าต้นทุนโลจิสติกส์ มีผลมาจากค่าจ้างแรงงานที่สูง คิดเป็นร้อยละ 70 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด และกิจกรรมโลจิสติกส์ที่มีต้นทุนสูงที่สุด คือ การขนส่ง คิดเป็นร้อยละ 60 ของต้นทุนโลจิสติกส์ทั้งหมด ดังนั้น แนวทางในการลดต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ คือ การเพิ่มผลผลิตต่อพื้นที่การ

เพาะปลูก และการบริหารจัดการการผลิตและโลจิสติกส์ที่เหมาะสมต่อสภาพแวดล้อมของธุรกิจนั้น ๆ
และฤดูกาลเพาะปลูกด้วย

คำสำคัญ: การปลูกผักสลัดไฮโดรโปนิกส์, การปลูกผักสลัดอินทรีย์, ต้นทุนโลจิสติกส์,
ต้นทุนฐานกิจกรรม, กิจกรรมโลจิสติกส์

Abstract

This research was focused on analyzing production and logistics cost of growing hydroponic and organic salad vegetables in Nakhon Sawan Province. Activity-based costing was used to analyze the cost in each activity of growing salad vegetables. This was conducted to reduce the production cost of the two methods of salad vegetable growing to be competitive with other markets. Purposive sampling was used. The data were collected by having an in-depth interview with ten entrepreneurs growing salad vegetables and their employees. The results were found that the total production and logistics cost of growing hydroponic salad vegetables was higher than that of growing organic ones. In summer, the mean of the total cost of growing hydroponic and organic salad vegetables was 128 bahts per kilogram and 75-178 bahts per kilogram, respectively. The hydroponic entrepreneur 2 lost all of his vegetables due to the extremely hot air and water, so he cancelled his production during the summer. The cost of growing hydroponically and organically, 68-69 bahts per kilogram and 35-33 bahts per kilogram, respectively, was at the lowest level in the cold season. The production cost ratio was higher than the logistics cost ratio. This was because of the high cost on labor hiring, 70% of the total production cost. The highest cost of the logistics activity was the transportation cost, 60% of the total logistics cost. Therefore, the approach to reduce production and logistics cost can be done by increasing products per growing areas and appropriate production and logistics management for business ecosystem as well as farming season.

Keywords: Hydroponic growing methods of salad vegetables, Organic growing methods of salad vegetables, Logistics costs, Activity-based costing, Logistics activities

1. บทนำ

ผักสลัด นิยมบริโภคในเมนูสุขภาพ หรือนำมาตกแต่งเมนูอาหาร (บุญทวรรณ และคณะ, 2554) การปลูกผักสลัด มีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การปลูกแบบใช้สารเคมี การปลูกแบบอินทรีย์ และการปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีขั้นตอนการปลูกและดูแลที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ต้นทุนในการปลูกผักสลัดแต่ละวิธีแตกต่างกันอีกด้วย (อาสาพห์ และสถิตเทพ, 2562) ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ เนื่องจากเป็นวิธีการปลูกผักสลัดที่ปลอดภัยจากสารเคมีกำจัดศัตรูพืช อันส่งผลต่อสุขภาพของผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม (ศรีธรรมพร, 2558) และเป็นวิธีที่นิยมปลูกในจังหวัดนครสวรรค์อีกด้วย การปลูกผักสลัดที่คำนึงถึงความปลอดภัยต่อผู้บริโภค นั้น มีขั้นตอนการปลูกและดูแลรักษาค่อนข้างซับซ้อน หลายขั้นตอน เนื่องจากเป็นวิธีการปลูกผักสลัดที่ไม่ใช้สารเคมีในการกำจัดศัตรูพืช ส่งผลให้เกิดความสูญเสียของผักสลัดค่อนข้างง่าย จึงเกิดความไม่แน่นอนของปริมาณและคุณภาพผักสลัด อีกทั้งยังต้องปฏิบัติตามมาตรฐานรับรองเกษตรปลอดภัย ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้เกิดต้นทุนการปลูกผักสลัดที่สูง (ชวิตา, 2563) ในบางฤดูกาล เช่น ฤดูร้อน ผักสลัดมีราคาขายสูงถึง 100-150 บาท/กิโลกรัม จากราคาเฉลี่ย 60-90 บาท/กิโลกรัม ผู้ประกอบการบางรายไม่มีผักสลัดส่งออกขายให้แก่ผู้บริโภค เนื่องจากสูญเสียผักสลัดทั้งหมด จากสภาพอากาศที่ร้อนจัด ทำให้ผู้ประกอบการขาดทุน เป็นหนี้ และแบกรับต้นทุนการปลูกผักสลัดที่สูงกว่ากำไรอีกด้วย จากการลงพื้นที่ให้บริการด้านการจัดการโลจิสติกส์แก่ผู้ประกอบการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์พบว่า ผู้ประกอบการปลูกผักสลัดทั้ง 2 วิธี ไม่มีการเก็บข้อมูลด้านต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ ส่งผลให้ผู้ประกอบการไม่ทราบถึงต้นทุนในการปลูกผักสลัดอย่างแท้จริง รวมถึงต้นทุนโลจิสติกส์ที่แฝงอยู่ในแต่ละขั้นตอน ทำให้ไม่ทราบต้นทุนที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละกระบวนการ ผู้ประกอบการจึงไม่สามารถตั้งราคาขายที่เหมาะสมในการปลูกผักสลัดได้ ทำให้ขาดทุนหรือได้กำไรน้อย อีกทั้งยังขาดการบริหารจัดการด้านโลจิสติกส์ที่มีประสิทธิภาพ จึงทำให้เกิดความสูญเสียเปล่าในขั้นตอนการปลูกผักสลัด ซึ่งส่งผลต่อการเกิดต้นทุนการปลูกผักสลัดที่สูงขึ้น

การจัดการโลจิสติกส์นี้ มีกิจกรรมตั้งแต่การจัดซื้อวัตถุดิบ การวางแผนการผลิต การเก็บรักษา การขนส่งสินค้า จนถึงการติดต่อสื่อสาร และการบริการแก่ลูกค้า (อาสาพห์ และสถิตเทพ, 2562) จำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ประกอบการควรมีการบริหารจัดการโลจิสติกส์ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อช่วยลดต้นทุนโลจิสติกส์ของการปลูกผักสลัดลง และยังช่วยให้ผู้ประกอบการมองเห็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนอย่างชัดเจนอีกด้วย (กุลบัณฑิต และคณะ, 2558) ในการพัฒนาผู้ประกอบการปลูกผักสลัดให้สามารถจัดการต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จะใช้เครื่องมือการวิเคราะห์ต้นทุนฐานกิจกรรม (Activity-based costing; ABC) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ต้นทุน ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถระบุกิจกรรม แยกกิจกรรมต่าง ๆ ออกจากกันอย่างชัดเจน พร้อมทั้งรวบรวมต้นทุนที่เกิดขึ้นในกิจกรรมดังกล่าวอีกด้วย เพื่อให้ทราบถึงต้นทุนที่เกิดขึ้นอย่างแท้จริงในแต่ละ

กิจกรรม (จักรพันธ์, 2564) เช่น ค่าจ้างแรงงาน ค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ค่าการจัดซื้อจัดหา ค่าการเก็บรักษา ค่าการขนส่งสินค้า และค่าการติดต่อสื่อสาร เป็นต้น พร้อมทั้งยังทราบว่าการกิจกรรมใดเป็นกิจกรรมที่สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับการปลูกผักสลัดอีกด้วย และสามารถหาแนวทางการลดต้นทุนกิจกรรมที่ไม่เกิดคุณค่าหรือไม่เกิดประโยชน์ออกไป ส่งผลให้ต้นทุนกิจกรรมโลจิสติกส์ต่ำลง (ณัฐวุฒิ และคณะ, 2562) งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลในส่วนของทรัพยากรที่ใช้ในการผลิตและทรัพยากรที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมโลจิสติกส์ เช่น ค่าจ้างแรงงาน ค่าอุปกรณ์ในการผลิต ค่าปุ๋ย ค่าน้ำและค่าไฟ ค่าน้ำมันที่ใช้ในการขนส่ง และค่าการติดต่อสื่อสาร เป็นต้น การเก็บข้อมูลต้นทุนการปลูกผักไฮโดรโปนิิกส์และอินทรีย์ ไม่ได้ทำการเก็บข้อมูลต้นทุนคงที่ เช่น ต้นทุนโครงสร้างการลงทุน ต้นทุนระบบการปลูกผักไฮโดรโปนิิกส์และอินทรีย์ หรือค่าเสื่อมราคาของอุปกรณ์ต่าง ๆ เนื่องจากมีงานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ต้นทุนและความอ่อนไหวของธุรกิจการปลูกผักไฮโดรโปนิิกส์ในเขตกรุงเทพมหานคร (ณัฐภา และธีระวัฒน์, 2559) และการวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนการปลูกผักอินทรีย์ของเกษตรกรรายย่อยกรณีศึกษาเครือข่ายเกษตรกรตำบลท่าตำหนัก อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม (บุรัสกร, 2564) ได้ทำการศึกษาไว้แล้ว แต่ยังคงขาดข้อมูลต้นทุนผันแปรตามการดำเนินงานของกิจกรรมต่าง ๆ ซึ่งเป็นข้อมูลต้นทุนเฉพาะของผู้ประกอบการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิิกส์และอินทรีย์ในจังหวัดนครสวรรค์

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาด้านต้นทุนผันแปรตามการดำเนินกิจกรรมของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิิกส์และอินทรีย์ในจังหวัดนครสวรรค์ โดยใช้การวิเคราะห์ต้นทุนฐานกิจกรรม (Activity-based costing; ABC) เข้ามาช่วยวิเคราะห์ต้นทุน เพื่อทราบต้นทุนในแต่ละกิจกรรม (ภารดี และคณะ, 2560) และกิจกรรมไหนที่ก่อให้เกิดต้นทุนสูง จะได้หาแนวทางการแก้ไขปัญหาและการบริหารจัดการธุรกิจที่เหมาะสมแต่ละฤดูกาลเพาะปลูก เพื่อลดต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ของปลูกผักสลัดแต่ละวิธี ซึ่งช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถตั้งราคาขายที่เป็นธรรมต่อผู้ประกอบการและผู้บริโภคอีกด้วย (อาสาพห์ และสฤติเทพ, 2562) อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมผู้ประกอบการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิิกส์และอินทรีย์ ให้มีความสามารถจัดการและบริหารธุรกิจที่ยั่งยืน และแข่งขันกับผู้ประกอบการรายอื่นได้นั้น จำเป็นต้องมีการบริหารจัดการต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนทั้งหมดของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิิกส์และอินทรีย์ในแต่ละฤดูกาล ของจังหวัดนครสวรรค์

2.2 เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์การปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิิกส์และอินทรีย์ ของจังหวัดนครสวรรค์

2.3 เพื่อหาแนวทางการลดต้นทุนการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ ของจังหวัดนครสวรรค์

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรและกลุ่มตัวอย่างที่ทำการศึกษา ได้แก่ ผู้ประกอบการที่เป็นเจ้าของธุรกิจการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ในจังหวัดนครสวรรค์ และลูกจ้างในสถานประกอบการนั้น โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ที่ 1) กลุ่มผู้ประกอบการ คือ ผู้ประกอบการที่เป็นเจ้าของธุรกิจการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์ จำนวน 2 คน และผู้ประกอบการที่เป็นเจ้าของธุรกิจการปลูกผักสลัดแบบอินทรีย์ จำนวน 2 คน และ 2) ลูกจ้างรับจ้างในการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ในจังหวัดนครสวรรค์ จำนวน 6 คน โดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive sampling) เป็นการสัมภาษณ์เชิงลึก เพื่อสอบถามเกี่ยวกับสภาพทั่วไปของสถานประกอบการ การบริหารจัดการ ขั้นตอนและกิจกรรมต่าง ๆ ต้นทุนการผลิต และต้นทุนโลจิสติกส์ของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ และนำมาวิเคราะห์สรุปผล เพื่อตอบปัญหางานวิจัย ซึ่งเป็นการวิจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) (สกุรัตน์ และคณะ, 2556)

กลุ่มตัวอย่างการเก็บข้อมูลผู้ประกอบการในการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ในจังหวัดนครสวรรค์นั้น มีจำนวนน้อย เนื่องจากปัญหาสภาพแวดล้อม ที่มีอุณหภูมิสูง ในขณะที่ดำเนินงานวิจัย ผู้ประกอบการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์ ยกเลิกการประกอบกิจการไป 3 ราย จึงอาจไม่สามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ มาใช้สรุปเป็นภาพรวมของการวิเคราะห์ต้นทุนการปลูกผักสลัดทั้ง 2 วิธี ได้ แต่สามารถนำข้อมูลต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ในจังหวัดนครสวรรค์ ที่มีข้อมูลต้นทุนค่อนข้างเฉพาะเจาะจงในลักษณะของพื้นที่การเพาะปลูกแบบราบลุ่ม สภาพอากาศที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง และปริมาณน้ำน้อย มาใช้ในการพิจารณาเบื้องต้น สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลต้นทุนการปลูกผักสลัดได้กับพื้นที่ ๆ มีบริบทของพื้นที่ใกล้เคียงกันได้

3.2 การเก็บข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data) และข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data) ดังนี้

3.2.1 ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data) เป็นการเก็บข้อมูลเบื้องต้นของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ โดยการสังเกต และการสัมภาษณ์แบบมีโครงสร้าง (Structured interview) (จักรพันธ์ และคณะ, 2564) กับผู้ประกอบการและลูกจ้างในการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ ตั้งแต่กระบวนการสั่งซื้อวัตถุดิบ การผลิต การบรรจุและเก็บรักษา

การติดต่อสื่อสาร และการขนส่งสินค้าไปยังผู้บริโภค ซึ่งได้ทำการออกแบบสอบถาม นำแบบสอบถามไปทดลองประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ นำแบบสอบถามมาทดลองใช้ และปรับแก้แบบสอบถามก่อนนำไปใช้จริง

3.2.2 ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data) เป็นการรวบรวมข้อมูลจากการวิเคราะห์ข้อมูลของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ และต้นทุนฐานกิจกรรม (Activity-based costing: ABC) โดยรวบรวมจากตำรา งานวิจัย บทความวิชาการ และแหล่งข้อมูลออนไลน์ ซึ่งต้นทุนฐานกิจกรรม เป็นวิธีที่มีการกำหนดกิจกรรมหลัก และกิจกรรมย่อยของกิจกรรมโลจิสติกส์ตามความเหมาะสมของการปฏิบัติที่เกิดขึ้นจริง การกำหนดกิจกรรมไม่ควรแบ่งย่อยหรือหยาบเกินไป และสามารถปรับปรุงแก้ไขจนกว่าจะได้กิจกรรมที่เหมาะสม มีการศึกษาต้นทุนทั้งหมด จำแนกตามทรัพยากรนำเข้าในการปลูกผักสลัด เช่น ค่าจ้างแรงงาน วัสดุ อุปกรณ์ในการปลูกผักสลัด ค่าใช้จ่ายค่าใช้เกี่ยวกับพื้นที่ปลูกผักสลัด เป็นต้น จากนั้นกำหนดเกณฑ์การกระจายต้นทุนจำแนกตามทรัพยากรนำเข้าที่ใช้ในแต่ละกิจกรรม โดยนับเป็นหน่วยของกิจกรรมตามสภาพจริง และนำต้นทุนที่จำแนกตามทรัพยากรนำเข้าที่ใช้ในการปลูกผักสลัดและกระจายไปในแต่ละกิจกรรม ผลรวมที่ได้ออกมา คือ ต้นทุนกิจกรรม และนำปริมาณของแต่ละกิจกรรมมาหารต้นทุนกิจกรรม ก็จะได้ต้นทุนต่อหน่วยออกมา (ณัฐกร และคณะ, 2558) ต้นทุนฐานกิจกรรมนี้ ยังเป็นการจำแนกกิจกรรมที่เพิ่มมูลค่า และไม่เพิ่มมูลค่าในกระบวนการอีกด้วย ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์งานทางด้านโลจิสติกส์ และการลดต้นทุนต่างๆ ภายในองค์กร อีกทั้งยังช่วยให้เห็นกิจกรรมที่ก่อให้เกิดต้นทุนสูง และสามารถหาแนวทางการพัฒนาปรับปรุงการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ เพื่อบริหารจัดการต้นทุนโลจิสติกส์ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (สายฝน และระพี, 2555)

3.3 การตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล โดยงานวิจัยนี้ เป็นการวิจัยเชิงคุณภาพ ซึ่งใช้การตรวจสอบข้อมูลแบบสามเส้า (Triangulation) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องแม่นยำ น่าเชื่อถือ ป้องกันความผิดพลาดที่ได้รับข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์งานวิจัย ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะใช้การตรวจสอบความสอดคล้อง จำนวน 3 วิธี (บุษกร, 2561) ดังนี้

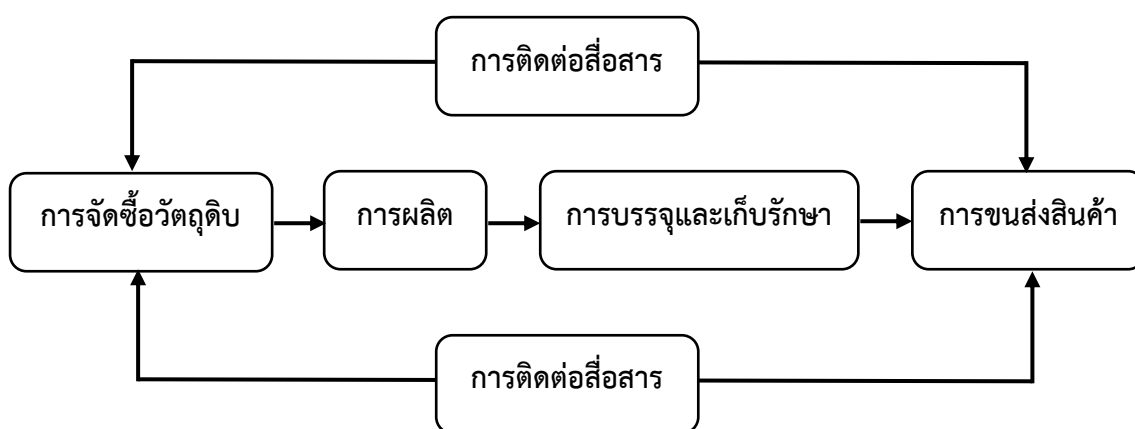
3.3.1 การตรวจสอบสามเส้าด้านข้อมูล (Data triangulate) โดยมีการเก็บข้อมูลที่มีความหลากหลายของแหล่งที่มา เช่น เก็บข้อมูลที่ฟาร์ม ที่สถานที่จัดประชุมกลุ่มย่อย ที่หน้าร้านจำหน่ายผักสลัด ในเวลาที่แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาว่ามีความแตกต่างหรือเหมือนกันของข้อมูลหรือไม่

3.3.2 การตรวจสอบสามเส้าด้านผู้วิจัย (Investigation triangulate) โดยให้ผู้วิจัยแต่ละคนรวบรวมข้อมูล จากการสัมภาษณ์และการสังเกต มาเปรียบเทียบข้อมูลว่ามีความต่างหรือเหมือนกันอย่างไร

3.3.3 การตรวจสอบสามเส้าด้านวิธีการรวบรวมข้อมูล (Methodological Triangulate) เป็นการรวบรวมข้อมูลเดียวกันในวิธีการเก็บที่หลากหลาย เช่น การสัมภาษณ์ การสังเกต และการรวบรวมจากแหล่งข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ หนังสือ บทความวิชาการ บทความวิจัย เป็นต้น เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มามีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

3.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์

3.4.1 ดำเนินการแบ่งประเภทของกิจกรรมของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิิกส์และอินทรีย์ ออกเป็น 5 กิจกรรม แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ประเภทกิจกรรมของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิิกส์และอินทรีย์

3.4.2 การวิเคราะห์และคำนวณหาต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ ที่นำวัตถุดิบหรือทรัพยากรมาใช้ในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิิกส์และอินทรีย์ ในแต่ละฤดูกาลผลิตของประเทศไทย มีทั้งหมด 3 ฤดูกาล คือ ฤดูร้อน (กลางเดือนกุมภาพันธ์ ถึงกลางเดือนพฤษภาคม) ฤดูฝน (กลางเดือนพฤษภาคม ถึง กลางเดือนตุลาคม) และฤดูหนาว (กลางเดือนตุลาคม ถึง กลางเดือนกุมภาพันธ์) (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2561) จะใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย การหาร้อยละ เป็นต้น (เจียรชัย และคณะ, 2558) จากนั้นจึงนำมาคำนวณหาต้นทุนต่อหน่วยของกิจกรรม ซึ่งการคิดต้นทุนผักสลัด คิดเป็นต้นทุนต่อกิโลกรัม แสดงดังสมการที่ 1

$$\text{ต้นทุนต่อหน่วย} = \frac{\text{ต้นทุนทั้งหมดของกิจกรรม}}{\text{ปริมาณผลผลิตทั้งหมด}} \quad (1)$$

ในการวิเคราะห์ต้นทุนนี้ จะนำเครื่องมือวิเคราะห์ต้นทุนฐานกิจกรรมเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ ทำให้ทราบสัดส่วนต้นทุนในกิจกรรมต่าง ๆ ได้อย่าง

ชัดเจนยิ่งขึ้น และเป็นจุดเริ่มต้นในการหาวิธีการปรับปรุงและลดต้นทุนในกิจกรรมที่ก่อให้เกิดต้นทุนสูงสุดได้อย่างถูกต้องอีกด้วย (สายฝน และระพี, 2555)

3.4.3 นำต้นทุนโลจิสติกส์ของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ในแต่ละฤดูกาลมาเปรียบเทียบ เพื่อหาแนวทางการบริหารจัดการที่เหมาะสม สำหรับลดต้นทุนโลจิสติกส์ในแต่ละกิจกรรมของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์

4. ผลการวิจัย

ขนาดพื้นที่เพาะปลูกและปริมาณผักสลัดที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ มีขนาดพื้นที่เพาะปลูกและปริมาณผักสลัดต่างกันค่อนข้างมากในแต่ละวิธีการปลูกผักสลัด พบว่า ไฮโดรโปนิคส์ 2 มีขนาดพื้นที่เพาะปลูกและปริมาณผักสลัด เท่ากับ 176 ตารางเมตร และ 3,000 ต้น ตามลำดับ มากกว่าไฮโดรโปนิคส์ 1 ซึ่งมีขนาดพื้นที่เพาะปลูกและปริมาณผักสลัด เท่ากับ 127 ตารางเมตร และ 1,920 ต้น ตามลำดับ ในส่วนวิธีการปลูกแบบอินทรีย์นั้น อินทรีย์ 2 มีขนาดพื้นที่เพาะปลูกและปริมาณผักสลัด เท่ากับ 400 ตารางเมตร และ 3,200 ต้น ตามลำดับ มากกว่าอินทรีย์ 1 ซึ่งมีขนาดพื้นที่เพาะปลูกและปริมาณผักสลัด เท่ากับ 55 ตารางเมตร และ 816 ต้น ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบขนาดพื้นที่เพาะปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ พบว่า การปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์ ใช้พื้นที่เพาะปลูกน้อยกว่าการปลูกผักสลัดแบบอินทรีย์ แต่ให้ปริมาณผักสลัดไม่ต่างกับการปลูกแบบอินทรีย์ ซึ่งใช้พื้นที่การเพาะปลูกผักสลัดมากกว่า แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลขนาดพื้นที่เพาะปลูกและปริมาณผักสลัดที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์

	วิธีการปลูกผักสลัด			
	ไฮโดรโปนิคส์ 1	ไฮโดรโปนิคส์ 2	อินทรีย์ 1	อินทรีย์ 2
ขนาดพื้นที่ปลูก (ตารางเมตร)	127	176	55.2	400
จำนวนผักสลัดที่ ปลูกต่อพื้นที่ทั้งหมด (ต้น)	1,920	3,000	816	3,200

อัตราการสูญเสียผักสลัด จะมีอัตราการสูญเสียมากที่สุดในฤดูร้อน ลดลงมากในฤดูฝน และต่ำสุดในฤดูหนาว เท่ากับ ร้อยละ 0-100, ร้อยละ 0-20 และ ร้อยละ 0-10 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการสูญเสียผักสลัดของวิธีการปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ พบว่า การปลูก

ผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์ 1 ไม่มีอัตราการสูญเสียของผักสลัดในแต่ละฤดูกาล ซึ่งแตกต่างจากการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์ 2 อินทรีย์ 1 และอินทรีย์ 2 ที่มีอัตราการสูญเสียผักสลัดไม่ต่างกันมากนักในฤดูฝนและหนาว แต่ฤดูร้อนนั้น ไฮโดรโปนิคส์ 2 จะมีอัตราการสูญเสียผักสลัดมากที่สุด เท่ากับร้อยละ 100 แสดงดังรูปที่ 2 เนื่องจากอุณหภูมิในอากาศและในน้ำร้อนจัด เกินกว่าค่าการเจริญเติบโตของผักสลัด และไม่มีการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยลดอุณหภูมิในอากาศและน้ำ เหมือนอย่างไฮโดรโปนิคส์ 1 ที่มีการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการควบคุมอุณหภูมิในอากาศและน้ำ ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของผักสลัด สามารถลดความเสียหายของผักสลัดในช่วงอุณหภูมิที่ร้อนจัดในฤดูร้อนลงได้ และเมื่อพิจารณาน้ำหนักและปริมาณของผักสลัดในแต่ละฤดูกาล พบว่า น้ำหนักและปริมาณของผักสลัดในฤดูหนาวสูงที่สุด ลดลงมาในฤดูฝน และต่ำสุดในฤดูร้อน มีค่าเท่ากับ 0.15-0.30 กิโลกรัมต่อต้น และ 85-384 ต้นต่อพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด, 0.10-0.25 กิโลกรัมต่อต้น และ 184-760 ต้นต่อพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด และ 0.08-0.10 กิโลกรัมต่อต้น และ 220-912 ต้นต่อพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักของผักสลัดที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ พบว่า การปลูกผักสลัดแบบอินทรีย์ ให้น้ำหนักได้ดีกว่าการปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ เนื่องจากการปลูกในดิน ผักสลัดสามารถได้รับแร่ธาตุอาหารได้ดีกว่าการปลูกในน้ำ อีกทั้งอุณหภูมิในดินเย็นกว่าในน้ำ ช่วยรักษารากของผักสลัดไม่ให้เน่าและร้อนเกินจนส่งผลต่อการเจริญเติบโตของผักสลัด อีกทั้งไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อเทคโนโลยีเข้ามาช่วยควบคุมอุณหภูมิในอากาศและน้ำเหมือนการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์อีกด้วย ในส่วนของปริมาณผักสลัดที่ได้ต่อพื้นที่ทั้งหมดนั้น ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่เพาะปลูกผักสลัดและอัตราการสูญเสียผักสลัดในแต่ละฤดูกาล

ตารางที่ 2 อัตราการสูญเสีย น้ำหนัก และปริมาณของผักสลัด ที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ ในแต่ละฤดูกาล

วิธีการปลูก	ฤดูร้อน			ฤดูฝน			ฤดูหนาว		
	อัตราการสูญเสีย	น้ำหนักของผักสลัด	ปริมาณผักสลัดทั้งหมด	อัตราการสูญเสีย	น้ำหนักของผักสลัด	ปริมาณผักสลัดทั้งหมด	อัตราการสูญเสีย	น้ำหนักของผักสลัด	ปริมาณผักสลัดทั้งหมด
	(ร้อยละ)	(กิโลกรัม/ต้น)	(กิโลกรัม/พท.ทั้งหมด)	(ร้อยละ)	(กิโลกรัม/ต้น)	(กิโลกรัม/พท.ทั้งหมด)	(ร้อยละ)	(กิโลกรัม/ต้น)	(กิโลกรัม/พท.ทั้งหมด)
	ผักสลัด/ผู้ประกอบการ			ผักสลัด/ผู้ประกอบการ			ผักสลัด/ผู้ประกอบการ		
ไฮโดรโปนิคส์ 1	0	0.08	154	0	0.10	192	0	0.15	288
ไฮโดรโปนิคส์ 2	100	-	-	20	0.10	300	0	0.15	450
อินทรีย์ 1	30	0.15	85	10	0.25	184	10	0.30	220
อินทรีย์ 2	20	0.15	384	5	0.25	760	5	0.30	912



ภาพที่ 2 การสูญเสียผักสลัดในฤดูร้อนของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์ 2

การวิเคราะห์ข้อมูลต้นทุนของผักสลัดที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ในแต่ละฤดูกาล พบว่า การปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์ 1 และ 2 ในฤดูร้อน มีต้นทุนสูงที่สุด รองลงมาในฤดูฝน และต่ำที่สุดในฤดูหนาว มีค่าเท่ากับ 128.70 และ 18,675.84 บาทต่อกิโลกรัม 101.06 และ 115.15 บาทต่อกิโลกรัม และ 69.09 และ 67.57 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3 เนื่องจากฤดูร้อนมีการสูญเสียผักสลัดค่อนข้างมาก ผักสลัดมีขนาดเล็ก แคระแกน และมีโรคพืชเกิดขึ้นค่อนข้างมาก จึงส่งผลให้จำนวนผักสลัดที่ได้ต่อกิโลกรัมมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับฤดูกาลอื่น ๆ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบไฮโดรโปนิคส์ 1 และ 2 พบว่า ในฤดูร้อนและฤดูฝน การปลูกผักสลัดของไฮโดรโปนิคส์ 1 จะมีต้นทุนที่ต่ำกว่าไฮโดรโปนิคส์ 2 ถึงแม้จะมีขนาดพื้นที่เพาะปลูกน้อยกว่า เนื่องจากไฮโดรโปนิคส์ 1 มีการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการเพาะปลูก จึงช่วยลดอัตราการสูญเสียผักสลัดลงได้ ส่งผลให้ราคาต้นทุนถูกกว่าไฮโดรโปนิคส์ 2 ซึ่งการปลูกผักในฤดูร้อนของไฮโดรโปนิคส์ 2 มีอัตราการสูญเสียผักสลัดทั้งหมด หมายความว่า ไม่มีผักสลัดออกมาขายในฤดูร้อน จึงไม่มีผลผลิตที่ออกมาใช้ในการหารต้นทุนทั้งหมดของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์ 2 ต้นทุนต่อหน่วยจึงสูงมาก ในส่วนของฤดูหนาวนั้น ไฮโดรโปนิคส์ 2 ไม่มีการสูญเสียผักสลัด ส่งผลให้มีต้นทุนการปลูกผักสลัดต่ำกว่าไฮโดรโปนิคส์ 1 เนื่องจากมีขนาดพื้นที่เพาะปลูกใหญ่กว่า ปริมาณผักสลัดมากกว่า ต้นทุนต่อหน่วยจึงต่ำกว่า

การวิเคราะห์ข้อมูลต้นทุนของผักสลัดที่ปลูกแบบอินทรีย์ในแต่ละฤดูกาล พบว่า การปลูกผักสลัดแบบอินทรีย์ 1 และ 2 มีต้นทุนสูงที่สุดในฤดูร้อน รองลงมาในฤดูฝน และต่ำที่สุดในฤดูหนาว มีค่าเท่ากับ 127.97 และ 75.81 บาท/กิโลกรัม 63.35 และ 42.69 บาท/กิโลกรัม และ 52.53 และ 35.14 บาท/กิโลกรัม ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4 ต้นทุนการปลูกผักสลัดของอินทรีย์ 1 มีต้นทุนสูงกว่าอินทรีย์ 2 เนื่องจากอินทรีย์ 1 มีปริมาณผักสลัดที่ได้น้อยกว่าอินทรีย์ 2 ส่งผลให้ต้นทุนผลผลิตโดยรวมต่อหน่วยมีราคาสูงกว่า

ตารางที่ 3 ต้นทุนการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์ในแต่ละฤดูกาล

กิจกรรม	ต้นทุนการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์					
	(บาท/กิโลกรัม)					
	ฤดูร้อน		ฤดูฝน		ฤดูหนาว	
	ไฮโดรโปนิคส์ 1	ไฮโดรโปนิคส์ 2	ไฮโดรโปนิคส์ 1	ไฮโดรโปนิคส์ 2	ไฮโดรโปนิคส์ 1	ไฮโดรโปนิคส์ 2
ต้นทุนการผลิต						
1. วัตถุดิบ	48.36	23.64	36.27	17.73	24.18	11.82
2. แรงงาน	58	18,000	47	75	31	40
รวมต้นทุนการผลิต	106.36	*18,023.64	83.27	92.73	55.18	51.82
ต้นทุนโลจิสติกส์						
1. การจัดซื้อวัตถุดิบ	4.78	262.50	3.58	1.21	2.56	0.80
2. การบรรจุและเก็บรักษา	4.16	-	4.16	4.37	4.16	3.72
3. การขนส่ง	11.67	-	8.75	15.54	6.25	10.36
4. การติดต่อสื่อสาร	1.73	389.70	1.30	1.30	0.93	0.87
รวมต้นทุนโลจิสติกส์	22.34	*652.20	17.79	22.42	13.90	15.75
รวมต้นทุนทั้งหมด	128.70	*18,675.84	101.06	115.15	69.09	67.57

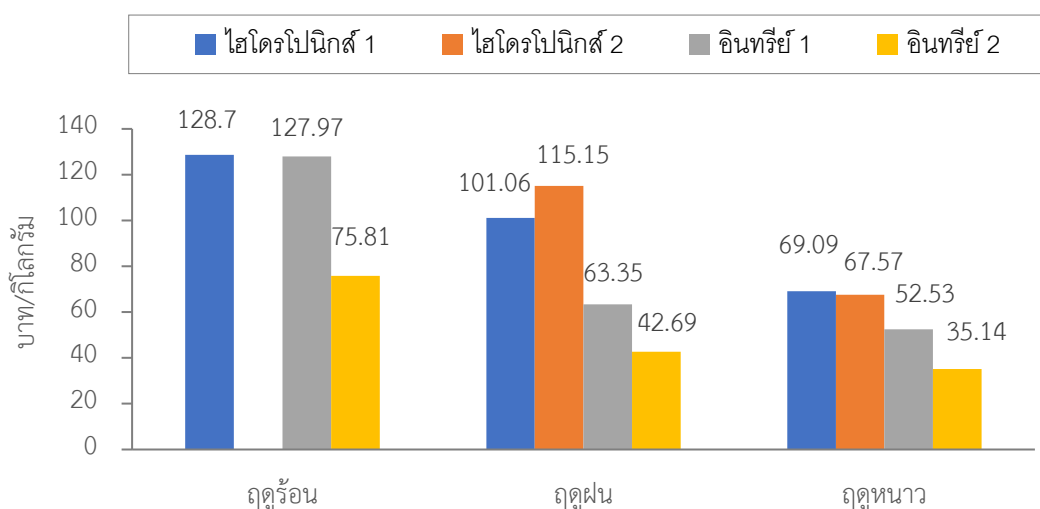
* หมายเหตุ ไฮโดรโปนิคส์ 2 มีอัตราการสูญเสียผักสลัดทั้งหมดในฤดูร้อน

ตารางที่ 4 ต้นทุนการปลูกผักสลัดแบบอินทรีย์ในแต่ละฤดูกาล

กิจกรรม	ต้นทุนการปลูกผักสลัดแบบอินทรีย์					
	(บาท/กิโลกรัม)					
	ฤดูร้อน		ฤดูฝน		ฤดูหนาว	
	อินทรีย์ 1	อินทรีย์ 2	อินทรีย์ 1	อินทรีย์ 2	อินทรีย์ 1	อินทรีย์ 2
ต้นทุนการผลิต						
1. วัตถุดิบ	14.70	15.18	9.92	10.12	7.44	7.59
2. แรงงาน	106	46	49	24	41	20
รวมต้นทุนการผลิต	120.70	61.18	58.92	34.12	48.44	27.59
ต้นทุนโลจิสติกส์						
1. การจัดซื้อวัตถุดิบ	1.76	0.60	0.82	0.30	0.68	0.25

2. การบรรจุและเก็บรักษา	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40
3. การขนส่ง	1.55	10.28	0.72	5.19	0.60	4.33
4. การติดต่อสื่อสาร	1.06	1.35	0.49	0.68	0.41	0.57
รวมต้นทุนโลจิสติกส์	7.27	14.63	4.43	8.57	4.09	7.55
รวมต้นทุนทั้งหมด	127.97	75.81	63.35	42.69	52.53	35.14

การเปรียบเทียบต้นทุนการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ในแต่ละฤดูกาล แสดงดังภาพที่ 3 พบว่า ในฤดูร้อน มีต้นทุนการปลูกผักสลัดสูงที่สุด รองลงมา คือ ฤดูฝน และต่ำที่สุด คือ ฤดูหนาว การปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์มีต้นทุนการปลูกที่สูงกว่าการปลูกแบบอินทรีย์

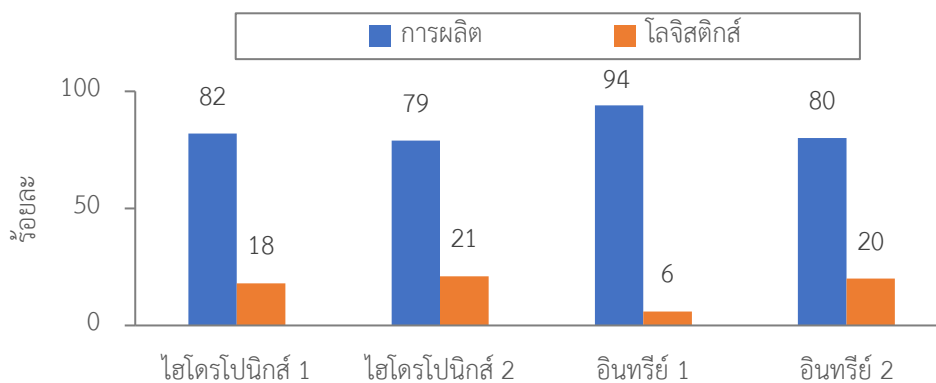


ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบต้นทุนการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ในแต่ละฤดูกาล

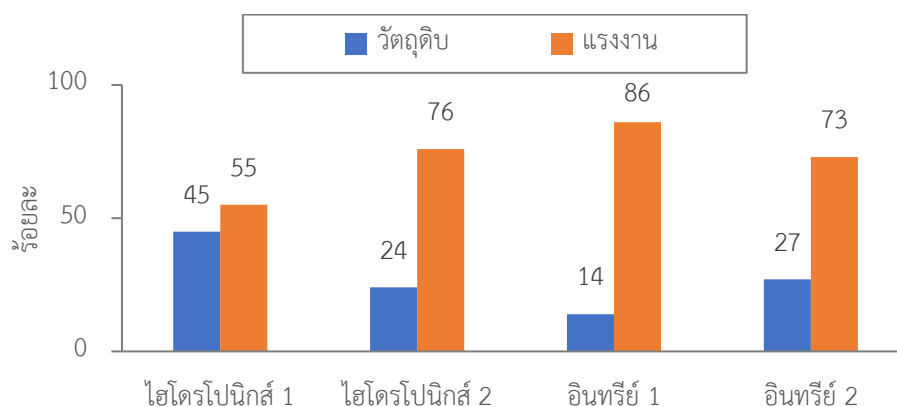
จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ในแต่ละฤดูกาล ตามตารางที่ 3 และ 4 พบว่า การปลูกผักสลัดทั้ง 2 วิธี มีต้นทุนการผลิตสูงกว่าต้นทุนโลจิสติกส์ โดยที่ไฮโดรโปนิคส์ 1 ไฮโดรโปนิคส์ 2 อินทรีย์ 1 และอินทรีย์ 2 มีต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ เท่ากับ ร้อยละ 82 ต่อ 18 ร้อยละ 79 ต่อ 21 ร้อยละ 94 ต่อ 6 และ ร้อยละ 80 ต่อ 20 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4 เมื่อวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต พบว่า ต้นทุนการผลิต มีร้อยละของสัดส่วนต้นทุนเฉลี่ยประมาณ ร้อยละ 80 ของต้นทุนรวมทั้งหมด ส่วนต้นทุนโลจิสติกส์ มีร้อยละของสัดส่วนต้นทุนเฉลี่ยประมาณ ร้อยละ 20 ของต้นทุนรวมทั้งหมด ซึ่งต้นทุนการผลิตมีร้อยละสัดส่วนต้นทุนสูงกว่าต้นทุนโลจิสติกส์ มีสาเหตุมาจากต้นทุนแรงงานที่มีสัดส่วนสูงกว่าต้นทุน

วัตถุดิบ โดยต้นทุนวัตถุดิบและต้นทุนแรงงานของไฮโดรโปนิกส์ 1 ไฮโดรโปนิกส์ 2 อินทรีย์ 1 และ อินทรีย์ 2 คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ เท่ากับ ร้อยละ 45 ต่อ 55 ร้อยละ 24 ต่อ 76 ร้อยละ 14 ต่อ 86 และ ร้อยละ 27 ต่อ 73 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 5 เนื่องจากผู้ประกอบการทุกราย มีการจ้างแรงงานแบบเหมาจ่ายรายเดือน ไม่คิดค่าจ้างเป็นรายชั่วโมง จึงส่งผลให้ค่าจ้างแรงงานสูงมาก ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนให้แก่การปลูกผักสลัด

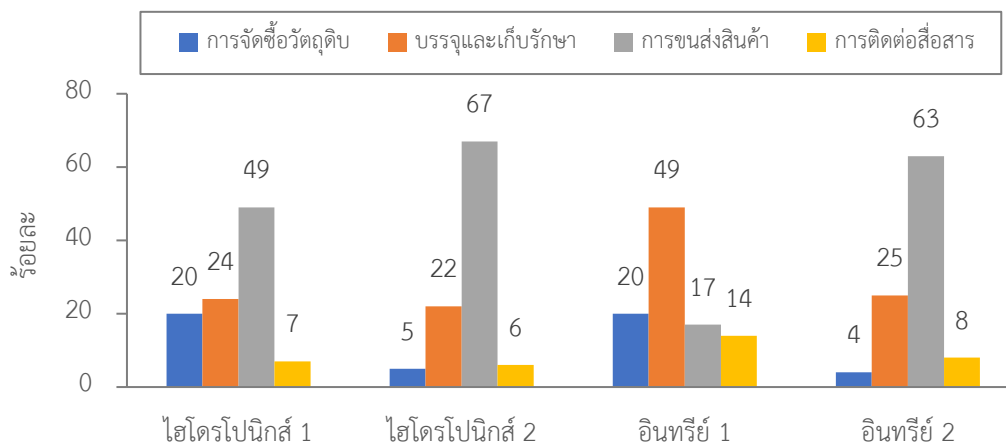
ในส่วนต้นทุนโลจิสติกส์ เมื่อคิดเป็นร้อยละของสัดส่วนต้นทุนทั้งหมดนั้น มีค่าเฉลี่ยประมาณ ร้อยละ 20 ของต้นทุนรวมทั้งหมด และกิจกรรมโลจิสติกส์ที่มีต้นทุนสูงที่สุด คือ การขนส่ง ต้นทุนกิจกรรมโลจิสติกส์ที่มีค่าต่ำลงมา คือ ต้นทุนการบรรจุและเก็บรักษา การจัดซื้อวัตถุดิบ และการติดต่อสื่อสารของการบรรจุและเก็บรักษา ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบร้อยละของสัดส่วนต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์



ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบร้อยละของสัดส่วนต้นทุนแต่ละกิจกรรมการผลิต



ภาพที่ 6 การเปรียบเทียบร้อยละของสัดส่วนต้นทุนแต่ละกิจกรรมโลจิสติกส์

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 การปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ในแต่ละฤดูกาล มีต้นทุนสูงที่สุดในฤดูร้อน และต่ำสุดในฤดูหนาว เนื่องจากผักสลัดที่ได้ในฤดูร้อน มีขนาดค่อนข้างเล็กกว่าฤดูฝนและฤดูหนาว ซึ่งฤดูหนาวจะให้ผลผลิตที่มีขนาดดีที่สุดและมีอัตราการสูญเสียผักสลัดน้อยที่สุด ถ้าขนาดของผักสลัดเล็ก จะส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณผักสลัดต่อกิโลกรัมมาก ซึ่งผักสลัดแต่ละต้นมีต้นทุนการผลิตนั้นหมายความว่า ถ้าผักสลัดมีปริมาณต่อกิโลกรัมมาก ส่งผลให้ต้นทุนผักสลัดต่อกิโลกรัมมากขึ้นตามไปด้วย อัตราการสูญเสียผักสลัดในฤดูร้อนมีมากกว่าในฤดูกาลอื่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบของการปลูกผักสลัดเป็นสำคัญ ถ้าระบบการปลูกผักสลัดมีประสิทธิภาพที่ดี มีการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยควบคุมอุณหภูมิจากสภาพอากาศและน้ำให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของผักสลัด และเข้ามาช่วยในการเพาะปลูก จะส่งผลให้ลดอัตราการสูญเสียของผักสลัดลงได้ รวมถึงการปลูกผักสลัดแบบอินทรีย์ ถ้ามีการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการผลิต หรือมีการเตรียมดินก่อนการเพาะปลูก ก็สามารถลดอัตราการสูญเสียผักสลัดลงได้เช่นกัน

การปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์ มีต้นทุนรวมทั้งหมดสูงกว่าการปลูกผักสลัดแบบอินทรีย์ เนื่องจากการปลูกผักไฮโดรโปนิคส์ มีค่าใช้จ่ายในการซื้อวัตถุดิบเข้ามาใช้ในการผลิตค่อนข้างมาก แตกต่างจากการปลูกผักสลัดแบบอินทรีย์ที่วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตส่วนมากจะผลิตเอง จึงส่งผลให้ต้นทุนรวมทั้งหมดต่ำกว่าการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์ ต้นทุนรวมทั้งหมดของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ ค่าใช้จ่ายสูงสุดมาจากค่าจ้างแรงงาน ประมาณร้อยละ 70 ของต้นทุนทั้งหมด การคิดค่าจ้างแรงงานของผู้ประกอบการทุกรายเป็นการจ้างแรงงานแบบเหมาจ่ายรายเดือน ซึ่งการจ้างแรงงานแบบเหมาจ่ายรายเดือนนี้ ไม่คุ้มค่างานที่ทำได้จริง ส่งผลให้ต้นทุนรวม

ทั้งหมดของการปลูกผักสลัดทั้ง 2 วิธี มีค่าสูงเกินกว่าราคาขาย แต่ถ้าปรับเปลี่ยนค่าจ้างแรงงานตามจำนวนชั่วโมงการดำเนินงานกิจกรรมการปลูกผักสลัด จะทำให้ค่าจ้างแรงงานลดลง

ผู้ประกอบการรายใดที่มีกำลังการผลิตสูง จะส่งผลให้ต้นทุนรวมทั้งหมดของการปลูกผักสลัดต่ำ เนื่องจากมีต้นทุนต่อหน่วยต่ำ

5.2 ต้นทุนโลจิสติกส์ของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ มีต้นทุนโลจิสติกส์ประมาณร้อยละ 20 ของต้นทุนรวมทั้งหมด มีค่าใกล้เคียงกับต้นทุนวัตถุดิบ โดยกิจกรรมโลจิสติกส์ที่มีต้นทุนสูงที่สุด คือ การขนส่ง ส่วนต้นทุนการบรรจุและเก็บรักษา มีต้นทุนต่ำลงมาจากต้นทุนการขนส่งไม่มากเมื่อเทียบกับต้นทุนการจัดซื้อวัตถุดิบและการติดต่อสื่อสาร ซึ่งต้นทุนมีค่าต่ำใกล้เคียงกัน ต้นทุนการขนส่งที่สูงนั้น มีสาเหตุมาจากการที่ผู้ประกอบการไม่มีการวางแผนส่วนประสมทางการตลาด และการแบ่งสัดส่วนการขายผักสลัดให้แก่ลูกค้าแต่ละประเภท อีกทั้งไม่มีการวางแผนกำหนดรอบเวลาและเส้นทางการขนส่งอีกด้วย

5.3 แนวทางการลดต้นทุนโลจิสติกส์ของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ มีดังนี้

5.3.1 ควรยกเลิกการปลูกผักสลัดในช่วงฤดูร้อน เนื่องจากต้นทุนการปลูกผักสลัดในฤดูร้อนมีค่าสูงเกินกว่าราคาขายให้แก่ผู้บริโภค จึงส่งผลให้รายรับน้อยกว่ารายจ่าย ไม่คุ้มค่าต่อการปลูก และควรเพิ่มคุณค่าให้แก่ผักสลัด เช่น การทำสลัดโรล สลัดเพื่อสุขภาพ การตกแต่งเมนูอาหาร หรือการนำมาขายเป็นของขวัญ จะช่วยเพิ่มรายรับให้แก่ผู้ประกอบการได้อีกด้วย และเป็นการนำผักสลัดที่ไม่ได้คุณภาพมาใช้ในการเกิดประโยชน์ ลดการทิ้งผักสลัดที่ไม่ได้คุณภาพลงไป

5.3.2 ควรมีการส่งเสริมให้ผู้ประกอบการมีการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการผลิต และขยายกำลังการผลิตเพิ่มมากขึ้น จะช่วยให้ต้นทุนการปลูกผักสลัดต่ำลง ประกอบกับผักสลัดเป็นที่นิยมและต้องการของคนรักสุขภาพ อีกทั้งรัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมการปลูกผักปลอดสารพิษเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณผักสลัดที่ไ้ยังมีปริมาณไม่เพียงพอต่อผู้บริโภค และแหล่งรับซื้อสินค้าใหญ่ ๆ เช่น โรงพยาบาล โรงแรม ห้างสรรพสินค้า ร้านอาหาร เป็นต้น

5.3.3 ควรมีการวางแผนการจัดซื้อวัตถุดิบที่เข้ามาใช้ในการผลิต หรือผลิตวัตถุดิบที่ใช้ในการปลูกผักสลัดขึ้นมาเอง เพื่อเป็นการลดต้นทุนการจัดซื้อสินค้า และควรมีการวางแผนการจัดส่งสินค้าเส้นทางการจัดส่งสินค้าแก่ผู้บริโภค หรือกำหนดให้ผู้บริโภคมาซื้อสินค้าด้วยตนเอง เพื่อลดต้นทุนการขนส่งสินค้าอีกด้วย

5.4 กลุ่มตัวอย่างการเก็บข้อมูลผู้ประกอบการในการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ ในจังหวัดนครสวรรค์นั้น มีจำนวนน้อย เนื่องจากปัญหาสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูกผักสลัด เช่น อุณหภูมิของสภาพการเพาะปลูกที่สูง อุณหภูมิที่น้ำสูงไม่เหมาะต่อการเจริญเติบโตของผักสลัด และ

ปริมาณน้ำน้อย จึงทำให้ผู้ประกอบการยกเลิกการเพาะปลูกผักสลัดค่อนข้างเยอะ และอาจไม่สามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ มาใช้สรุปเป็นภาพรวมของการวิเคราะห์ต้นทุนการปลูกผักสลัดทั้ง 2 วิธีได้ แต่สามารถนำข้อมูลต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ของการปลูกผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ในจังหวัดนครสวรรค์ ที่มีข้อมูลต้นทุนค่อนข้างเฉพาะเจาะจงในลักษณะของพื้นที่การเพาะปลูกผักสลัดในสภาพพื้นที่ราบลุ่ม สภาพอากาศที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง และปริมาณน้ำน้อย มาใช้ในการพิจารณาเบื้องต้น สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลต้นทุนการปลูกผักสลัดได้กับพื้นที่ ๆ มีบริบทของพื้นที่ใกล้เคียงกันได้

6. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี เนื่องจากได้รับทุนสนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) ประจำปีงบประมาณ 2561 และคำแนะนำ ข้อคิดเห็น และข้อสังเกตจากผู้ทรงคุณวุฒิที่ช่วยในการตรวจสอบข้อมูลงานวิจัย และขอขอบคุณผู้ประกอบการผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์และอินทรีย์ที่ให้ข้อมูลและพื้นที่ในการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2565). ฤดูกาลของประเทศไทย. **หนังสืออุตุนิยมวิทยา**. ค้นจาก <https://www.tmd.go.th>
- กุลบัณฑิต แสงดี, วิญญู ปรอยกระโทก, สุภาวดี สายสนิท, เฉลียว บุตรวงษ์, และรัฐยา พรหมหิตาทร. (2558). แนวทางการลดต้นทุนโลจิสติกส์ในการผลิตหัวมันสำปะหลังสด กรณีศึกษาชุมชนบ้านหนองกก ตำบลทัพราช อำเภอตาพระยา จังหวัดสระแก้ว. **วารสารวิจัยและพัฒนาวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์**, 10(3), 213-225.
- ศรีสุพรรณ หนูพรหม. (2558). การผลิตผักอินทรีย์. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 23(6) (พิเศษ), 955-969.
- จักรพันธ์ ปิ่นทอง, วิภาณันท์ เอียประเสริฐ, และสุริพร มีหอม. (2564). การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ของอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือด้วยวิธีต้นทุนฐานกิจกรรม. **วารสารวิชาการสมาคมสถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย (สสอท.)**, 10(1), 32-38.



- ชวิศา ตงศิริ. (2563). **การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนของการปลูกผักเกษตรอินทรีย์ ปลอดภัย และใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืช**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี.
- ณัฐกร เจริญชีวะกุล, แสงจันทร์ กันตะบุตร, และพรวิมล ศิริสวัสดิ์. (2558). การศึกษาเปรียบเทียบ ต้นทุนโลจิสติกส์ในโซ่อุปทานของโรงงานผลิตน้ำดื่มบรรจุขวดและโรงงานผลิตน้ำแร่บรรจุขวด. **วารสารวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย**, 10(1), 66-92.
- ณัฐภูมิ คำสอน, ชัยยศ สัมฤทธิ์สกุล, กุลชญา แวนแก้ว, และจิรายุ หาญตระกูล. (2562). **การวิเคราะห์ต้นทุนกิจกรรมโลจิสติกส์ของกิจการการผลิตและจำหน่ายอิฐบล็อก ในอำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่**. การประชุมเชิงวิชาการระดับชาติด้านบริหารธุรกิจ ครั้งที่ 6, มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่, 728-735.
- ณัฐิกา สุทธิประสิทธิ์ และธีระวัฒน์ จันทิก. (2559). การวิเคราะห์ต้นทุนและความอ่อนไหวของธุรกิจ การปลูกผักไฮโดรโปนิคส์ ในเขตกรุงเทพมหานคร. **วารสารฉบับภาษาไทย สาขามนุษยศาสตร์ สังคมศาสตร์ และศิลปะ**, 9(2), 1627-1638.
- เอียรชัย พันธคง, จตุรภัทร จันทร์ทิพย์, และแก้วกนิต สุวรรณอ่อน. (2558). การวิเคราะห์ต้นทุน ผลตอบแทน และประสิทธิภาพการผลิตผักปลอดภัยจากสารพิษ ในตำบลบางเหริย อำเภอกวนเจียง จังหวัดสงขลา. **วารสารศรีนครินทรวิโรฒวิจัยและพัฒนา (สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์)**, 7(13), 63-70.
- บุญทวรรณ วิงวอน, ชัยยุทธ เลิศพาชิน, และชจรศักดิ์ วงศ์วิราช. (2554). **การจัดการห่วงโซ่อุปทานของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผักปลอดภัยของอำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง**. การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ แม่โจ้-แพรววิจัย ครั้งที่ 2, 533-540.
- บุรสรณ์ ตรีรัตน์. (2564). การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนการปลูกผักอินทรีย์ของเกษตรกรรายย่อย กรณีศึกษาเครือข่ายเกษตรกรตำบลท่าตำหนัก อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม. **วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี**, 10(2), 59-71.
- บุษกร เขียวจินดาภานต์. (2561). เทคนิคการวิจัยเชิงคุณภาพแบบกรณีศึกษา. **วารสารศิลปศาสตร์ปริทัศน์**, 13(25), 103-118.
- ภาวดี นึกชอบ, กุลบัณฑิต แสงดี, วิญญู ปรอยกระโทก, เฉลียว บุตรวงษ์, ดวงมณี ชักนำ, ศิริพร จิระชัยประสิทธิ์, และโกสินทร์ แสงสงค์. (2560). การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ของกลุ่มเกษตรกรผู้ผลิตผักหวานป่าที่ได้รับรองการปฏิบัติทางการเกษตรที่ดีสำหรับพืช จังหวัดสระบุรี. **วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์**, 12(3), 249-261.

- สกุลรัตน์ ธรรมแสง. (2556). การบริหารธุรกิจผักไฮโดรโปนิคส์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและการพัฒนาเชิงอุตสาหกรรม. **วารสารวิจัย มข. มส. (บศ.)**, 1(1), 54-63.
- สายฝน คงประเวศ, และระพี กาญจนะ. (2555). การทบทวนวรรณกรรมการวิเคราะห์ต้นทุนโลจิสติกส์ด้วยวิธีต้นทุนตามฐานกิจกรรม. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 2168-2176.
- อรพรรณ ศรีแสง, รวิพิมพ์ ฉวีสุข, ระวี สุวรรณเดโชไชย, และพริภา องค์คุณรักษ์. (2553). การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและต้นทุนโลจิสติกส์ของการเลี้ยงกุ้งขาวในประเทศไทย. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48: สาขาอุตสาหกรรมเกษตร, กรุงเทพมหานคร, 18-26.
- อาสาฬห์ อดตาลกาญจนา, และสสิตเทพ สังข์ทอง. (2562). การจัดการธุรกิจผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์ที่ปลูกนอกเขตอำเภอเมืองนครสวรรค์. การประชุมเชิงวิชาการระดับชาติด้านบริหารธุรกิจ ครั้งที่6, มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่, 846-857.
- อาสาฬห์ อดตาลกาญจนา, และสสิตเทพ สังข์ทอง. (2562). การจัดการโลจิสติกส์ของผักสลัดแบบไฮโดรโปนิคส์ที่ปลูกนอกเขตอำเภอเมืองนครสวรรค์. การประชุมเชิงวิชาการระดับชาติด้านบริหารธุรกิจ ครั้งที่6, มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่, 858-867.



การออกแบบและพัฒนารถขนส่งวัสดุอัตโนมัติราคาถูก

สำหรับขนส่งวัสดุระหว่างกระบวนการผลิต

DESIGN AND DEVELOPMENT OF LOW-COST AUTOMATED GUIDED VEHICLE FOR TRANSPORTING PRODUCT BETWEEN THE PRODUCTION PROCESS

นพรุจ เขียวนาค*, สมมาตร พรหมพุดม

Nopparut Khaewnak*, Sommart Prompt

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ

อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ประเทศไทย 20110

School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, BangPhra Campus,

Sriracha, Chon Buri, Thailand, 20110

*Corresponding author e-mail: nopparut_kh@mutto.ac.th

วันที่เข้าระบบ 8 มีนาคม 2565

วันที่แก้ไขบทความ 25 เมษายน 2565

วันที่ตอบรับบทความ 26 เมษายน 2565

บทคัดย่อ

กระบวนการผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่พบว่า เป็นลักษณะแยกกระบวนการออกเป็นแบบย่อยๆ จะมีการขนส่งวัสดุอุปกรณ์จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งต่อไป โดยในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติราคาถูกสำหรับการใช้งานขนส่งวัสดุในกระบวนการผลิตของแต่ละกระบวนการ ขนาดภาระโหลดไม่เกิน 10 กิโลกรัม และได้ออกแบบจากชุดต้นกำลังที่เป็นของสเต็ปป์มอเตอร์ โดยใช้อาร์ดิวโนพร้อมกับเซ็นเซอร์ควบคุมการทำงานของรถขนส่งวัสดุในโรงงานวิ่งตามเส้นและสามารถควบคุมผ่านแอปพลิเคชันด้วยบอร์ด NodeMCU พบว่าสเต็ปป์มอเตอร์ที่เลือกใช้มีแรงเพียงพอกับการรับแรงของตัวรถในการเคลื่อนที่โดยใช้แอปพลิเคชันในการสั่งให้รถวิ่งจากจุดออกรถไปลากจูงกระบะทุกด้วยความเร็ว 1.344 กิโลเมตร/ชั่วโมง รถสามารถวิ่งส่งวัสดุในบริเวณที่กำหนดได้ตรงจุด เมื่อมีผู้เรียกใช้ผ่านแอปพลิเคชัน ระหว่างทางหากมีคนหรือสิ่งกีดขวางแนวทางการเดินของรถ รถจะหยุดหากนำสิ่งที่ขวางทางออกรถจะสามารถวิ่งต่อไปได้

คำสำคัญ: รถขนส่งวัสดุอัตโนมัติ, อาร์ดิวโน, เซ็นเซอร์, สเต็ปป์มอเตอร์, แอปพลิเคชัน

Abstract

Most of the manufacturing processes in Thailand are characterized as separate processes. Supplies are transported from the starting location to the next location. This paper presents the design and development of a low-cost Automated Guided Vehicle (AGV) for supply transporting during each production process. The size of load does not exceed 10 kilograms and the AGV is designed from the concept of a power unit of a stepping motor. It uses an Arduino with sensors to control its operation along the running track in the factory. Moreover, it can be controlled via an application with NodeMCU board. The results reveal that the chosen stepping motor has enough power to handle the load of the vehicle and to move by sending a command from the application to the vehicle to run from the departure location to tow a pickup car at a speed of 1.344 km/hr. The AGV can transport supplies to the designated location when someone commands via the application. In-between destination, if someone or something is in the way and blocks the route, the vehicle will be stopped, and when there is nobody and nothing obstructing its route, the vehicle can continue running.

Keywords: Automated guided vehicle, Arduino, Sensor, Stepping motor, Application

1. บทนำ

โดยปกติแล้ว การเคลื่อนย้ายวัสดุและจัดเก็บจะเป็งานที่ไม่คุ้มค่าเวลาทางธุรกิจเลย ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนย้ายวัสดุและจัดเก็บไม่ก่อให้เกิดคุณค่าของงาน และกลับเป็ต้นทุนทางธุรกิจ จึงมีความพยายามเรื่อยมาที่จะพัฒนาระบบเคลื่อนย้ายวัสดุและจัดเก็บแบบอัตโนมัติเพื่อลดต้นทุนดังกล่าว ความเป็นไปได้ที่จะนำเอาวิธีการเคลื่อนย้ายวัสดุแบบอัตโนมัติมาใช้ได้มากน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับเส้นทางของการเคลื่อนย้ายวัสดุว่ามีการแปรเปลี่ยนไปบ่อยครั้งเพียงใด หากว่าการแปรเปลี่ยนไปบ่อยครั้งมาก การใช้ระบบเคลื่อนย้ายแบบอัตโนมัติทำได้ยาก โดยมากจะใช้มนุษย์เข้าควบคุมเครื่องจักรหรือยานพาหนะแทน เมื่อเส้นทางของการเคลื่อนย้ายวัสดุนั้นค่อนข้างคงที่แน่นอนแล้ว ระบบอัตโนมัติสามารถเข้ามาแทนที่ได้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนี้มีพาหนะขนส่งแบบนำทางอัตโนมัติที่สามารถใช้ได้กับเส้นทางของการเคลื่อนย้ายวัสดุที่แปรเปลี่ยนไปได้พาหนะดังกล่าวนี้เรียกว่า พาหนะขนส่งแบบนำทางอัตโนมัติ หรือ Automated guided vehicle (AGV) (สรรเพชญ, 2554) และอุตสาหกรรมในอุตสาหกรรมไทยได้เริ่มใช้ระบบสินเข้ามาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมมากขึ้น ในระบบสินในการผลิตการจำแนกความสูญเสียเปล่าตามแนวทางของ Taiichi Ohno (รัตติยา และชุมพล, 2555) ที่กล่าวถึงความสูญเสียเปล่าที่ไม่ก่อให้เกิดคุณค่าต่อลูกค้าได้ดังนี้

1. ความสูญเสียที่เกิดจากการผลิตมากเกินไป (Overproduction)
2. ความสูญเสียจากการรอคอย (Waiting)
3. ความสูญเสียจากกระบวนการผลิตที่ไม่เหมาะสม (Inappropriate processing)
4. ความสูญเสียจากการเคลื่อนไหวที่ไม่เหมาะสม
5. ความสูญเสียจากสินค้าคงคลังที่มากเกินไป (Excess inventory)
6. ความสูญเสียจากการขนส่ง (Transportation)
7. ความสูญเสียจากข้อบกพร่อง (Defect)

แนวโน้มของระบบการผลิตของอุตสาหกรรมในปัจจุบันจะปรับเปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อมของโลกที่เปลี่ยนไปหรือตามเทคโนโลยีที่ทันสมัยจึงส่งผลให้อุตสาหกรรมต้องมีการปรับเปลี่ยนระบบการผลิตเพื่อผลิตสินค้าให้ทันกับความต้องการของลูกค้าที่มีมากขึ้นและคำนึงถึงต้นทุนในการดำเนินงานที่สูงขึ้นในปัจจุบัน เช่น ต้นทุนวัตถุดิบ ต้นทุนสินค้าคงคลัง ต้นทุนขนส่ง ต้นทุนด้านทรัพยากร เป็นต้น ทำให้อุตสาหกรรมส่วนใหญ่ต้องหาเทคนิคหรือวิธีการเข้ามาช่วยลดต้นทุนเหล่านี้ (อลงกรณ์ และขวัญนิธิ, 2560) การจัดเซลล์การผลิตแบบเซลล์ลูลาร์ (Cellular manufacturing system; CMS) เป็นอีกวิธีการหนึ่งของการวางแผนการผลิตที่จะช่วยให้ระบบการผลิตเกิดความยืดหยุ่นมากขึ้น สามารถปรับเปลี่ยนสายการผลิตเพื่อรองรับกับการผลิตสินค้า ตามกลุ่มชิ้นงานเดียวกันให้ใช้เครื่องจักรกลุ่มเดียวกัน กลุ่มเครื่องจักรเรียก “เซลล์” (Cell) (รติพล, 2559) การจัดลำดับกลุ่มเทคนิคเฉพาะที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของการผลิต มีประสิทธิภาพและง่ายด้วยการใช้อัลกอริทึมสำหรับการจัดกลุ่มเครื่องจักรแบบเซลล์อัลกอริทึมขึ้นอยู่กับการจัดเรียงแถวและคอลัมน์ของเมทริกซ์เครื่องจักรและชิ้นงาน สำหรับการสูญเสียเวลาและคนจากการผลิตระหว่างการผลิตชิ้นส่วนในเพื่อนำไปประกอบโดยใช้รถขนส่งอัตโนมัติ อดีตการขนย้ายวัสดุอุปกรณ์ระหว่างเครื่องจักรนั้นเป็นการขนย้ายแบบระบบราง สายพานลำเลียง จะอยู่ในระยะที่สั้น อยู่ระหว่างเครื่องจักรเท่านั้น หรือใช้สำหรับกระบวนการที่ไม่ได้ถูกการปรับเปลี่ยนเท่านั้น การใช้รถขนส่งอัตโนมัตินั้นใช้ในระยะเวลาทางที่ไกล และเป็นเส้นทางที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ รถขนส่งอัตโนมัติเหมาะสมกับกระบวนการผลิตที่รถสามารถวิ่งเป็นวงกลมและสามารถกลับมาที่เดิม เรียกจากตำแหน่งที่ต้องการได้ มีลักษณะคล้ายอุปกรณ์ประเภทรถ Fork lift ความแตกต่างอยู่ที่รถ AGV จะถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์และถูกกำหนดเส้นทางในการขนส่งที่ชัดเจน โดยไม่จำเป็นต้องใช้แรงงานคนในการควบคุม การเลือกใช้อุปกรณ์ประเภทรถ AGV ต้องติดตั้งเส้นทางวิ่งของรถ AGV มีการฝังสายไฟไว้ใต้พื้น โรงงานตามเส้นทางวิ่งของรถ AGV การควบคุมรถ AGV สามารถควบคุมได้ทีละหลาย ๆ คันโดยใช้คำสั่งในการควบคุมเพียงชุดเดียว และให้รถ AGV แต่ละคันสามารถสื่อสารถึงกันได้ เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของรถ AGV หรือเพื่อป้องกันการกีดขวางการจราจรหากมีรถ AGV อีกคันจอดขวางอยู่ในจุดรับส่งวัสดุ (ลีลาวดี, 2560) โดยประเภทของการใช้งานรถ AGV สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทได้แก่ ประเภทระบบลำเลียง

แบบโซ่ใช้สำหรับขนย้ายพาเลท ประเภทระบบลำเลียงแบบลูกกลิ้งใช้สำหรับขนย้ายพาเลท ประเภท
โพล์ใช้สำหรับยก/วาง ระหว่างพื้นและอุปกรณ์ลำเลียง ประเภทขนย้ายม้วนวัสดุใช้สำหรับขนย้าย
ม้วนวัสดุไป/มา ระหว่างเครื่องจักร ประเภทบรรทุกใช้สำหรับลากจูงโดยจะวางอยู่ข้างใต้รถเข็น/รถ
ลาก ประเภทลากจูงใช้เป็นพาหนะลากจูงรถเข็น (คล้ายรถไฟ) สามารถใช้เป็นแบบอัตโนมัติหรือ
พนักงานบังคับก็ได้ แล้วแต่วัตถุประสงค์ ประเภท Mini-load เหมาะสำหรับการจัดส่งชิ้นส่วนอุปกรณ์
ไปยังโรงประกอบ (ลีลาวดี, 2560) รูปภาพประกอบด้านล่างตามลำดับ



ภาพที่ 1 ประเภทระบบลำเลียงแบบโซ่
(ลีลาวดี, 2560)



ภาพที่ 2 ประเภทระบบลำเลียงแบบลูกกลิ้ง
(ลีลาวดี, 2560)



ภาพที่ 3 ประเภทโฟล์ค
(ลีลาวดี, 2560)



ภาพที่ 4 ประเภทขนย้ายม้วนวัสดุ
(ลีลาวดี, 2560)



ภาพที่ 5 ประเภท Mini-load
(ลีลาวดี, 2560)

จากประเภทต่างๆ ของรถ AGV ตามภาพที่ 1-5 จะเห็นได้ว่ามีส่วนที่เหมือนกันคือ ชุดต้นกำลังที่ใช้เป็นมอเตอร์เป็นตัวทำให้รถ AGV เคลื่อนที่ การเขียนโปรแกรมให้รถทำงานจากสถานีที่ 1 ไปยัง

สถานีต่อไปโดยส่วนใหญ่จะให้เส้นทางในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมเพื่อความสะดวกในการจัดการ และการเชื่อมต่อสายไฟ วงจร การควบคุม ในงานนี้นำเสนอการจำลองการทำงานของการขนส่งวัสดุ ระหว่างกระบวนการผลิต และการคำนวณ การออกแบบชุดต้นกำลังของรถ AGV โดยใช้ต้นกำลังเป็นมอเตอร์เป็นสเต็ปมอเตอร์ (Stepping motor) ในการขับเคลื่อนรถ AGV ซึ่งเป็นต้นแบบ ในการจำลองที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม ศึกษาการคำนวณจากการศึกษาการขนส่งวัสดุในโรงงาน (นิพนธ์ และมานะ, 2554) ได้นำเสนอผลการทดสอบรถขนส่งวัสดุในโรงงานสามารถลากจูงรับและส่งวัสดุน้ำหนัก 10 กิโลกรัม วิ่งรับและส่งของทั้งหมด 4 สถานี มีการศึกษาพาหนะขนส่งเคลื่อนที่อัตโนมัติด้วยระบบขับเคลื่อนแบบล้อแมคคานิค (สรายุทธ และณิชนันท์, 2560) เสนอการทำการทดสอบการทำงานของพาหนะเคลื่อนที่ 6 แบบ ผลการทดสอบการวิ่งทางตรงกำหนดค่าเกิดค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดในขณะวิ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมพาหนะเมื่อถึงทางเลี้ยว ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากที่สุด ศึกษาการพัฒนาการควบคุมอัจฉริยะสำหรับเอจิวี (พงศ์เทพ, 2550) ศึกษาและพัฒนาโปรแกรมระบบควบคุมอัจฉริยะสำหรับเอจิวีแบบลากจูง ตัวควบคุมถูกออกแบบโดยใช้ตัวควบคุมแบบ Proportional integral derivative control (PID) ซึ่งเป็นระบบควบคุมที่ใช้แก้ไขปัญหาในสถานะคงตัวของระบบเพื่อควบคุมตำแหน่ง ในการทำงานเริ่มต้นด้วยการป้อนข้อมูลจากคอมพิวเตอร์แล้วส่งข้อมูลไปที่ Programmable logic control (PLC) เป็นอุปกรณ์ในการควบคุมการทำงานของเครื่องจักร และใช้งานผ่านเครือข่ายไร้สาย โดยควบคุมรถ AGV ด้วยกล้องไร้สาย (อภิชาติ, 2551) ศึกษาการลดต้นทุนเพื่อเพิ่มการแข่งขันในภาคธุรกิจ โดยสามารถคืนทุนได้ภายใน 1 ปี ถือว่าเหมาะสมและเป็นประโยชน์ การศึกษาผลกระทบของปัจจัยในการใช้งาน AGV ต่อประสิทธิภาพของระบบการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง (จักรพันธุ์, 2555) ศึกษาผลกระทบในการใช้รถ AGV โดยการจำลองปัญหาโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์เพื่อวัดประสิทธิภาพในการใช้งาน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการจำลองการทำงานในกระบวนการผลิตที่คำนวณขนาดของมอเตอร์จากสเต็ปมอเตอร์ยังไม่มี จึงได้นำเสนอวิธีที่ใช้วิเคราะห์โดยอ้างอิงจากการศึกษาการขนส่งวัสดุในโรงงาน (นิพนธ์ และมานะ, 2554) ที่ใช้มอเตอร์กระแสไฟฟ้ามาเป็นต้นกำลัง

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อการออกแบบและพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติราคาถูกลงสำหรับการใช้งานขนส่งวัสดุในกระบวนการผลิต

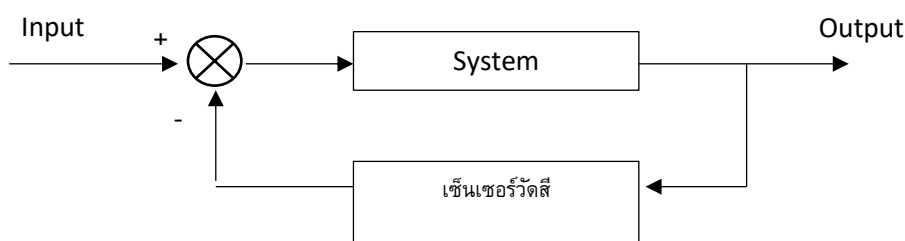
3. วิธีดำเนินงานวิจัย

จากการสืบค้นข้อมูลที่ได้การวางแผนการผลิตจากกระบวนการผลิตซึ่งยังเป็นการใช้กระบวนการผลิตที่ไม่ได้มีความต่อเนื่องในกระบวนการผลิตยังแยกชิ้นส่วนต่างๆ ผลิตร่อนจะนำส่งไปใน

กระบวนการผลิต และในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ในประเทศไทยนั้น ชิ้นส่วนการผลิตที่ผลิตออกมานั้นยังมีน้ำหนักไม่มากเช่นในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จึงได้มีแนวคิดในการพัฒนารถ AGV เข้ามาช่วยทำให้กระบวนการมีความต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น เริ่มต้นจากการคำนวณและออกแบบตัวรถ AGV ที่สามารถรับน้ำหนักได้ 10 กิโลกรัมโดยไม่รวมน้ำหนักจากตัวรถ และนำข้อมูลที่ได้ออกมาเลือกขนาดของมอเตอร์ และออกแบบลักษณะการใช้งานโดยกำหนดให้สามารถทำงานผ่านแอปพลิเคชันบนมือถือได้ เลือกใช้อุปกรณ์ในการควบคุมและการเชื่อมต่อ เมื่อได้อุปกรณ์ครบถ้วนแล้วนำมาประกอบเข้าด้วยกัน เขียนโปรแกรมลักษณะการทำงาน จากนั้นทำการทดสอบการทำงานในการสั่งงานผ่านมือถือเพื่อให้หยุดตามตำแหน่งที่กำหนด ทดสอบการหยุดของรถ AGV เมื่อเจอสิ่งกีดขวาง ทดสอบการรับน้ำหนักเคลื่อนที่ในระยะทาง 10 เมตรโดยเพิ่มน้ำหนักของรถจากมวลที่ชั่งครั้งละ 1 กิโลกรัม เก็บข้อมูลจากการทำงานจริง และทำการทดสอบความเร็วเฉลี่ยในการวิ่งโดยไม่มีน้ำหนักในระยะทาง 10 เมตรโดยใช้นาฬิกาจับเวลา และคำนวณเป็นความเร็วเฉลี่ยที่รถสามารถวิ่งได้

การออกแบบการทำงานของรถ

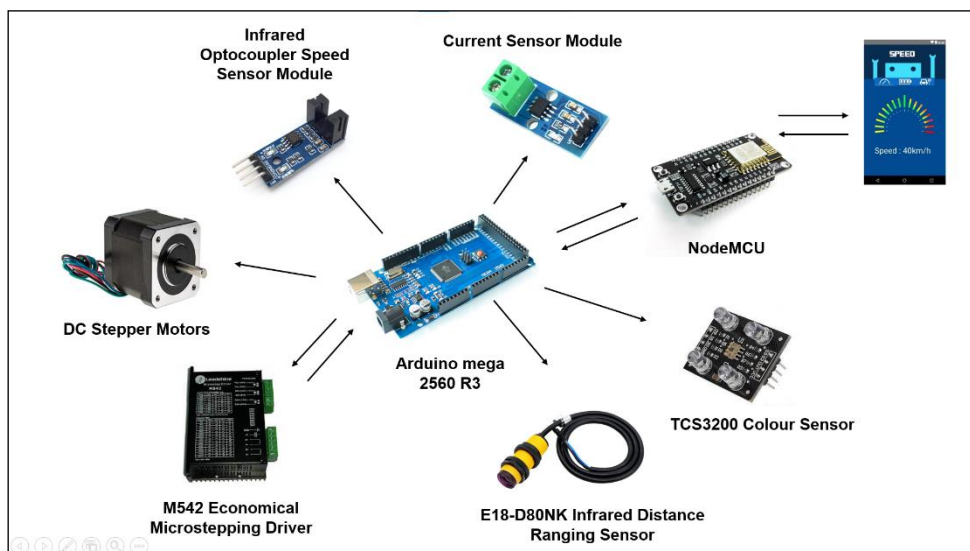
การควบคุมการทำงานของรถที่วิ่งตามเส้นใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับ feedback control ดังภาพที่ 6 การควบคุมแบบปิด การทำงานของรถนั้นได้ออกแบบโดยให้รถวิ่งตามสี โดยใช้เส้นสีดำบนพื้นแบบวงรีเป็นเส้นสีแดง ใช้ตัวตรวจวัดสีติดที่ตัวรถตามระยะที่สามารถตรวจจับได้ ติดตัวตรวจวัดสีเรียงตัวกัน 3 ตัว เมื่อตัวตรวจวัดสีตรวจจับได้ตรงกลางจะใช้ความเร็วสูงสุดที่ได้ตั้งค่าไว้ เมื่อตรวจจับได้ด้านซ้ายหรือขวาจะให้ความเร็วของมอเตอร์ด้านตรงข้ามจับตัวตรวจวัดสีที่วัดได้ลดความเร็วลงให้สามารถเข้าโค้งหรือเลี้ยวได้ และได้ตีเส้นสีเขียวและสีน้ำเงินเป็นจุดจอดของสถานี



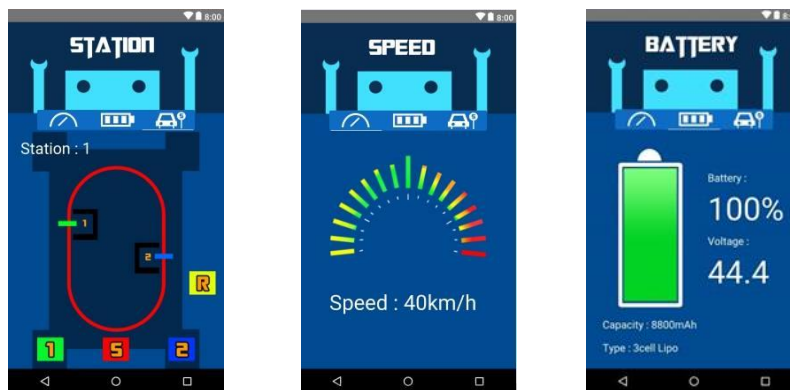
ภาพที่ 6 การควบคุมแบบปิด

การเชื่อมต่อกับบอร์ด NodeMCU เชื่อมต่อผ่านแอปพลิเคชันบนมือถือ (Application blynk) ดังแสดงในภาพที่ 7 ในการสั่งการทำงานทั้งแบบบังคับการทำงานด้วยมือ แบบการสั่งงานผ่านแอปพลิเคชัน ให้วิ่งไปจอดตามสถานีที่กำหนด และแสดงผลการใช้งานของแบตเตอรี่ แสดงตำแหน่ง

ของตัวรถว่าอยู่ที่สถานีที่ 1 หรือ 2 แสดงความเร็วของรถในขณะการทำงาน โดยได้ใช้ผ่านแอปพลิเคชัน สั่งการและแสดงผลดังภาพที่ 8



ภาพที่ 7 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของรถ AGV



ภาพที่ 8 แอปพลิเคชันที่ใช้ในการทำงาน (พลิชฐ์ และคณะ, 2561)

การคำนวณหาขนาดต้นกำลัง

การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ข้อกำหนดที่เลือกโดยใช้สเปคปั๊มมอเตอร์ที่สามารถรับน้ำหนักของตัวรถรวมกับการบรรทุก 11.3 กิโลกรัม โดยเริ่มจากกฎข้อที่สองของนิวตัน $\sum F = ma$ เมื่อรถเคลื่อนที่เกิดแรงเสียดทานจากล้อกับพื้นโดยค่าแรงเสียดทานตามตารางที่ 1



ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (นิพนธ์ และมานะ, 2554)

ลำดับ	แรงเสียดทาน	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
1	แรงเสียดทานบนพื้นทั่วไป	0.8
2	แรงเสียดทานของล้อ	0.015
3	แรงเสียดทานอากาศ	0.02
4	แรงเสียดทานของแบริ่ง	0.006

ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจากตารางสามารถรวมได้เท่ากับ 0.841 จากกฎข้อที่สองของนิวตันเมื่อมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นจะได้ว่า

$$F - F_{friction} = ma \quad (1)$$

เมื่อ F คือ แรงที่รถสามารถทำได้
 $F_{friction}$ คือ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้น
 m คือ มวลของรถ
 a คือ ความเร่งของรถ ในที่นี้ให้ความเร็วคงที่

จากน้ำหนักของรถ 11.3 กิโลกรัม โดยจะได้แรงในแนวแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 11.3×9.81 เท่ากับ 110.853 N และสมการของแรงเสียดทานมีสูตร

$$F_{friction} = \mu N \quad (2)$$

เมื่อ μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียด
 N คือ แรงในแนวแรงโน้มถ่วง

จากสมการที่ 2 ค่าแรงเสียดทานจะมีค่าเท่ากับ 0.841×110.853 เท่ากับ 93.227 N ซึ่งมีล้อที่รับแรงทั้งหมด 4 ล้อ ดังนั้นจะมีแรงกระทำที่ล้อเท่ากับ 23.30675 N

ในบทความนี้ได้เลือกใช้สปีดปั๊มมอเตอร์ ซึ่งเมื่อดูข้อมูลจากคุณสมบัติของมอเตอร์แล้วพบว่าเกิดทอร์กมากที่สุดเท่า 0.4 Nm (ที่ความเร็วสูง) จากสมการทอร์กที่ว่า

$$T = Fxr \quad (3)$$



และได้ทำการย้ายข้างสมการหาค่าแรงที่มอเตอร์โดยขนาดรัศมีของล้อมีขนาด 12.5 cm แรงจะมีค่าเท่ากับ 0.4/0.0625 มีค่าเท่ากับ 0.64 N แรงที่ใช้ในการลากรถต้องมากกว่า 23.30675 N ซึ่งแรงของมอเตอร์หนึ่งตัวเท่ากับ 0.64 N หากใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนสองตัวจะมีค่าเท่ากับ 1.28 N ซึ่งไม่เพียงพอกับแรงที่สามารถลากได้ที่ความเร็วสูง แต่สตีปิ้งมอเตอร์นั้นมีตัวควบคุมสามารถปรับตั้งค่าได้ ได้ปรับตั้งค่าความเร็วรอบต่ำทำให้สตีปิ้งมอเตอร์สามารถรับแรงทอร์กได้ถึง 2.2 N.m จากสมการ(5) สตีปิ้งมอเตอร์ 1 ตัวสามารถรับแรงได้ 35.2 N.m ในงานวิจัยนี้ใช้สตีปิ้งมอเตอร์ 2 ตัวดังนั้นเมื่อปรับตั้งค่าเช่นนี้สตีปิ้งมอเตอร์สามารถรับแรงได้มากกว่าแรงที่กระทำของแต่ละล้อในการใช้งานได้ และที่เลือกใช้ความเร็วต่ำนั้นเนื่องจากภาคอุตสาหกรรมต้องการความเร็วไม่สูงมาก เพื่อความปลอดภัยในโรงงาน

วัสดุและอุปกรณ์

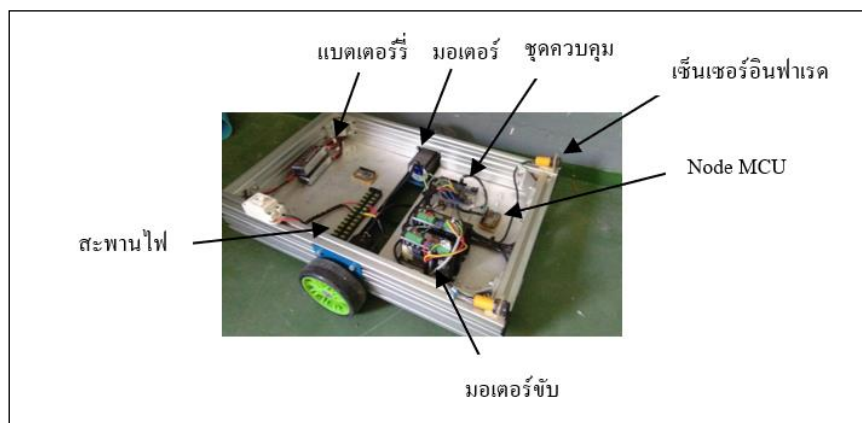
จากข้อมูลข้างต้นจะสามารถเลือกมอเตอร์ได้ และจากข้อกำหนดด้านความปลอดภัยในอุตสาหกรรม จึงเลือกอุปกรณ์ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายการอุปกรณ์

ลำดับ	ชื่ออุปกรณ์	คำอธิบาย
1	Arduino MEGA 2560 R3	บอร์ดที่ใช้เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของตัวรถ
2	NodeMCU	บอร์ดที่ใช้เขียนโปรแกรมสื่อสาร application บนมือถือ
3	TCS3200 Colour Sensor	ตัวตรวจจับสี
4	M542 Economical Microstepping Driver	ตัวควบคุมการทำงานของมอเตอร์
5	E18-D80NK Infrared Distance Ranging Sensor	ใช้ตรวจจับระยะทางด้วยหลักการของการสะท้อนแสง
6	Infrared Optocoupler Speed Sensor Module	ใช้ตรวจจับความเร็วรถ
7	Current Sensor Module	ใช้ตรวจจับกระแสไฟฟ้า
8	DC Stepper Motors	ต้นกำลังในการขับเคลื่อนสตีปิ้งมอเตอร์

การเชื่อมโยงของอุปกรณ์ของรถ AGV ด้วยบอร์ดอาร์ดุยโน รับค่าด้วยตัวเซ็นเซอร์ต่างๆมาประมวลผลผ่านตัวบอร์ดโดยการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของรถ AGV บอร์ดจะส่งคำสั่งให้มอเตอร์หมุนและหยุดการทำงาน ตามสถานีที่ได้รับจากแอปพลิเคชันบนมือถือส่งผ่านมายัง NodeMCU ไปที่บอร์ดอาร์ดุยโน โดยได้กำหนดเส้นทางเป็นวงรี โดยมีอุปกรณ์เสริมโดยสามารถแสดง

ค่าความเร็วรถ และกระแสไฟฟ้าที่เหลืออยู่จากแบตเตอรี่ได้ สามารถติดตั้งอุปกรณ์ที่ใส่เข้าไปในระบบ จากภาพที่ 9



ภาพที่ 9 รถขนส่งวัสดุในโรงงาน (พลิชฐ์ และคณะ, 2561)

4. ผลการวิจัย

เมื่อได้วัสดุอุปกรณ์ตามที่ต้องการแล้ว ได้ทำการประกอบ ทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ และเขียนโปรแกรมตามเงื่อนไขที่กำหนดข้างต้นแล้วมาทำการทดสอบ ดังนี้

4.1. ผลการทดสอบจากการคำนวณที่ความเร็วรอบสูง โดยวิ่งตัวเปล่าเมื่อทำการทดสอบให้วิ่ง 10 เมตร พบว่ารถไม่สามารถเคลื่อนที่ได้

4.2. ผลการทดสอบจากการคำนวณที่ความเร็วรอบต่ำ และปรับตั้งค่าที่ความเร็วต่ำได้ตามตารางที่ 3 ซึ่งพบว่ารถไม่สามารถวิ่งได้เมื่อบรรทุกเกิน 12 กิโลกรัม

4.3. ผลการทดสอบความเร็วเฉลี่ยในการวิ่งโดยไม่มีน้ำหนักกระยะทาง 10 โดยใช้นาฬิกาจับเวลา และคำนวณเป็นความเร็วเฉลี่ยที่รถสามารถวิ่งได้ตามตารางที่ 4 พบว่าความเร็วเฉลี่ยของรถเท่ากับ 1.344 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

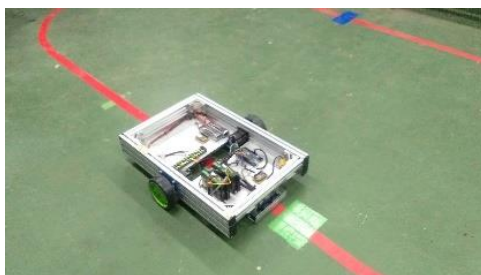
4.4. การทำงานของรถ ในการทดสอบนั้นได้ทำการตีเส้นเป็นวงรีเพื่อการทดสอบอย่างง่าย เมื่อพบเส้นสีเขียวดำรถก็จะทราบว่าเป็นตำแหน่งที่ 1 ดังภาพที่ 10 และเมื่อพบเส้นสีน้ำเงินดำรถก็จะทราบว่าเป็นตำแหน่งที่ 2 ดังภาพที่ 11

ตารางที่ 3 ผลการทดลองที่ปรับตั้งค่าความเร็วต่ำ

ลำดับ	น้ำหนักบรรทุกทุก(กิโลกรัม)	ผลการทดลอง	
		ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	0	☒	
2	1	☒	
3	2	☒	
4	3	☒	
5	4	☒	
6	5	☒	
7	6	☒	
8	7	☒	
9	8	☒	
10	9	☒	
11	10	☒	
12	11	☒	
13	12		☒

ตารางที่ 4 ความเร็วเฉลี่ยที่รถสามารถวิ่งได้

ครั้งที่	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	ความเร็ว(กิโลเมตรต่อชั่วโมง)
1	10	26.78	1.344
2	10	26.78	1.344
3	10	26.78	1.344
4	10	26.66	1.350
5	10	26.76	1.345
6	10	26.78	1.344
7	10	26.75	1.346
8	10	26.78	1.344
9	10	26.81	1.343
10	10	26.78	1.344
11	10	26.80	1.343
12	10	26.78	1.344
13	10	26.80	1.343
14	10	26.90	1.338
15	10	26.78	1.344
เฉลี่ย (วินาที)		26.78	1.344



ภาพที่ 10 ตำแหน่งการทำงานที่ 1
(พลีษฐ์ และคณะ, 2561)



ภาพที่ 11 ตำแหน่งการทำงานที่ 2
(พลีษฐ์ และคณะ, 2561)

เมื่อทำการทดสอบพบว่าสามารถใช้งานได้ตามคำสั่งที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้โครงสร้างจากอลูมิเนียมโปรไฟล์ดังภาพที่ 12 และทำการทดสอบการหยุดการทำงานของตัวรถดังภาพที่ 13 ซึ่งสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้



ภาพที่ 12 ตัวรถที่ใช้อลูมิเนียมโปรไฟล์เป็นโครงสร้าง
(พลีษฐ์ และคณะ, 2561)



ภาพที่ 13 เมื่อมีสิ่งกีดขวางอยู่บนทางวิ่ง รถจะหยุดทันที
(พลีษฐ์ และคณะ, 2561)

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากการศึกษาข้อมูลที่อ้างอิงเบื้องต้นกระบวนการผลิตจะถูกพัฒนาไปในแนวทางของกระบวนการผลิตแบบลีน เมื่อเทียบกับอดีตที่เป็นการจัดกลุ่มของเครื่องจักรการผลิตแบบลีนนั้นสามารถควบคุมการผลิตและวิเคราะห์ปัญหาของแต่ละกระบวนการได้ง่ายกว่า ซึ่งจะทำให้ในการผลิตนั้นยังไม่ต่อเนื่องสมบูรณ์ จึงทำการนำเอารถ AGV เข้ามาช่วยในกระบวนการผลิตให้มีความแน่นอนและความคุมเวลาการผลิตได้ง่ายขึ้น จากที่ทำการออกแบบ เลือกอุปกรณ์และทำการทดสอบผลที่เกิดขึ้นพบว่า เมื่อเติมน้ำหนักครั้งละ 1 กิโลกรัม วิ่งที่ระยะทาง 10 เมตร รถ AGV เมื่อเติมน้ำหนักไป 12 กิโลกรัมรถไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นการรับน้ำหนักบรรทุกของรถ AGV ได้ไม่เกิน 11 กิโลกรัมไม่รวมน้ำหนักของตัวรถ เมื่อทำการทดสอบการวิ่งในระยะทาง 10 เมตร ทำการจับเวลา และหาความเร็วเฉลี่ยได้ 1.344 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สามารถทำงานตามการสั่งงานได้ถูกต้อง ในการสั่งงานไปยังจุดต่างๆ ทำกำหนดอยู่บนแอปพลิเคชัน สามารถหยุดรถเมื่อมีสิ่งกีดขวางเข้ามาได้ทันที และสามารถทำงานต่อเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางได้ ปัจจุบันยังเป็นชุดที่ใช้ในการจำลองการทำงาน และได้ดำเนินการพัฒนารถ AGV ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยใช้ PLC เข้ามาในการควบคุม โดยเปลี่ยนจากแทปสีเป็นแทปแม่เหล็กซึ่งไม่ได้ถูกปัจจัยภายนอกเข้ามารบกวนในขณะที่ใช้งานเช่นแสงจากภายนอก รบกวน และรถ AGV ต้นแบบนี้สามารถใช้งานได้ง่าย พนักงานสามารถเข้าใจได้ง่ายและพัฒนาต่อยอดกับอุตสาหกรรมได้ เป็นไปตามนโยบายอุตสาหกรรม 4.0 ที่เกิดขึ้นมานั้นทางภาคอุตสาหกรรมได้มีการตอบรับเป็นอย่างดี เพื่อลดปัญหาค่าแรงที่มีอัตราสูงขึ้น และพัฒนาแรงงานที่ไม่มีฝีมือให้มีความสามารถมากยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ

7. เอกสารอ้างอิง

- จักรพันธ์ สุริยกุล ณ อยุธยา. (2555). **การศึกษาผลกระทบของปัจจัยในการใช้งาน AGV ต่อประสิทธิภาพของระบบการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นิพนธ์ เรื่องวิริยะนันท์, และมานะ ทะนะอัน. (2554). **การขนส่งวัสดุในโรงงาน**. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 6(2), 44-51.
- พงศ์เทพ ดวงมาศ. (2550). **การพัฒนาระบบควบคุมอัจฉริยะสำหรับเอจียวี**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.
- พลีษฐ์ ทองเต็ม, ธงชัย สมแสง, วุฒิชัย อุดม, นพรุจ เขียวนาค, และ ทศพันธ์ สุวรรณทัต. (2561). **รถขนส่งสื่อสารทุกสรรพสิ่ง**. การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 10, 486 - 489
- รติพล จันทรแพง. (2559). **การจัดผังการผลิตด้วยเทคโนโลยีกลุ่มสำหรับโรงงานผลิตเครื่องมือแพทย์**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.
- รัตติยา ราชณะสุข, และชุมพล ยวงใย. (2555). **การปรับปรุงกระบวนการผลิตของโรงงานประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์**. ในการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม. 685-692.
- ลีลาวดี. (2560). **ระบบขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติ**. ค้นจาก http://leelawadee076.blogspot.com/2017/06/blog-post_15.html
- สรพรเพชญ พันธ์ดี. (2554). **แนวโน้มของระบบการผลิตในอนาคต**. วารสารนักบริหาร. 31(4), 197-201.
- สรายุทธ นาขมิ้น, และณิชนันท์ ขาวมงคล. (2560). **พาหนะขนส่งเคลื่อนที่อัตโนมัติด้วยระบบขับเคลื่อนแบบล้อแมคคานิค**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี.
- อภิชาติ พันธุ์ชัย. (2551). **การควบคุมรถเอจียวีด้วยกล้องไร้สาย**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.
- อลงกรณ์ เมืองไหว และขวัญนิธิ คำเมือง. (2560). **การจัดเซลล์การผลิตแบบเซลล์ลาร์โดยการกำหนดพนักงานในการทำงานด้วยวิธีเมตาฮีริสติกส์**. Rajabhat Journal of Sciences, Humanities & Social Sciences, 18(1), 72-82.



การพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง DEVELOPMENT OF A DRYER USING BIOMASS AS FUEL

ประพันธ์พงษ์ สมศิลา¹, เอกภูมิ บุญธรรม², ธนกร หอมจำปา^{1*}

Prapphanpong Somsila¹, Eakpoom Buntham², Thanakorn Homjumpa^{1*}

¹คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

อ.เมือง จ.สุรินทร์ ประเทศไทย 32000

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus,
Muang, Surin, Thailand, 32000

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

*Corresponding author e-mail: tanagorn.ho@rmuti.ac.th

วันที่ได้รับ 18 เมษายน 2565

วันที่แก้ไขบทความ 28 เมษายน 2565

วันที่ตอบรับบทความ 29 เมษายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีแนวคิดจากปัญหาประชากรของประเทศไทยที่มีอัตราการเป็นโรคมะเร็งเพิ่มขึ้นมากอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะมะเร็งตับ มะเร็งกระเพาะอาหาร และมะเร็งลำไส้ใหญ่ ซึ่งมีสาเหตุจากการบริโภคอาหารประเภทแป้ง ย่าง ร่มควัน และทอดด้วยน้ำมันซ้ำ ที่ทำให้เกิดสารก่อมะเร็งจำพวกสารเฮเทอโรไซคลิกเอมีน และสารโพลีไคลโอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และปัญหาการทำแห้งด้วยกระบวนการตากแดดจะประสบปัญหาสำคัญที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้นั้นคือ ช่วงของฤดูฝน และช่วงของการไม่มีแสงแดดจากพระอาทิตย์จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพที่ไม่ดีของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคการนำความร้อนจากเปลวไฟไม่ให้สัมผัสกับอาหารโดยตรงผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยได้ออกแบบห้องอบแห้งความจุ 10 กิโลกรัม และสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากเปลวไฟ โดยใช้เศษกิ่งไม้ที่หาได้ในพื้นที่เป็นเชื้อเพลิง สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงคือ เนื้อหมูที่ใช้สำหรับการแปรรูปเป็นเนื้อหมูแดดเดียว โดยมีปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิอบแห้ง 55, 60 และ 65 °C และความเร็วลมภายในห้องอบแห้ง 1.0, 3.0 และ 6.0 m/s โดยมีพารามิเตอร์ที่เป็นเกณฑ์ในการศึกษา คือ อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งหรือความเร็วลมส่งผลให้อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยพบว่าอัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.12 – 0.29 kg/hr และ 0.05 – 0.08 MJ/kg ตามลำดับ และสุดท้าย เครื่องอบแห้งที่

พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เคลื่อนย้ายได้สะดวกและสามารถผลิตหมูแดดเดียวได้ในทุกเวลา อย่างไรก็ตาม
จะต้องดำเนินการในที่ร่มสำหรับช่วงฤดูฝน

คำสำคัญ: การอบแห้ง, เชื้อเพลิงชีวมวล, สมรรถนะเครื่องอบแห้ง

Abstract

This research aims to develop biomass dryers with flame thermal conductivity techniques and smoke does not come into direct contact with food through heat exchangers. There is an increasing trend in cancer cases in Thailand, particularly stomach and colon cancer. Most of these cases are caused by the consumption of toasted, grilled, smoked, and fried foods. Frying specifically use oil repeatedly, that produce carcinogenic substances such as Heterocyclic Amines and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon. The rainy season is also a problem in food preparation. Lack of sunshine and the wet weather result to poor quality food products. The dryer will allow use of healthier cooking and food preparation methods. The drying chamber has a capacity of 10 kg. It is has a heat exchanger between the combustion and drying zones, which allow for conduction, convection, and radiation heating techniques. Tree branches are used as fuel. Pork meat is used to test the biomass dryer performance. Drying is done at temperatures of 55, 60 and 65 °C and the air velocity inside the drying chamber varies at 1.0, 3.0 and 6.0 m/s. The studies showed that increasing drying temperature or air velocity result in an increase in the specific energy consumption (ranging of 0.12 – 0.29 kg of tree branches/hr), resulting to higher drying rate of between 0.05 – 0.08 MJ/kg. The dryer developed in this research can easily be moved allowing production of sun-dried pork anywhere at any time. However, it is still necessary to operate the dryer indoors for rainy season

Keywords: Drying, Biomass fuel, Dryer performance

1. บทนำ

หมู (Pork) ถือเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีการเลี้ยงและการบริโภคอย่างกว้างขวางและแพร่หลายในทุกภูมิภาค เนื่องจากหมูเป็นสัตว์ที่เลี้ยงง่ายในทุกพื้นที่ และมีระยะเวลาที่สามารถบริโภคได้ในระยะสั้น การบริโภคและการแปรรูปหมูสามารถทำได้ในหลายรูปแบบ ทั้งในการบริโภคในรูปแบบเนื้อสดเพื่อการประกอบอาหาร และการบริโภคในลักษณะของการแปรรูปเป็น

ผลิตภัณฑ์ เช่น หมูแผ่น หมูสวรรค์ หมูหยอง และหมูแดดเดียว เป็นต้น หมูแดดเดียว ถือเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปจากหมูที่มีมูลค่าด้านการตลาดในระดับที่สูง เนื่องจากรสชาติที่มีความอร่อยสามารถเก็บรักษาในเป็นเวลาค่อนข้างนาน ประกอบกับสามารถนำมาปรุงรสได้หลากหลายเมนูเช่นเดียวกัน นอกจากนั้นคนไทยส่วนมากจะนิยมรับประทานอาหารประเภทปิ้งย่างเป็นอย่างมาก ผลที่ตามมาคือการบริโภคอาหารประเภทปิ้งย่าง ร่มควัน และทอดด้วยน้ำมันซ้ำ ที่ทำให้เกิดสารก่อมะเร็งจำพวกสารเฮทเทอโรซัยคลิกเอมีน และสารโพลีไคลโอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็งตับ มะเร็งกระเพาะอาหาร และมะเร็งลำไส้ใหญ่ ในบุคคลดังกล่าวเป็นจำนวนมาก ประกอบกับอีกหนึ่งปัญหาที่พบมากสำหรับกระบวนการตากแห้งหรือผลิตหมูแดดเดียวของวิธีการตากแดดนั้นคือ ช่วงของฤดูฝน และช่วงของการไม่มีแสงแดดจากพระอาทิตย์จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพที่ไม่ดีของผลิตภัณฑ์อย่างเห็นได้ชัด จากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นที่มาสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ เพื่อให้สามารถสร้างงานวิจัยที่มีคุณภาพ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา โดยสามารถจำแนกออกเป็นสองกลุ่ม โดยที่กลุ่มแรกเป็นงานวิจัยเกี่ยวข้องกับการศึกษาและพัฒนาชุดทดลองเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ประกอบด้วย Rabha (2021) ศึกษาเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงต้นที่มีการประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนพบว่า สามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้มาก โดยชนิดของฟืนที่ใช้เป็นไม้มะม่วงซึ่งพบว่าความกว้างของไม้ฟืนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการพัฒนาเครื่องอบแห้งและยังสามารถแสดงจุดเด่นเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถใช้ได้ในทุกพื้นที่แม้ในพื้นที่ที่ไม่มีไฟฟ้าก็ตาม Ndukwu *et al.* (2020) ศึกษาเครื่องอบแห้งแบบผสมระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวลประกอบกับการใช้ท่อทองแดงในการทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากการศึกษาพบว่า เครื่องอบแห้งที่ทำการออกแบบสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้ ที่ นอกจากนั้นยังพบว่า การวิเคราะห์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในระดับที่ลดลง Bosomtwe *et al.* (2019) ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบผสมระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์และชีวมวลสำหรับการอบแห้ง และการฆ่าเชื้อในข้าวโพด จากการศึกษาพบว่า เครื่องอบแห้งสามารถลดความชื้นและอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้เป็นที่น่าพอใจ นอกจากนั้นยังพบว่าเครื่องอบแห้งที่มีการใช้งานแบบผสมระหว่างแสงอาทิตย์และชีวมวลจะสามารถลดการรอดชีวิตของเชื้อโรคได้ดีกว่ากรณีการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่มีการใช้งานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว Hamdani *et al.* (2018) ได้ทำการออกแบบ สร้างและทำการทดสอบเครื่องอบแห้งแบบผสมระหว่างแสงอาทิตย์ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับการอบปลา จากการศึกษาพบว่า เครื่องอบแห้งที่ได้จากการออกแบบสามารถอบแห้งปลาได้เป็นอย่างดี แต่พบปัญหาที่เกิดขึ้นในการบวนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลในช่วงเวลากลางคืนของการอบแห้งจะส่งผลต่อน้ำหนักปลาที่มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย Nawshad & Michael (2013) ทำการศึกษาการประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะสามารถทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงแต่มีการใช้พลังงานและต้นทุนที่

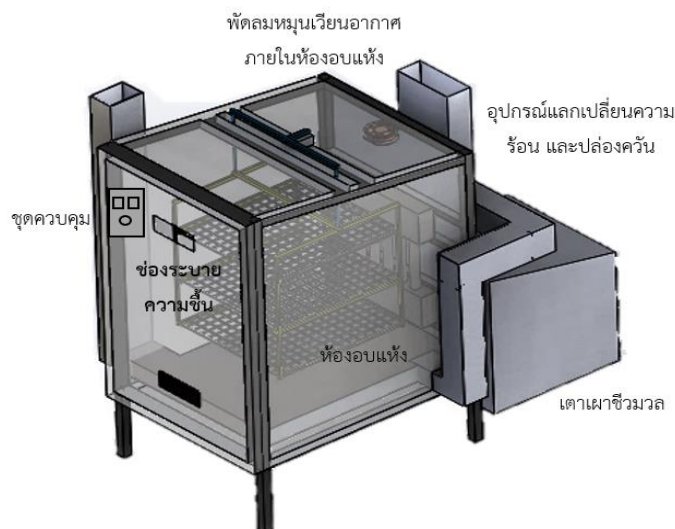
ค่อนข้างสูง นอกจากนั้นยังพบอีกว่าการใช้งานเชื้อเพลิงชีวมวลจะสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่ากรณีการใช้ถ่านหิน Henrik *et al.* (20014) ศึกษาการลดต้นทุนในกระบวนการอบแห้งแบบต่อเนื่องด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับโรงงานผลิตสารเคมีและกระดาษ จากการศึกษาพบว่า ในทางปฏิบัติการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ต่ำจะสามารถช่วยลดต้นทุนการอบแห้งได้อย่างมาก นอกจากนั้นยังพบว่า กระบวนการใช้น้ำสำหรับการอบแห้งจะมีเหตุผลประกอบที่ดีกว่าของการใช้ความร้อนจากประเภทอื่นที่ส่งผลต่อต้นทุนในระดับที่ค่อนข้างมาก Patipat *et al.* (2017) ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับการอบแห้งข้าวเกรียบที่ทำจากข้าวเหนียว ผลจากการศึกษาพบว่า การอบแห้งข้าวแต๋นที่ใช้เครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงจะสามารถลดต้นทุนการผลิตได้เป็นอย่างดี ประกอบกับมีประสิทธิภาพการอบแห้งเป็นที่น่าพอใจ นอกจากนั้นยังส่งผลต่อคุณภาพของสี อัตราส่วนการหดตัว และความแข็งของข้าวแต๋นในระดับที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้ก๊าซแอลพีจี Yahya *et al.* (2017) ศึกษาการวิเคราะห์การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการใช้ความร้อนร่วมระหว่างแสงอาทิตย์และชีวมวล จากการศึกษาพบว่า การอบแห้งกรณีของการใช้แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมากกว่ากรณีของการใช้พลังงานร่วมกันระหว่างแสงอาทิตย์และชีวมวล Ida *et al.* (2020) ศึกษาการใช้ประโยชน์จากกลบในการอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีการประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อ ผลจากการศึกษาพบว่า กระบวนการอบแห้งข้าวโพดที่ใช้เครื่องอบแห้งจากกลบให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ทั้งในคุณภาพของข้าวโพดและประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง Gowtham *et al.* (2012) ศึกษาการออกแบบและทำการวิเคราะห์เครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่และมีชุดเก็บความร้อนด้วยวัสดุเปลี่ยนเฟส จากการศึกษาพบว่า การศึกษานำความร้อนขึ้นออกจากเชื้อเพลิงชีวมวลก่อนที่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิงให้หม้อต้มน้ำในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าด้วยความร้อนจากความร้อนทิ้งและวัสดุเปลี่ยนเฟส สามารถลดความขึ้นของเชื้อเพลิงชีวมวลดังกล่าวได้เป็นอย่างดีและกลุ่มที่สองเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วย Ndukwua *et al.* (2020) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบผสมระหว่างแสงอาทิตย์และชีวมวลโดยพบว่า จากการศึกษาสามารถพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบผสมที่สามารถลดการใช้พลังงานได้ค่อนข้างมาก นอกจากนั้นยังพบอีกว่าประสิทธิภาพการอบแห้งจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการใช้งานร่วมกันกับเชื้อเพลิงชีวมวล Sumeet *et al.* (2020) พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลของเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงผลจากการศึกษาพบว่า ค่าการถ่ายโอนความร้อนและความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นวางผลิตภัณฑ์ โดยขนาดของชั้นวาง จำนวนชั้นวาง ช่องว่างของชั้นวางมีผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้งและผลของการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วยเช่นกัน Fabrice & Yvette (2017) งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่อง

อบแห้งแบบผสมระหว่างเชื้อเพลิงชีวมวลกับพลังงานแสงอาทิตย์ และทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองที่ใช้ฟริกเชียวเป็นผลิตภัณฑ์ในการทดลอง โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบผสมให้มีสมรรถนะสูงสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การพัฒนาแบบจำลองดังกล่าวสามารถออกแบบเครื่องอบแห้งได้ในระดับที่พึงพอใจและสามารถจำแนกการใช้ชนิดของพลังงานในแต่ละช่วงได้ด้วย Elieser (2018) พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีชุดเก็บความร้อน จากการศึกษพบว่า การมีกระจุกรอบด้านผลส่งต่อการเพิ่มอุณหภูมิของชุดเก็บความร้อน แต่การเพิ่มจำนวนชั้นของกระจุจกจากหนึ่งชั้นไปเป็นสองชั้นไม่มีผลต่ออุณหภูมิในชุดเก็บความร้อน และยังพบอีกว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ด้านบนสุดของห้องอบแห้งที่มีอุณหภูมิที่สูงมากกว่าตำแหน่งอื่นอย่างเห็นได้ชัด Sonthawi *et al.* (2016) ศึกษาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยการเปรียบเทียบผลกับการทดลอง จากการศึกษพบว่า ผลที่ได้จากการนำแผ่นยางเข้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งดังกล่าวจะสามารถลดความชื้นของแผ่นยางพาราได้แต่ไม่สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งลง นอกจากนั้นยังพบว่าการอบแห้งแผ่นยางพาราด้วยเครื่องอบแห้งมีคุณภาพดีกว่ากรณีของการอบแห้งแบบรมควันที่มีการทำกันโดยทั่วไปของชาวสวนยาง Dhanushkodia *et al.* (2017) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับใช้ในกระบวนการอบแห้งเม็ดมะม่วงหิมพานต์ จากการศึกษพบว่า โมเดลของ two terms และ Midilli มีความสามารถในการทำงานการอบแห้งที่มีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี ส่วนโมเดลของ Page เป็นโมเดลที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งเม็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงและแบบผสมได้เป็นอย่างดี Sumeet *et al.* (2020) งานวิจัยนี้ทำการจำลองพลศาสตร์ของไหลด้วยการใช้โปรแกรม Fluent 17 ที่ทำการศึกษาผลของจำนวน ความยาว การจัดเรียง และการจัดเรียงรูของชั้นวางผลิตภัณฑ์ ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การถ่ายโอนความร้อนและความดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มจำนวนของชั้นวางผลิตภัณฑ์ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวถือเป็นสิ่งที่ส่งผลมากที่สุด สำหรับการการจัดเรียงชั้นวางผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลสมรรถนะมากที่สุดคือ กรณีการจัดเรียงแบบใส่ด้านข้างและผนังด้านหลัง-ด้านหน้า นอกจากนั้นปัจจัยการจัดเรียงรูของชั้นวางผลิตภัณฑ์พบว่า การจัดเรียงแบบตรงจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะเครื่องอบแห้งมากกว่ากรณีการจัดเรียงแบบสลับกัน อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการถ่ายเทความร้อนให้กับห้องอบแห้งสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากการรมควันยังคงมีไม่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคการนำความร้อนจากเปลวไฟไม่ให้สัมผัสกับเนื้อหุ้มแดดเดียวโดยตรงผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

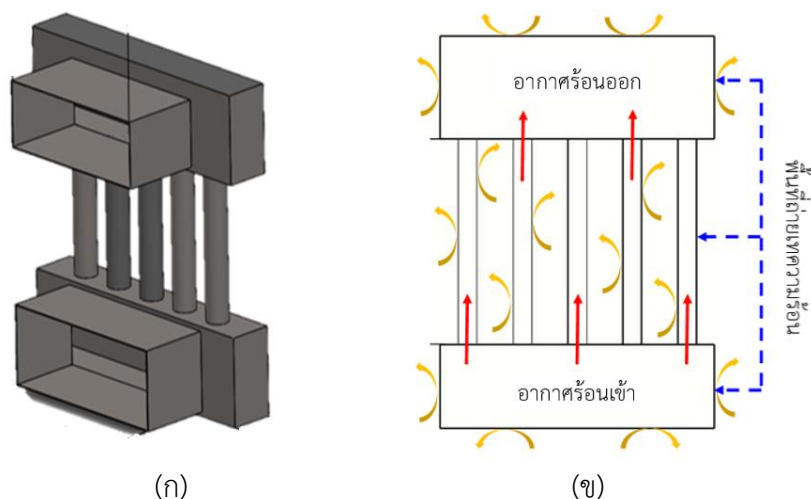
2. วิธีวิจัย

2.1 ชุดทดลอง

ภาพที่ 1 แสดงลักษณะเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้สำหรับการทดสอบสมรรถนะ โดยเครื่องแห้งชีวมวลประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ 1) เตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล โครงสร้างทำจากเหล็ก ผนังด้านในทุกด้านทำจากแผ่นเหล็กหนา 5 มิลลิเมตร และหุ้มฉนวนทุกด้านด้วยเซรามิกซีโฟเบอร์หนา 1 นิ้ว และห่อหุ้มด้วยแผ่นเมทัลชีสความหนา 1 มิลลิเมตรรอบด้านเช่นกัน โดยทำประตูด้านหน้าสำหรับนำเชื้อเพลิงชีวมวลเข้าเตาเผา และสร้างช่องอากาศขนาด 10×20 เซนติเมตรที่ผนังของประตู เพื่อให้อากาศจากภายนอกเข้าไปในห้องเผาไหม้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ภายในจะมีตะแกรงที่สร้างด้วยเหล็กสำหรับเป็นพื้นที่ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีเชื่อมต่อกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและปล่องระบายควัน โครงสร้างทำมาจากเหล็กแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร ประกอบด้วยส่วนที่เป็นกล่องรวมควันและความร้อนด้านล่าง ต่อเข้ากับท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว กล่องรวมควันและความร้อนด้านบน และต่อเชื่อมกับปล่องควันเพื่อทำการปล่อยควันออกสู่ภายนอก ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยหลักการทำงานของเตาเผาและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เชื่อมต่อกัน จะเริ่มจากความร้อนและควันร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ตำแหน่งเตาเผาจะไหลผ่านมายังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนจากการเผาไหม้กับอากาศที่ไหลเวียนภายในห้องอบแห้งโดยไม่มีการผสมกันแต่อย่างใด เพื่อป้องกันกลิ่นควันที่จะติดอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งเป็นกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์สำหรับผู้บริโภค 3) ห้องอบแห้ง เป็นส่วนที่รับความร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยผ่านอากาศภายในห้องอบแห้ง เพื่ออบและลดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ โดยผนังทุกด้านหุ้มด้วยแผ่นสังกะสีความหนา 1 มิลลิเมตรประกบด้วยฉนวนกันความร้อนความหนา 10 มิลลิเมตร สำหรับห้องอบแห้งทำการติดตั้งพัดลมเพื่อสร้างการไหลเวียนอากาศขนาด 0.5 แรงม้าจำนวน 1 เครื่อง และยังมีติดตั้งชั้นวางผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นตะแกรงสเตนเลสขนาดความกว้างช่องตะแกรงเท่ากับ 10 มิลลิเมตร นอกจากนั้นยังมีช่องเปิดจำนวน 2 ช่อง ขนาด 5×10 เซนติเมตรเท่ากัน ในตำแหน่งผนังด้านหน้าของประตูที่ด้านล่างและด้านบน เพื่อการนำพาอากาศจากภายนอกเข้าช่องด้านล่างและระบายความชื้นผลิตภัณฑ์ที่ช่องด้านบน 4) ชุดควบคุมการทำงานของพัดลมไหลเวียนอากาศ สำหรับสร้างการกระจายลมร้อนให้ทั่วทุกพื้นที่ของห้องอบแห้ง และชุดควบคุมความเร็วรอบของพัดลมไหลเวียนอากาศที่มีการต่อพ่วงกับวัดคีมเตอร์ที่ใช้ในการวัดและบันทึกค่าการใช้พลังงาน



ภาพที่ 1 แบบจำลองเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง



ภาพที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

(ก) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (ข) แผนผังของการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2.2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง

การพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งลักษณะเด่นของเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงคือ มีระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถแยกความร้อนและควันไฟไม่ให้สัมผัสกับอาหารโดยตรงส่งผลให้มีความปลอดภัย ถูกสุขลักษณะ โดยการรับประทานอาหารที่มีการปิ้งย่างเพื่อลดสารก่อมะเร็ง ซึ่งการอบแห้งในลักษณะดังกล่าวส่งผลทำให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพสูง การทำงานของเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง เริ่มต้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนหลักที่ใช้ในการอบแห้งและขั้นตอนการเติมเชื้อเพลิงจะเติมไม้ฟืนเมื่อ

ความร้อนภายในห้องอบลดลงต่ำกว่าที่กำหนดของการศึกษา จากนั้นเมื่อความร้อนที่เกิดขึ้นมีปริมาณที่มากเพียงพอทำให้อากาศร้อนก็ไหลขึ้นผ่านชุดอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งในขณะที่อากาศร้อนไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เองจะเป็นขั้นตอนของการถ่ายเทความร้อนออกสู่ด้านนอก ส่งผลทำให้ความร้อนภายในห้องอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นและเหมาะสมสำหรับใช้ในการอบแห้งเนื้อหมูสด ซึ่งค่าความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้ น้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ระเหยตัวออกมายังด้านนอกเพื่อลดความชื้น จากนั้นความร้อนที่ไหลออกมาจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะไหลไปทางด้านบนและออกไปสู่ด้านนอกผ่านปล่องควัน ซึ่งการทำงานของเครื่องอบแห้งจะเป็นเช่นนี้จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ในแต่ละครั้ง นอกจากนั้นยังมีการติดตั้งพัดลมไหลเวียนอากาศเพื่อช่วยในการกระจายความร้อนในห้องได้อย่างทั่วถึงกันในทุกพื้นที่อย่างสม่ำเสมอเพื่อการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.3 วิธีการทดลอง

2.3.1 ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลอง

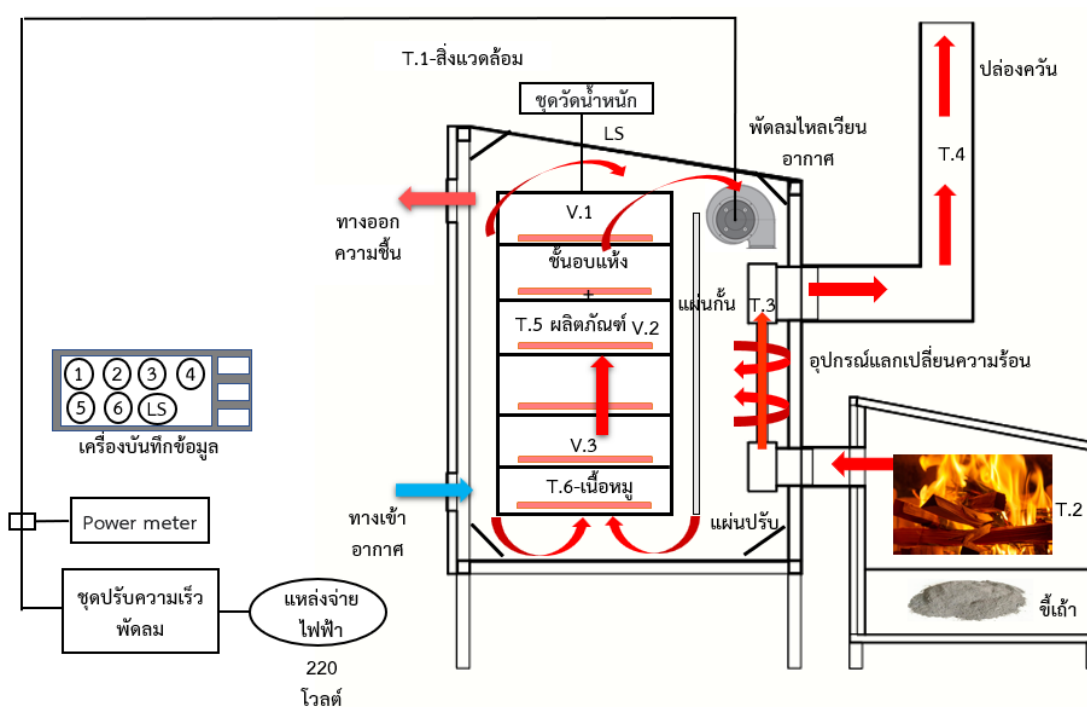
สำหรับการศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงนี้ ได้เลือกใช้เนื้อหมูสำหรับทดลองในทุกเงื่อนไขที่ได้ทำการศึกษา โดยชิ้นของเนื้อหมูที่ได้ทำเตรียมสำหรับการอบแห้งจะมีขนาดเท่ากับ $1 \times 10 \times 1$ เซนติเมตร เท่ากันในทุกชิ้น เนื่องด้วยขนาดดังกล่าวเป็นขนาดที่เท่ากับขนาดของเนื้อหมูแดดเดียวที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป ดังนั้นผลผลิตของเนื้อหมูแดดเดียวที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบผลที่ได้กับผลของเนื้อหมูแดดเดียวที่วางจำหน่ายในตลาดด้วยเช่นกัน

2.3.2 เงื่อนไขในการทดลอง

สำหรับการศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในครั้งนี้ จะเป็นศึกษาภายใต้เงื่อนไขการแปรผันอุณหภูมิอบแห้ง (อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง) 55, 60 และ 60 °C และปรับเปลี่ยนความเร็วของอากาศภายในห้องอบแห้งเท่ากับ 1.0, 3.0 และ 6.0 m/s ตามลำดับ โดยในแต่ละเงื่อนไขของการศึกษาจะทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ระยะเวลาเท่ากับ 240 นาที สำหรับวิธีการควบคุมอุณหภูมิอบแห้งดำเนินการโดยติดตั้งชุดแสดงผลอุณหภูมิชนิดตัวเลขที่ตำแหน่งด้านหน้าเครื่องอบแห้งเพื่อให้สามารถมองเห็นชัดเจน เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในระดับที่ต่ำกว่ากำหนดจะเติมเชื้อเพลิงเข้าไปในเตาเผา และหากอุณหภูมิเกินกว่ากำหนดจะมีการเปิดช่องทางระบายความชื้นเพิ่มมากขึ้น ส่วนการควบคุมความเร็วของอากาศภายในห้องอบแห้งทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบการหมุนของพัดลมไหลเวียนอากาศภายในห้องอบแห้ง เพื่อปรับความเร็วของอากาศภายในห้องอบแห้งให้ได้ตามที่ต้องการ

2.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองในทุกเงื่อนไขโดยเริ่มจากการเตรียมชิ้นเนื้อหมู และชุดทดลอง โดยทำการติดตั้งเครื่องมือวัดทุกประเภท ประกอบด้วย อุปกรณ์สำหรับวัดและบันทึกผลของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และน้ำหนักผลิตภัณฑ์ โดยทำการวัดและบันทึกผลทุกๆ 5 นาที ซึ่งอุปกรณ์และตำแหน่งที่ใช้ในการวัดและบันทึกผลได้แสดงในภาพที่ 3 และตารางที่ 1 นอกจากนี้ได้ทำการวัดและบันทึกค่าของน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ชีวมวลที่ใช้ และความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ของพัดลมไหลเวียนอากาศภายในห้องอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลองด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 3 ลักษณะของอุปกรณ์และตำแหน่งการวัด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเครื่องมือวัดสำหรับการทดลอง

ลำดับ	อุปกรณ์	คุณสมบัติ	ความแม่นยำ
1	Fan	0.125 kW, 50 Hz, Speed adjustment	-
2	Electricity meter	Power, Amp, Volt, PF, Hz, Supply 220V, 50Hz	±1%
3	Thermocouple	Type K -200 – 1300 °C	±0.01 °C
4	Relative Humidity (%RH)	Relative humidity: 0% - 100%	±4 %RH
5	Anemometer	Range 0 – 20 m/s	± 0.01m/s
6	Load cell	Output (mV/V) 2.0, 5-12V, 10kg (Max load)	±0.02%
7	Weighing machine	0 – 20 kg, AC 220V	±3%

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย ความชื้นผลิตภัณฑ์ อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

ความชื้นมาตรฐานเปียก คือ อัตราส่วนของน้ำต่อมวลเปียก ซึ่งสามารถวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (1)

$$M_w = \frac{w-d}{w} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่	M_w	คือ	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
	W	คือ	มวลเปียกของวัสดุ (kg)
	d	คือ	มวลแห้งของวัสดุ (kg)

สัดส่วนความชื้น คือ ตัวแปรไร้หน่วยที่เปรียบเทียบความชื้นที่เวลาใดๆ กับความชื้นเริ่มต้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2)

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

โดย	MR	คือ	สัดส่วนความชื้น
	M_{in}	คือ	ความชื้นเริ่มต้น (% w.b.)
	M_t	คือ	ความชื้นที่เวลาใด ๆ (% w.b.)

อัตราการอบแห้ง คือ ปริมาณการระเหยของน้ำจากวัสดุต่อเวลาที่กำหนด ซึ่งสามารถวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3)

$$DR = \frac{m_i - m_t}{T} \quad (3)$$

โดย	DR	คือ	อัตราการอบแห้ง (kg/h)
	m_i	คือ	น้ำหนักเริ่มต้นในวัสดุ (kg)
	m_t	คือ	น้ำหนักวัสดุที่เวลาใดๆ (kg)
	T	คือ	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

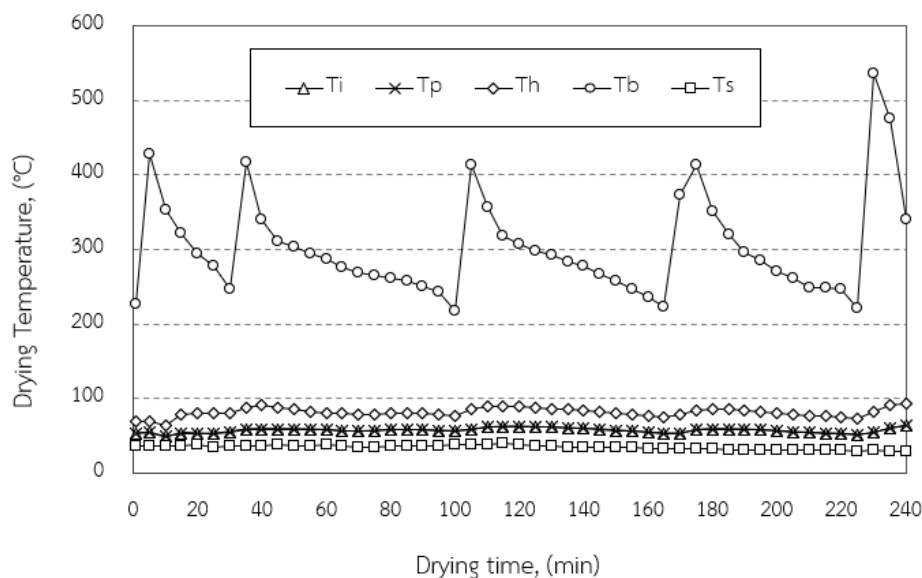
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คือ ค่าดัชนีที่ใช้บ่งชี้การใช้พลังงานของระบบ ซึ่งสามารถวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (4)

$$SEC = \frac{E_{power} + E_{firewood}}{m_w} \quad (4)$$

โดย	SEC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)
	E_{power}	คือ	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
	$E_{firewood}$	คือ	ปริมาณเชื้อเพลิงฟืนที่ใช้ (kg)
	m_w	คือ	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อวัสดุ (kg)

3. ผลการวิจัยและการอภิปราย

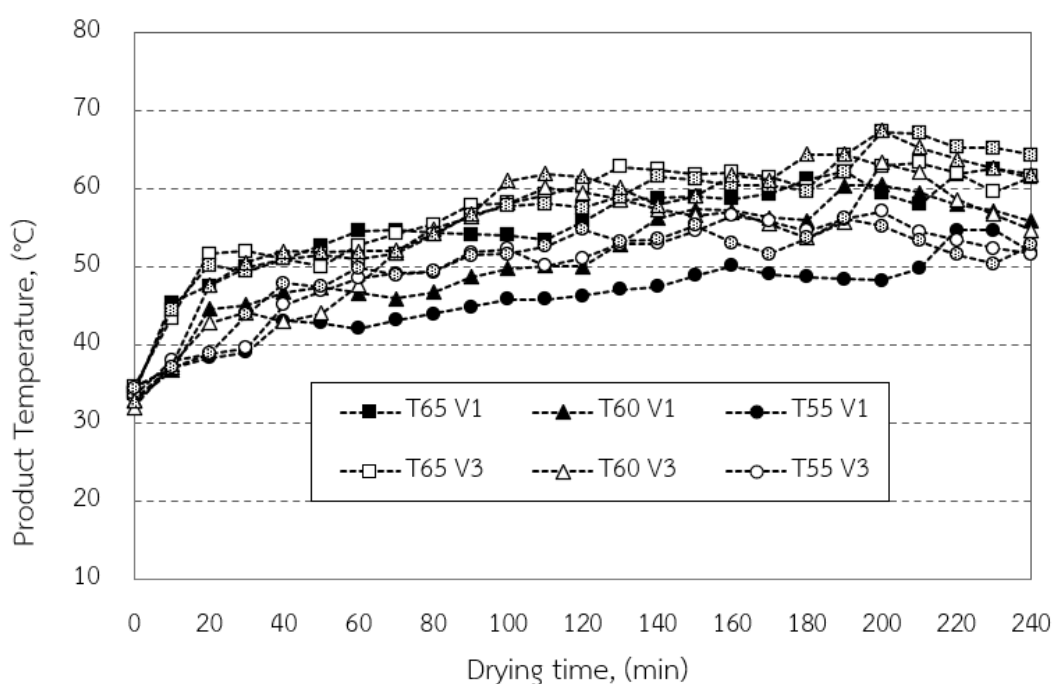
ผลการทดลองที่ได้นำเสนอประกอบด้วยอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ของการทดลองเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ ความชื้นมาตรฐานเปียก อัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ซึ่งได้ทำการแสดงรายละเอียดในภาพที่ 4 – 9



ภาพที่ 4 ผลของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ
เทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ภาพที่ 4 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดสอบเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ประกอบด้วย อุณหภูมิห้องอบแห้ง (Ti) อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ (Tp) อุณหภูมิเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

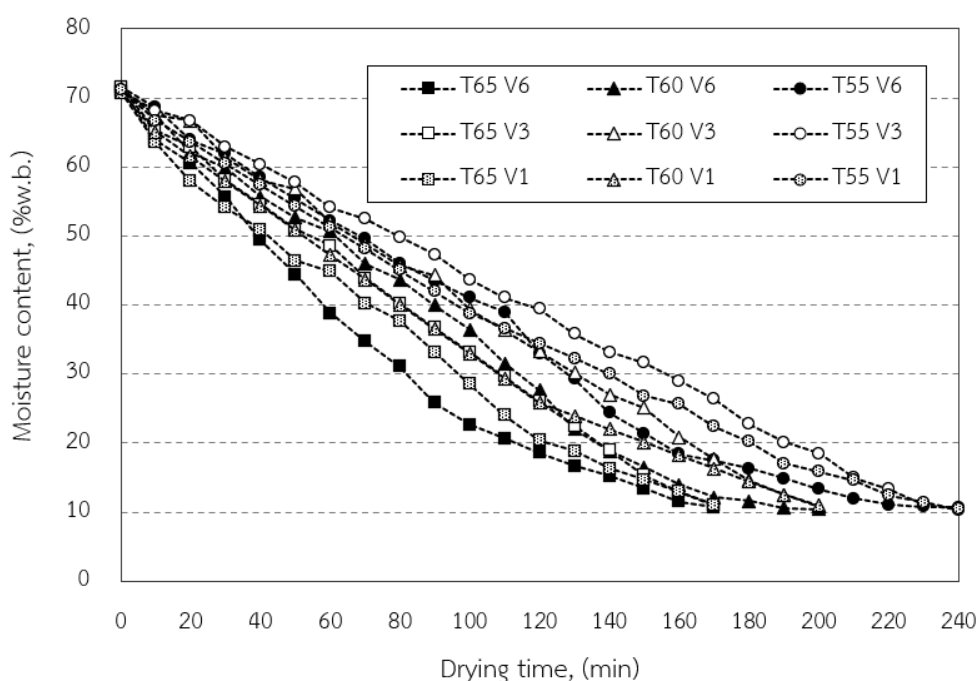
(T_h) อุณหภูมิห้องเผาไหม้ (T_b) และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_s) จากข้อมูลจะพบว่า อุณหภูมิห้องเผาไหม้เฉลี่ย 300°C และถ่ายเทความร้อนไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้มีอุณหภูมิเฉลี่ย 80°C โดยที่อุณหภูมิที่ตำแหน่งห้องเผาไหม้จะมีค่าความร้อนที่สูงขึ้นและลดลง ซึ่งเกิดจากการเติมเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้ส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอย่างรวดเร็วเป็นผลให้พลังงานความร้อนในช่วงของการเติมเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิในห้องเผาไหม้จึงเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไปความร้อนจะค่อยๆ ลดลง และในทำนองเดียวกันเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อได้รับความร้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น และผลที่ตามมาคืออุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงในเวลานั้นๆ นอกจากนี้ความเร็วลมที่เกิดขึ้นภายในห้องอบแห้งยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์
เทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ภาพที่ 5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ดังภาพที่ 4 มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ภายในห้องอบแห้งอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปความร้อนภายในห้องอบแห้งจะมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งเกิดจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้รับความร้อนโดยตรงจากห้องเผาไหม้จึงส่งผลให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการสะสมความร้อนและ

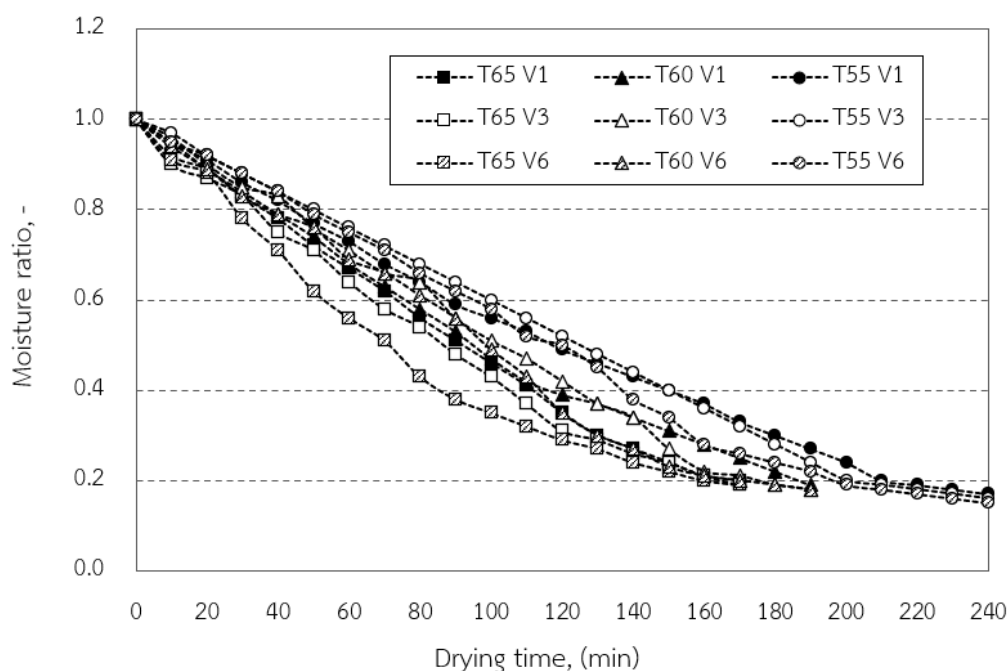
ถ่ายเทความร้อนออกด้านข้างเพื่อแลกเปลี่ยนกับอากาศที่อยู่ในบริเวณดังกล่าวเป็นผลทำให้มีค่าความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งประกอบกับการถ่ายเทความร้อนอยู่ในรูปแบบของการพาความร้อนโดยธรรมชาติ ส่งผลให้การไหลของอากาศร้อนเคลื่อนตัวอย่างช้าๆ และมีเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สูง เป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในห้องอบแห้งเป็นอย่างมาก



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความชื้น
เทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ของความชื้นเทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลพบว่าความชื้นจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยค่าความชื้นมีค่าอยู่ระหว่าง 10 – 75 % w.b. เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในห้องอบแห้งเพิ่มมากขึ้นอัตราการอบแห้งจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นผลดังกล่าวจะทำให้ความชื้นที่อยู่ในผลผลิตภัณฑ์ลดลงมากด้วยเช่นกัน

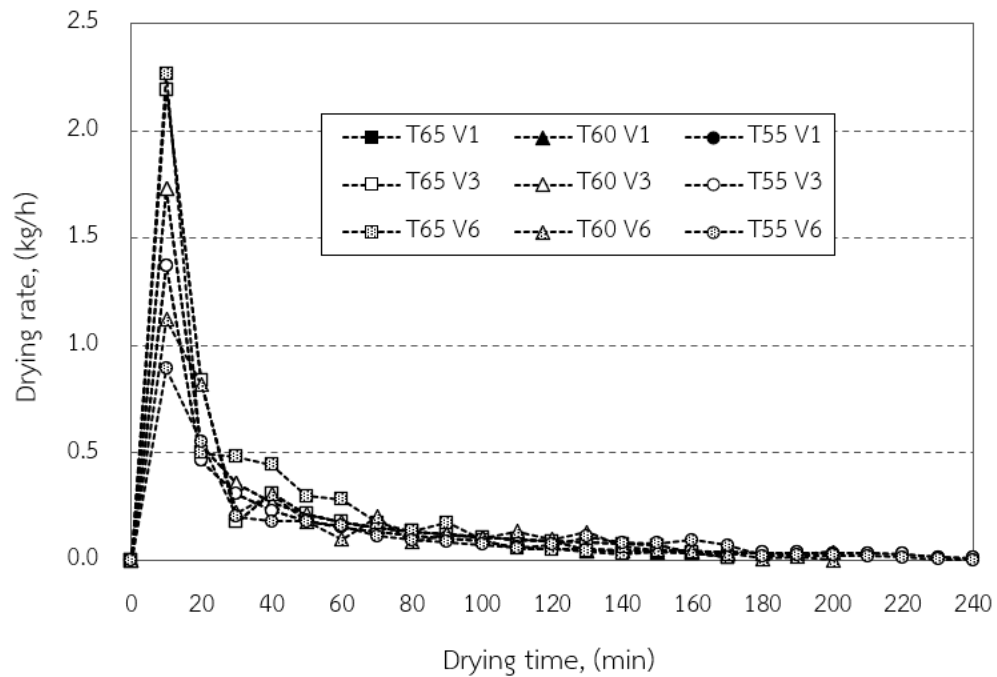
ภาพที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นเทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลการทดลองพบว่า เมื่อพิจารณาอุณหภูมิอบแห้งเท่ากันแต่ความเร็วลมต่างกันจะทำให้อัตราการลดลงของความชื้นเฉลี่ย 3.94 % และในทางตรงกันข้ามเมื่อพิจารณาความเร็วลมเท่ากันแต่อุณหภูมิอบแห้งต่างกันจะทำให้อัตราการลดลงของความชื้นเฉลี่ย 5.0 % และการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นจะเริ่มคงที่เมื่อมีค่าเท่ากับ 0.2



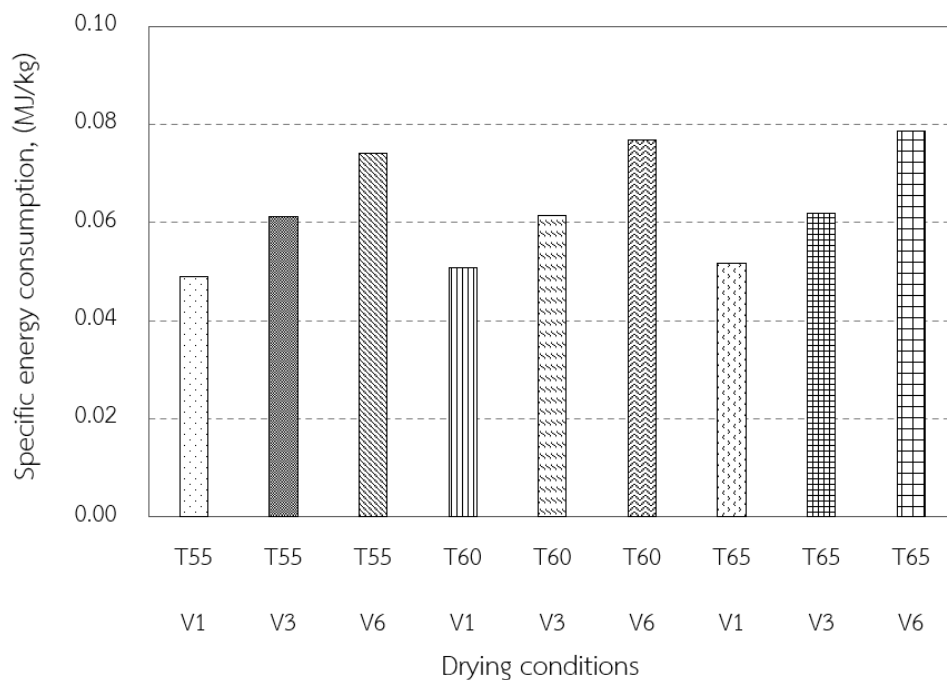
ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้น
เทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ภาพที่ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลพบว่าเงื่อนไขการทดลองอุณหภูมิอบแห้ง 65°C ความเร็วลม 6 m/s จะมีอัตราการอบแห้งสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้นยังพบว่า ทุกเงื่อนไขการทดลองมีอัตราการอบแห้งสูงในช่วง 30 นาทีแรก โดยอุณหภูมิอบแห้ง 65°C ความเร็วลม 6 m/s มีค่าสูงสุด 0.8 kg/h เป็นต้น และหลังจากนั้นจะลดลง โดยมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันในทุกเงื่อนไขการทดลอง โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดเช่นนี้ คือ เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผลต่างอุณหภูมิของอากาศร้อนและผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น เมื่อผลิตภัณฑ์รับความร้อนมากยิ่งขึ้นผลที่เกิดขึ้นตามมาคือการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ก็จะเพิ่มขึ้นตามเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น

ภาพที่ 9 แสดงอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลเมื่อพิจารณาอุณหภูมิอบแห้งเท่ากันแต่ความเร็วลมต่างกันพบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น 20% และเมื่อพิจารณาความเร็วลมเท่ากันแต่อุณหภูมิอบแห้งต่างกันพบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น 2% แสดงให้เห็นว่าความเร็วลมมีผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากกว่าอุณหภูมิอบแห้ง



ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้ง
เทียบกับเวลาในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง



ภาพที่ 9 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

5 สรุปการวิจัย

ผลที่ได้จากการศึกษาการอบแห้งเห็ดด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มี การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งภายในห้องอบแห้งเพื่อป้องกันการรั่วซึม และการ สัมผัสโดยตรงระหว่างเห็ดกับเปลวไฟ พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งหรือความเร็วลมส่งผลทำให้ อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถแสดงให้เห็นว่า เครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงสามารถผลิตเห็ดอบแห้งได้ในทุกช่วงเวลาของการทำงาน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะกรรมการศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยา เขตสุรินทร์ ที่สนับสนุนทุนและอุปกรณ์ในการวิจัยในครั้งนี้

7.เอกสารอ้างอิง

- Bosomtwe, A., Danso, J.K., Osekre, E.A., Opit, G.P., Mbata, G., & Armstrong, P. (2019). Effectiveness of the solar biomass hybrid dryer for drying and disinfestation of maize. **Journal of Stored Products Research**, 83(9), 66-72. Doi: 10.1016/j.jspr.2019.05.011
- Dhanushkodia, S., Vincent, H., Wilsonb, & Sudhakarc, K. (2017). Mathematical modeling of drying behavior of cashew in a solar biomass hybrid dryer. **Resource-Efficient Technologies**, 3(4), 359-364. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.12.002>
- Elieser, T. (2018). Mathematical modeling and simulation of a solar agricultural dryer with back-up biomass burner and thermal storage. **Case Studies in Thermal Engineering**, 12, 149-165. Doi: [10.1016/j.csite.2018.04.012](https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.04.012)
- Fabrice, A.N., & Yvette, J.N. (2017). Modeling and simulated design: A novel model and software of a solar-biomass hybrid dryer. **Computers & Chemical Engineering**, 104, 28–140. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.04.002>
- Gowtham, M., Amrit, O.N., Manoj, T., & Ram, K.G. (2012). Design and analysis of biomass drying unit with waste heat. **Procedia Engineering**, 38, 1161–1165.
- Hamdani, Rizal, T.A., & Zulfri, M. (2018). Fabrication and testing of hybrid solar-biomass dryer for drying fish. **Case Studies in Thermal Engineering**, 12, 489-496. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.06.008>

- Henrik, H., Johan, I., & Risto, L. (2014). Minimization of total drying costs for a continuous packed-bed biomass dryer operating at an integrated chemical pulp and paper mill. **Biomass and Energy**, 71, 431-442.
- Ida, B.A., Gede, B.S., & Made, M.I. (2020). Utilization of rice husk biomass in the conventional corn dryer based on the heat exchanger pipes diameter. **Case Studies in Thermal Engineering**, 22, 100764. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100764>
- Nawshad, H., & Michael, S. (2013). Techno-economic and environmental evaluation of biomass dryer. **Procedia Engineering**, 56, 650-655. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.173>
- Ndukwua, M.C., Diemuodeke, E.O., Abamc, F.I., Abada, U.C., Nnanna, E., & Simo, T.M. (2020). Development and modelling of heat and mass transfer analysis of a low-cost solar dryer integrated with biomass heater. **Application for West African Region Scientific African**. 10, 1-12. Doi: [10.1016/j.sciaf.2020.e00615](https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00615)
- Ndukwu, M.C., Simo, T.M., Abam, F.I., Onwuka, O.S., Prince, S., & Bennamoun, L. (2020). Exergetic sustainability and economic analysis of hybrid solar-biomass dryer integrated with copper tubing as heat exchanger. **Heliyon**, 6(2), 1-12. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03401>
- Pathipat, T., Pakamon, P., & Kajorndaj, P. (2017). Utilization of biomass energy in drying of glutinous rice crackers. **Energy Procedia**, 138, 331-336. Doi: [10.1016/j.egypro.2017.10.131](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.131)
- Rabha, D.K. (2021). Performance investigation of a passive-cum-active dryer with a biomass-fired heater integrated with a plate heat exchanger. **Renewable Energy**, 169, 598-607. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.126>
- Sonthawi, S., Phaochinnawat, C., Kitti, F., Pairoj, K., Anil, K., & Perapong, T. (2016). Computational fluid dynamic analysis of innovative design of solar biomass hybrid dryer: An experimental validation. **Renewable Energy**, 92, 185-191. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.095>
- Sumeet, A., Dipti, P.M., & Shailesh, K.S. (2020). CFD supported performance analysis of an innovative biomass dryer. **Renewable Energy**, 159, 860-872. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.039>



Yahya, M., Ahmad, F., & Kamaruzzaman, S. (2017). Energy and exergy analyses of solar-assisted fluidized bed drying integrated with biomass furnace. **Renewable Energy**, 105, 22-29. Doi: [10.1016/j.renene.2016.12.049](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.049)



การพัฒนาเคลือบหินฟันม้าที่มีทองแดงออกไซด์ ดีบุกออกไซด์
สังกะสีออกไซด์ และแบเรียมคาร์บอเนตเป็นสารเพิ่มเติม
ที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส

THE DEVELOPMENT OF FELDSPAR GLAZE CONTAINING COPPER
OXIDE, TIN OXIDE ZINC OXIDE, AND BARIUM CARBONATE AS
ADDITIVES AT 1,230 DEGREES CELSIUS BURNING

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

วันที่รับระบบ 30 มีนาคม 2565

วันที่แก้ไขบทความ 30 เมษายน 2565

วันที่ตอบรับบทความ 30 เมษายน 2565

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาการเกิดสีของเคลือบ ทดสอบค่าสีและความสว่างของเคลือบ 2) เพื่อศึกษาลักษณะและความสมบูรณ์ของผิวเคลือบโดยกำหนดเคลือบที่มีดีบุกออกไซด์ สังกะสีออกไซด์ และแบเรียมคาร์บอเนตเป็นสารเพิ่มเติม โดยสุ่มแบบเจาะจงจากตารางสามเหลี่ยม จำนวน 10 สูตรส่วนผสม และใช้ทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติม ร้อยละ 1 ร้อยละ 3 และร้อยละ 5 ทุกส่วนผสม เเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศแบบออกซิเดชั่น ผลการวิจัยพบว่า (1) การเกิดสีของเคลือบหินฟันม้า มี 2 โทน ได้แก่ 1) โทนเขียวอมสีฟ้า ได้แก่ สูตรที่ 1-3 มีปริมาณทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติม ร้อยละ 1 2) โทนสีเขียว ได้แก่ สูตรที่ 1-3 มีปริมาณทองแดงออกไซด์เป็นสารเพิ่มเติม ร้อยละ 3-5 และสูตรที่ 4-10 ที่มีปริมาณทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติม ร้อยละ 1-5 (2) เคลือบหินฟันม้ามีค่า a^* เฉลี่ยอยู่ที่ -9.65 ถึง -11.10 มีค่า b^* เฉลี่ยอยู่ที่ +12.77 ถึง +16.64 และมีค่า L^* เฉลี่ยอยู่ที่ +50.80 ถึง +24.30 (3) ลักษณะของเคลือบหินฟันม้ามีความมันแวววาวทุกสูตรส่วนผสม และผิวเคลือบมีความสมบูรณ์โดยไม่มีตำหนิทุกสูตรส่วนผสม (4) เคลือบหินฟันม้าที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยวัตถุดิบดังต่อไปนี้ หินฟันม้า ร้อยละ 45 โดโลไมท์ ร้อยละ 10 แคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 13 ดินขาว ร้อยละ 07 หินเขียวหนุมาน ร้อยละ 25 มีส่วนผสมของดีบุกออกไซด์ ร้อยละ 2-8 สังกะสีออกไซด์ ร้อยละ 1-7 แบเรียมคาร์บอเนต ร้อยละ 1-7 และสามารถใช้ทองแดงออกไซด์ ต่อเคลือบหินฟันม้าที่มีดีบุกออกไซด์ สังกะสีออกไซด์ และแบเรียมคาร์บอเนตเป็นสารเพิ่มเติม ตั้งแต่ ร้อยละ 1-5

คำสำคัญ: เคลือบหินฟีนมา, สารเพิ่มเติม, เซรามิกส์

Abstract

The objectives of this paper aim 1) to study the effects of Feldspar glazing on glaze color and brightness, 2) to study the physical qualifications of Feldspar glazing with Tin Oxide, Zinc Oxide, and Barium Carbonate as additives. The sampling plan is used in the experiment by sampling diagram from Triaxial diagram which the suitable number of experiments is 10 mixtures and each mixture includes 1%, 3%, and 5% of Copper Oxide. The characteristic of physical qualifications has been studied after burning at 1,230 Degrees Celsius under an oxidation atmosphere. The results of this research showed that (1) The color from Feldspar glaze consists of two-color tones which are turquoise and green tones. Turquoise colors shown in mixture 1-3 that has 1% of Copper Oxide, while green colors shown in mixture 1-3 that has 3-5% of Copper Oxide, and mixture 4-10 that has 1-5% of Copper Oxide. (2) The color glazing from Feldspar according to the color chart is at a* shade which has the average at -9.65 to -11.10, at b* shade which has the average at +12.77 to +16.64, and at L* shade which has the average at +50.80 to +24.30. (3) The physical qualifications from Feldspar glaze showed complete and glossy characteristic in every mixture. (4) The developed Feldspar glaze consists of constituents such as 45% of Potash Feldspar, 10% of Dolomite, 13% of Calcium Carbonate, 7% of Kaolin, 25% of Quartz, 2-8% of Tin Oxide, 1-7% of Zinc Oxide, 1-7% of Barium Carbonate, and 1-5% of Copper Oxide can be used in Feldspar glaze that contains Tin Oxide, Zinc Oxide, and Barium Carbonate as the additives.

Keywords: Feldspar Glazing, Additives, Ceramics

1.บทนำ

น้ำเคลือบ เป็นสารประกอบอย่างหนึ่งซึ่งประกอบด้วยสารประกอบพวก กรด ต่างและกลาง ผสมกันตามสูตรส่วนผสมแล้วนำมาเคลือบลงบนผลิตภัณฑ์ที่ทำจากดินแล้วนำไปเผาให้ความร้อน จนถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างพวกกรด ต่าง และกลางกลายเป็น สารประกอบเชิงซ้อนของอะลูมิโนซิลิเกต (Alumino silicate) ที่มีลักษณะหลอมตัวจนกลายเป็นแก้ว เกาะติดอยู่บนผิวผลิตภัณฑ์ (สมศักดิ์, 2549) ซึ่งการเคลือบผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ จะทำให้ภาชนะมี

ความแข็งแรง ทนทาน รวมทั้งสามารถทนทานต่อสารเคมี กรดต่าง และการเสียดสี มีความสวยงาม น่าใช้ สะดวกในการล้างทำความสะอาด สามารถป้องกันไม่ให้ของเหลวและแก๊สไหลผ่านได้ สามารถปิดบังผิวดินได้ดี (สุขุมาล, 2548)

ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์มีความสวยงามยิ่งขึ้นการใช้ออกไซด์ (Oxide) ผสมในเคลือบ ถือเป็นวัตถุดิบที่สำคัญที่จะช่วยให้เคลือบผลิตภัณฑ์เซรามิกส์มีความสวยงาม มีความหลากหลาย น่าสนใจ และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค ออกไซด์บางชนิดอาจให้สีได้หลายสี เมื่อเผาในอุณหภูมิและบรรยากาศการเผาที่แตกต่างกัน รวมถึงการผสมกับออกไซด์ของโลหะชนิดอื่น ๆ ก็สามารถให้สีที่แตกต่างกันด้วยเช่นกัน เช่น ทองแดงออกไซด์ (Copper oxide) เมื่อเผาในบรรยากาศแบบออกซิเดชัน (Oxidation) จะให้สีเขียว ดีบุกออกไซด์ (Tin oxide) และ สังกะสีออกไซด์ (Zinc oxide) เป็นสารที่ให้สีขาวและทำให้เกิดการทึบในเนื้อเคลือบ (ไพจิตร, 2546) และพบว่าเมื่อใช้สังกะสีออกไซด์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในเคลือบหลายๆชนิดจะทำให้หน้าที่เป็นตัวลดจุดหลอมตัวของเคลือบ ทำให้เคลือบมีความมันวาวยิ่งขึ้น เคลือบ ไม่รানตัว และได้ผิวเคลือบที่มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ส่วนแบเรียมคาร์บอเนต (Barium carbonate) ใช้ผสมน้ำเคลือบเป็น ฟลักซ์ (Flux) ที่ช่วยให้เคลือบหลอมละลายได้ดี แต่ถ้าใช้ในอัตราส่วนผสมน้ำเคลือบที่สูงจะทำให้เคลือบด้านได้ ถือเป็นตัวลดจุดหลอมตัวของเคลือบที่รุนแรง ช่วยทำให้เคลือบ มีดัชนีหักเหแสงสูงขึ้น ทำให้เคลือบสุกใสมีความมันวาวมากยิ่งขึ้น (ปริดา, 2547)

จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงสนใจที่จะพัฒนาสูตรเคลือบหินฟันม้าที่มี ทองแดงออกไซด์ ดีบุกออกไซด์ สังกะสีออกไซด์ และ แบเรียมคาร์บอเนต เป็นสารเพิ่มเติมที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส ซึ่งผลที่ได้จากทดลองวิจัยสามารถนำสูตรเคลือบที่พัฒนาขึ้นไปเคลือบผลิตภัณฑ์ประเภทสโตนแวร์ (Stoneware) และสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปถ่ายทอดเกี่ยวกับแนวทางในการพัฒนาสูตรเคลือบสู่วิสาหกิจชุมชน สถานประกอบการอุตสาหกรรมด้านเซรามิกส์ได้ต่อไป

2.วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาการเกิดสีของเคลือบ ทดสอบค่าสีและความสว่างของเคลือบหินฟันม้า
- 2.2 เพื่อศึกษาลักษณะและความสมบูรณ์ของผิวเคลือบหินฟันม้า

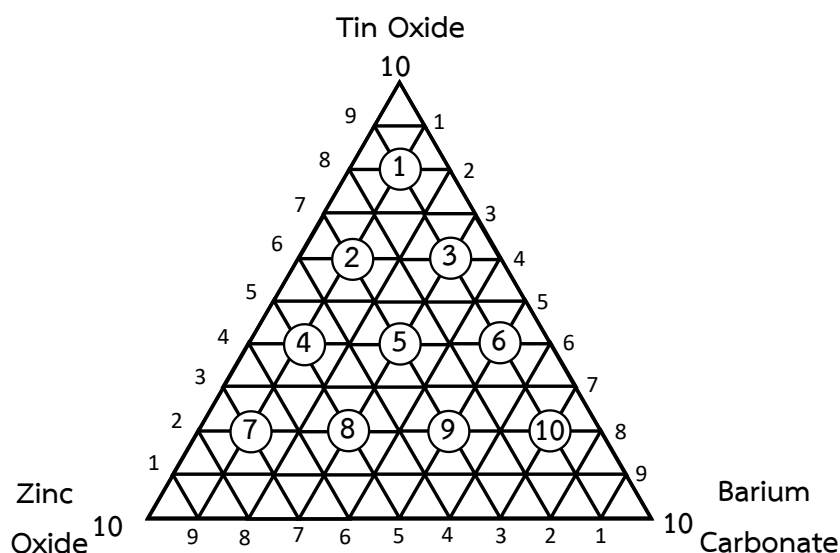
3.วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาเคลือบหินฟันม้าที่มีทองแดงออกไซด์ ดีบุกออกไซด์ สังกะสีออกไซด์ และ แบเรียมคาร์บอเนต เป็นสารเพิ่มเติมที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียสในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีการดำเนินการวิจัย ไว้ 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาการเกิดสีของเคลือบ ทดสอบค่าสีและความสว่างของเคลือบหินพื้นม้า มีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

1. กำหนดสูตรเคลือบหินพื้นม้าพื้นฐานที่ใช้ในการผสม ได้แก่ หินพื้นม้า ร้อยละ 45 โดโลไมท์ ร้อยละ 10 แคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 13 ดินขาว ร้อยละ 7 และ หินเขียวหนุมาน ร้อยละ 25

2. กำหนดให้มีอัตราส่วนผสมของ ดีบุกออกไซด์ สังกะสีออกไซด์ และ แบเรียมคาร์บอเนต เป็นสารเพิ่มเติมในเคลือบพื้นฐาน จำนวน 10 สูตรส่วนผสม โดยกำหนดส่วนผสมในการทดลองแบบเจาะจง (Purposive sampling) และคำนวณหาอัตราส่วนผสมจากตารางสามเหลี่ยม (Triaxial Diagram) (Singer, 1963, p.398) ดังภาพที่ 1 และ สามารถอ่านค่าได้ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 1 การกำหนดอัตราส่วนผสมจากตารางสามเหลี่ยม

3. กำหนดอัตราส่วนของทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติมในเคลือบหินพื้นม้าทุกสูตรส่วนผสม จำนวน 3 ช่วง ได้แก่ ร้อยละ 1 ร้อยละ 3 และ ร้อยละ 5

4. ชั่งส่วนผสมทั้งหมดด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัล (0.001g) และบดผสมด้วยเครื่องบดผสมความเร็วสูง (Hi-speed) ขนาดเล็ก สูตรละ 5 นาที

5. ขึ้นรูปแผ่นทดลอง (Test pieces) ด้วยดินสโตนแวร์สำเร็จรูปของบริษัท พอทเทอรี เคลย์ จำกัด (Pottery Clay) แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

6. ชุบเคลือบแผ่นทดลองโดยใช้เวลาในการชุบเคลือบบนแผ่นทดลอง 3 วินาที

ตารางที่ 1 อัตราส่วนการใช้วัตถุดิบจากตารางสามเหลี่ยม

สูตรส่วนผสมที่	ดิบออกไซด์	สังกะสีออกไซด์	แบเรียมคาร์บอเนต
1	8	1	1
2	6	3	1
3	6	1	3
4	4	5	1
5	4	3	3
6	4	1	5
7	2	7	1
8	2	5	3
9	2	3	5
10	2	1	7

7. เผาแผ่นทดลองที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศออกซิเดชันด้วยเตาไฟฟ้า และเผาขึ้นไฟ เป็นเวลา 15 นาที วัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไพโรเมตริกเทอร์โมคัปเปิล (Pyrometric thermocouple) และนำแผ่นทดลองออกจากเตาเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส

8. วิเคราะห์การเกิดสีของเคลือบด้วยตาเปล่า และทดสอบค่าสี ความสว่างของเคลือบหินฟันม้าโดยใช้เครื่องวัดค่าสี (Color measuring) ด้วยเครื่อง Chroma Meter 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 แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว ($-a^*$) ไปจนถึงแดง ($+a^*$) ส่วนแกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน ($-b^*$) ไปเหลือง ($+b^*$)

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาลักษณะและความสมบูรณ์ของผิวเคลือบหินฟันม้า มีขั้นตอนดังนี้

1. นำแผ่นทดลองที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาศึกษาลักษณะและความสมบูรณ์ของผิวเคลือบหินฟันม้า
2. วิเคราะห์ลักษณะของผิวเคลือบด้วยตาเปล่า โดยกำหนดระดับความมันของเคลือบเป็น 4 ระดับได้แก่ 1) เคลือบมันแวววาว (Bright) 2) เคลือบกึ่งมันกึ่งด้าน (Semi mat) 3) เคลือบด้าน (Mat) 4) เคลือบไม่ถึงจุดสุกตัว (Un fused)



3. วิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบ โดยที่ผิวเคลือบที่สมบูรณ์ต้องไม่มีตำหนิ 7 ลักษณะ ได้แก่ 1) รูเข็ม (Pinhole) หมายถึง รูเล็ก ๆ ที่เกิดบนผิวเคลือบ 2) การราน (Crazing) หมายถึง ลักษณะเป็นเส้นตาข่ายเรียกว่าเคลือบแตกลายงา 3) การแตกร่อนบริเวณริมขอบ (Shivering) หมายถึง เคลือบที่ไม่ติดตามริมขอบผลิตภัณฑ์ 4) การร่อนออกจากเนื้อดินปั้น (Peeling) หมายถึง เคลือบที่ร่อนออกมาเป็นแผ่น ๆ จากผลิตภัณฑ์ 5) การแยกตัวออกจากกันของเคลือบ (Crawling) หมายถึง เคลือบที่แยกออกจากกันทำให้เคลือบว่าง ไม่มีเคลือบต่อ 6) เคลือบไหลตัวมาก (Running of glaze) หมายถึง เคลือบที่ไหลตัวออกจากผลิตภัณฑ์ไปกองอยู่รอบๆ บนแผ่นรวมผลิตภัณฑ์ในเตา และ 7) เคลือบด้านไม่ตรงกับความเป็นจริง (Loss of glaze) เคลือบที่เกิดการสูญเสียของส่วนผสมของเคลือบ ซึ่งอาจเกิดจากการเผาอุณหภูมิเกิน ทำให้สารบางอย่างที่ระเหยได้ง่ายระเหยไปหมด

4. ผลการวิจัย

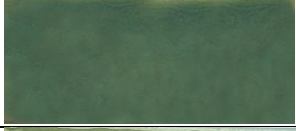
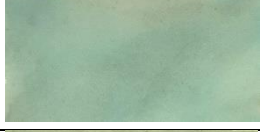
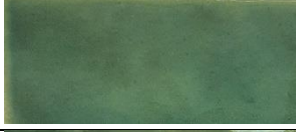
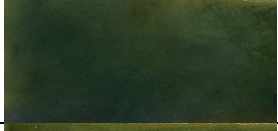
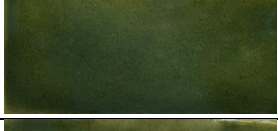
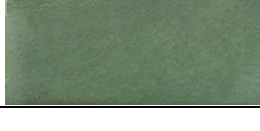
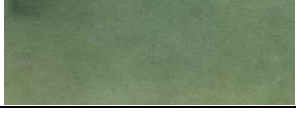
การพัฒนาเคลือบหินพื้นม้าที่มีทองแดงออกไซด์ ดีบุกออกไซด์ สังกะสีออกไซด์ และ แบเรียมคาร์บอเนต เป็นสารเพิ่มเติมที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียสในครั้งนี้ ภายหลังจากดำเนินการทดลอง มีผลตามวัตถุประสงค์การวิจัย ดังนี้

1. ผลการศึกษาการเกิดสีของเคลือบ ทดสอบค่าสีและความสว่างของเคลือบหินพื้นม้า ซึ่งมีรายละเอียดผลการศึกษาวิจัย แยกเป็น 2 ข้อ ดังนี้

1.1 ผลการวิเคราะห์การเกิดสีของเคลือบภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส มีผลการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 2 พบว่า การเกิดสีของเคลือบ มี 2 โทน ได้แก่ 1) โทนเขียวอมสีฟ้า ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 1-3 ที่มีปริมาณทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติม ร้อยละ 1 และ 2) โทนสีเขียว ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 1-3 ที่มีปริมาณทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติม ร้อยละ 3-5 และ สูตรส่วนผสมที่ 4-10 ที่มีปริมาณทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติมร้อยละ 1-5

1.2 ผลการทดสอบค่าสีและความสว่างของเคลือบหินพื้นม้าภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส ทดสอบด้วยเครื่อง Chroma Meter รุ่น CR-400 ในระบบสเกลสี (Color scale) ของ Hunter Lab Scale โดยมีผลการทดสอบ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 การเกิดสีของเคลือบภายหลังจากการเผา

สูตรส่วนผสมที่	ปริมาณทองแดงออกไซด์ (ร้อยละ)		
	ร้อยละ1	ร้อยละ3	ร้อยละ5
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			



ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่าสีและความสว่างของเคลือบ

สูตร ที่	ปริมาณทองแดงออกไซด์ (ร้อยละ)								
	ร้อยละ 1			ร้อยละ 3			ร้อยละ 5		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	+54.18	-10.12	+8.84	+41.49	-10.39	+14.40	+27.91	-10.21	+12.85
2	+53.13	-11.35	+8.43	+38.04	-12.70	+9.69	+23.70	-10.74	+10.64
3	+53.69	-13.82	+5.02	+41.51	-9.85	+16.55	+27.77	-10.37	+15.05
4	+53.28	-6.48	+16.37	+41.46	-9.22	+18.91	+25.63	-10.45	+13.66
5	+51.63	-10.59	+11.93	+35.83	-12.52	+14.78	+27.78	-10.20	+16.91
6	+52.68	-8.07	+14.70	+35.86	-12.42	+15.35	+24.46	-9.75	+14.55
7	+49.13	-10.89	+17.34	+31.70	-11.24	+21.96	+24.48	-9.37	+19.90
8	+45.83	-11.15	+14.93	+32.35	-11.72	+20.23	+23.19	-8.99	+14.97
9	+45.88	-9.46	+15.10	+33.31	-12.61	+17.33	+18.81	-7.25	+11.62
10	+48.65	-7.92	+15.09	+35.68	-8.42	+17.27	+19.35	-9.26	+14.40
เฉลี่ย	+50.80	-9.98	+12.77	+36.72	-11.10	+16.64	+24.30	-9.65	+14.45

จากตารางที่ 3 พบว่า ค่าสี a^* และ ค่า b^* และ ค่าความสว่าง L^* มีผลการทดสอบดังนี้

(1) ผลการทดสอบค่าสี (a^* b^*) สูตรที่มีปริมาณทองแดงออกไซด์เป็นสารเพิ่มเติมร้อยละ 1 โดยมีค่า a^* เฉลี่ยอยู่ที่ -9.98 ซึ่งสูตรที่มีค่า a^* สูงสุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 3 (-13.82) และค่า a^* ต่ำสุด ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 4 (-6.48) และ มีค่า b^* เฉลี่ยอยู่ที่ +12.77 ซึ่งสูตรที่มีค่า b^* สูงสุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 7 (+17.34) และ ค่า b^* ต่ำสุด ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 3 (+5.02) และผลการทดสอบค่าความสว่าง (L^*) พบว่า มีค่า L^* เฉลี่ยอยู่ที่ +50.80 ซึ่งสูตรที่มีค่า L^* สูงสุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 1 (+54.18) และ ค่า L^* ต่ำสุด ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 8 (+45.83)

(2) ผลการทดสอบค่าสี (a^* b^*) สูตรที่มีปริมาณทองแดงออกไซด์เป็นสารเพิ่มเติมร้อยละ 3 โดยมีค่า a^* เฉลี่ยอยู่ที่ -11.10 ซึ่งสูตรที่มีค่า a^* สูงสุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 2 (-12.70) และค่า a^* ต่ำสุด ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 10 (-8.42) และ มีค่า b^* เฉลี่ยอยู่ที่ +16.64 ซึ่งสูตรที่มีค่า b^* สูงสุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 7 (+21.96) และ ค่า b^* ต่ำสุด ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 2 (+9.69) และผลการทดสอบค่าความสว่าง (L^*) พบว่า มีค่า L^* เฉลี่ยอยู่ที่ +36.72 ซึ่งสูตรที่มีค่า L^* สูงสุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 3 (+41.51) และ ค่า L^* ต่ำสุด ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 7 (+31.70)



(3) ผลการทดสอบค่าสี (a^* b^*) สูตรที่มีปริมาณทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติม ร้อยละ 5 โดยมีค่า a^* เฉลี่ยอยู่ที่ -9.65 ซึ่งสูตรที่มีค่า a^* สูงสุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 2 (-10.74) และ ค่า a^* ต่ำสุด ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 9 (-7.25) และ มีค่า b^* เฉลี่ยอยู่ที่ +14.45 ซึ่งสูตรที่มีค่า b^* สูงสุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 9 (+19.90) และ ค่า b^* ต่ำสุด ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 2 (+10.64) และ ผลการทดสอบค่าความสว่าง (L^*) พบว่า มีค่า L^* เฉลี่ยอยู่ที่ +24.30 ซึ่งสูตรที่มีค่า L^* สูงสุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 1 (+27.91) และ ค่า L^* ต่ำสุด ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 9 (+18.81)

(4) ระดับค่าความสว่าง L^* ต่อปริมาณของทองแดงออกไซด์ พบว่า ค่า L^* จะแปรผันตามปริมาณการใช้ทองแดงออกไซด์เป็นสารเพิ่มเติม ซึ่งพบว่า การใช้ทองแดงออกไซด์เป็นสารเพิ่มเติม ร้อยละ 5 จะมีค่า L^* ต่ำ โดยมีค่า L^* เฉลี่ยอยู่ที่ +24.30 ส่วนสูตรที่มีทองแดงออกไซด์เป็นสารเพิ่มเติม ร้อยละ 1 จะมีค่า L^* สูง โดยมีค่า L^* เฉลี่ยอยู่ที่ +50.80

2. ผลการศึกษาลักษณะและความสมบูรณ์ของผิวเคลือบหินพื้นม้า ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส มีผลการศึกษาดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ลักษณะและความสมบูรณ์ของเคลือบภายหลังจากการเผา

สูตร ส่วนผสมที่	ลักษณะของผิวเคลือบ			ความสมบูรณ์ของเคลือบ		
	ปริมาณทองแดงออกไซด์ (ร้อยละ)					
	ร้อยละ1	ร้อยละ3	ร้อยละ5	ร้อยละ1	ร้อยละ3	ร้อยละ5
1	มันแวววาว	มันแวววาว	มันแวววาว	สมบูรณ์	สมบูรณ์	สมบูรณ์
2	มันแวววาว	มันแวววาว	มันแวววาว	สมบูรณ์	สมบูรณ์	สมบูรณ์
3	มันแวววาว	มันแวววาว	มันแวววาว	สมบูรณ์	สมบูรณ์	สมบูรณ์
4	มันแวววาว	มันแวววาว	มันแวววาว	สมบูรณ์	สมบูรณ์	สมบูรณ์
5	มันแวววาว	มันแวววาว	มันแวววาว	สมบูรณ์	สมบูรณ์	สมบูรณ์
6	มันแวววาว	มันแวววาว	มันแวววาว	สมบูรณ์	สมบูรณ์	สมบูรณ์
7	มันแวววาว	มันแวววาว	มันแวววาว	สมบูรณ์	สมบูรณ์	สมบูรณ์
8	มันแวววาว	มันแวววาว	มันแวววาว	สมบูรณ์	สมบูรณ์	สมบูรณ์
9	มันแวววาว	มันแวววาว	มันแวววาว	สมบูรณ์	สมบูรณ์	สมบูรณ์
10	มันแวววาว	มันแวววาว	มันแวววาว	สมบูรณ์	สมบูรณ์	สมบูรณ์

จากตารางที่ 4 พบว่า ลักษณะของเคลือบหินพื้นม้ามีความมันแวววาวทุกสูตรส่วนผสม และผิวเคลือบมีความสมบูรณ์ทุกสูตรส่วนผสม

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาเคลือบหินพื้นม้าที่มีทองแดงออกไซด์ ดิบบุกออกไซด์ สังกะสีออกไซด์ และแบเรียมคาร์บอเนต เป็นสารเพิ่มเติมที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ผลการศึกษาการเกิดสีของเคลือบ ทดสอบค่าสีและความสว่างของเคลือบหินพื้นม้า สามารถสรุปผลการศึกษาวิจัย แยกเป็น 2 ข้อ ได้ดังนี้

1.1 การเกิดสีของเคลือบภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส มีผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้ การเกิดสีของเคลือบ มี 2 โทน ได้แก่ 1) โทนเขียวอมสีฟ้า ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 1-3 ที่มีปริมาณทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติม ร้อยละ 1 และ 2) โทนสีเขียว ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 1-3 ที่มีปริมาณทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติม ร้อยละ 3-5 และ สูตรส่วนผสมที่ 4-10 ที่มีปริมาณทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติม ร้อยละ 1-5 ซึ่งการเกิดสีของเคลือบดังกล่าวจะเกิดตามปริมาณการใช้ทองแดงออกไซด์และดิบบุกออกไซด์เป็นสารเพิ่มเติม

1.2 การทดสอบค่าสีและความสว่างของเคลือบหินพื้นม้าภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส มีผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้ 1) ผลการทดสอบค่าสี (a^* b^*) สูตรที่มีปริมาณทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติม ร้อยละ 1 มีค่า a^* เฉลี่ยอยู่ที่ -9.98 และมีค่า b^* เฉลี่ยอยู่ที่ +12.77 และผลการทดสอบค่าความสว่าง (L^*) มีค่า L^* เฉลี่ยอยู่ที่ +50.80 2) ผลการทดสอบค่าสี (a^* b^*) สูตรที่มีปริมาณทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติม ร้อยละ 3 มีค่า a^* เฉลี่ยอยู่ที่ -11.10 และมีค่า b^* เฉลี่ยอยู่ที่ +16.64 และผลการทดสอบค่าความสว่าง (L^*) มีค่า L^* เฉลี่ยอยู่ที่ +36.72 3) ผลการทดสอบค่าสี สูตรที่มีปริมาณทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติม ร้อยละ 5 มีค่า a^* เฉลี่ยอยู่ที่ -9.65 และมีค่า b^* เฉลี่ยอยู่ที่ +14.45 และผลการทดสอบค่าความสว่าง (L^*) มีค่า L^* เฉลี่ยอยู่ที่ +24.30 4) การทดสอบค่าความสว่าง (L^*) พบว่า สูตรเคลือบที่มีค่า L^* สูงสุดได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 1 (+54.18) และ ค่า L^* ต่ำสุด ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 9 (+18.81)

2. ผลการศึกษาลักษณะและความสมบูรณ์ของผิวเคลือบหินพื้นม้า ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส มีผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้ ลักษณะและความสมบูรณ์ของเคลือบพบว่า ลักษณะของเคลือบมีความมันแวววาว ทุกสูตรส่วนผสม และผิวเคลือบมีความสมบูรณ์ทุกสูตรส่วนผสม ซึ่งมาจากส่วนผสมของวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายในเคลือบหินพื้นม้า เช่น สังกะสีออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต โดโลไมท์ และ แคลเซียมคาร์บอเนตในส่วนผสมของเคลือบ

โดยสรุปเคลือบหินพื้นม้าที่มีส่วนผสมระหว่างดิบบุกออกไซด์ สังกะสีออกไซด์ และแบเรียมคาร์บอเนต เป็นสารเพิ่มเติม และทำการเผาที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศแบบออกซิเดชันแล้วผิวเคลือบมันแวววาวและไม่มีตำหนิ ประกอบด้วยวัตถุดิบดังต่อไปนี้ หินพื้นม้า ร้อยละ 45 โดโลไมท์ ร้อยละ 10 แคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 13 ดินขาว ร้อยละ 7 หินเขี้ยวหนุमान ร้อย

ละ 25 โดยใช้สารเพิ่มเติมได้แก่ ดีบุกออกไซด์ ร้อยละ 2 ถึง ร้อยละ 8 สังกะสีออกไซด์ ร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 7 แบเรียมคาร์บอเนต ร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 7 และการใช้ทองแดงออกไซด์ ต่อเคลือบ หินฟันม้าที่มีดีบุกออกไซด์ สังกะสีออกไซด์ และ แบเรียมคาร์บอเนต เป็นสารเพิ่มเติม และเผาที่ อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส ที่มีความเหมาะสมมีอัตราส่วนผสมของทองแดงออกไซด์ เป็นสาร เพิ่มเติม ตั้งแต่ ร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 5

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

การพัฒนาเคลือบหินฟันม้าที่มีทองแดงออกไซด์ ดีบุกออกไซด์ สังกะสีออกไซด์ และ แบเรียมคาร์บอเนต เป็นสารเพิ่มเติมที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียสในครั้งนี้ สามารถอภิปราย ผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาการเกิดสีของเคลือบ ทดสอบค่าสีและความสว่างของเคลือบหินฟันม้า

1.1 การเกิดสีของเคลือบหินฟันม้า มี 2 โทน ได้แก่ 1) โทนเขียวอมสีฟ้า 2) โทนสี เขียว โดยในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติม ซึ่งโทนสีที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับ ไพจิตร อังศิริวัฒน์ (2546) ที่ได้กล่าวว่า การให้สีของทองแดงออกไซด์ ในบรรยากาศ ออกซิเดชันที่ ทำปฏิกิริยากับต่างในเคลือบที่มีลูมินาต่ำสามารถให้สีฟ้า และสีเขียวอมฟ้า และสอดคล้องกับ สุขุมาล เล็กสวัสดิ์ (2548) ที่กล่าวว่า ใช้ทองแดงออกไซด์ ร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 3 สีที่ได้จากเคลือบ แอลคาไลน์จะเป็นสีแบบเทอร์คอยซ์ (Turquoise) สอดคล้องกับ ปรีดา พิมพ์ขาวขำ (2547) ที่กล่าว ว่า เมื่อใช้ทองแดงออกไซด์ ร่วมกับดีบุกออกไซด์ จะได้เคลือบสีน้ำทะเล และสอดคล้องกับงานวิจัย ของ ณัฐนันท์ บัวงาม (2553) ที่สูตรเคลือบสีฟ้า น้ำทะเลและสีฟ้าคราม โดยใช้สารเพิ่มเติมในสูตร เคลือบ ได้แก่ ทองแดงออกไซด์ ร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 3 และ ดีบุกออกไซด์ ร้อยละ 4 และการเกิดสีใน กลุ่มที่ให้โทนสีเขียว สอดคล้องกับ สุขุมาล เล็กสวัสดิ์ (2548) และสมศักดิ์ ขวาลาวณ์ (2549) ที่ได้ กล่าวว่า ทองแดงออกไซด์มีผงสีดำแต่ให้สีในโทนสีเขียวอ่อนถึงเขียวแก่เมื่อเผาในบรรยากาศการเผา แบบออกซิเดชัน และสอดคล้องกับงานวิจัยของ ภารดี พันธุภากร และ เสกสรรค์ ตันยาภิรมย์ (2542) ที่พบว่า กลุ่มเคลือบที่ใช้ทองแดงออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติมเคลือบจะมีสีเขียว หัวเปิด

1.2 ค่าสี (a^* b^*) และความสว่าง (L^*) ของเคลือบหินฟันม้าที่พัฒนาขึ้น พบว่า เคลือบ มีค่า a^* เฉลี่ยอยู่ที่ -9.65 ถึง -11.10 มีค่า b^* เฉลี่ยอยู่ที่ +12.77 ถึง +16.64 และมีค่า L^* เฉลี่ยอยู่ที่ +50.80 ถึง +24.30 ซึ่งมีผลการทดสอบสอดคล้องกับปริมาณการใช้ทองแดงออกไซด์ เป็น สารเพิ่มเติมในเคลือบ โดยที่เมื่อใช้ปริมาณทองแดงออกไซด์ น้อย ค่า a^* b^* จะน้อยตามลำดับ ส่วน ค่าความสว่างของเคลือบเมื่อใช้ทองแดงออกไซด์ ปริมาณน้อย ค่า L^* จะสูงตามลำดับ

2. ลักษณะและความสมบูรณ์ของผิวเคลือบหินฟันม้า ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส สามารถอภิปรายผลการวิจัยได้ดังนี้ ลักษณะของเคลือบหินฟันม้ามีความมัน

แวววาวทุกสูตรส่วนผสม และผิวเคลือบมีความสมบูรณ์โดยไม่มีตำหนิทุกสูตรส่วนผสม ซึ่งลักษณะของเคลือบหินฟันม้าที่พัฒนาขึ้นจะมีส่วนผสมของวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายในเคลือบหินฟันม้า ได้แก่ หินฟันม้า โดโลไมท์ แคลเซียมคาร์บอเนต สังกะสีออกไซด์ และ แบเรียมคาร์บอเนต ซึ่งสอดคล้องกับ ไพจิตร อังศิริวัฒน์ (2547) ที่กล่าวว่าหินฟันม้าเป็นวัตถุดิบที่มีจุดหลอมละลาย ระหว่าง 1,180-1,200 องศาเซลเซียส และใช้เป็นวัตถุดิบหลักในสูตรเคลือบ ระหว่าง ร้อยละ 40-60 โดยใช้ร่วมกับวัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลายอื่นๆจะช่วยให้หินฟันม้า ทำหน้าที่หลอมละลายได้ดียิ่งขึ้น ปริดา พิมพ์ขาวขำ (2547) ที่กล่าวว่า หินฟันม้าเป็นสารประกอบแอลคาไลน์ ซึ่งเป็นตัวลดจุดหลอมตัวของตัวเคลือบ ทำให้เคลือบเหลวมีการเคลื่อนตัวได้มากขึ้น ช่วยทำให้ดัชนีหักเหของเคลือบเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความใสของเคลือบมากยิ่งขึ้น ส่วนการใช้โดโลไมท์ และแคลเซียมคาร์บอเนต ในเคลือบสอดคล้องกับ ปริดา พิมพ์ขาวขำ (2547) และ สมศักดิ์ ขวาลาวันย์ (2549) ที่กล่าวว่าสารประกอบแคลเซียม เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเคลือบแทบทุกชนิด ซึ่งใช้เป็นตัวทำให้เคลือบสุดตัวดี มีความแข็งสูงขึ้น ทนต่อการขีดขูดได้ดี ซึ่งการใช้สังกะสีออกไซด์ สอดคล้องกับ ปริดา พิมพ์ขาวขำ (2547) ที่กล่าวว่า Zinc Oxide เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเคลือบหลายๆชนิด ทำหน้าที่เป็นตัวลดจุดหลอมตัวของเคลือบ ทำให้เคลือบมีความมันวาวยิ่งขึ้น เคลือบไม่รানตัว และได้ผิวเคลือบที่มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และการใช้แบเรียมคาร์บอเนต ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลาย สอดคล้องกับ ไพจิตร อังศิริวัฒน์ (2547) กล่าวว่าแบเรียมคาร์บอเนต มีคุณสมบัติเป็นตัวหลอมละลายที่อุณหภูมิปานกลางถึงอุณหภูมิสูง ระหว่าง 1,180-1,250 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งในการหลอมละลายของเคลือบ โดยใช้ปริมาณ ร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 8 และสอดคล้องกับ ปริดา พิมพ์ขาวขำ (2547) ที่กล่าวว่าในภาวะที่เหมาะสม Barium จะเป็นตัวลดจุดหลอมตัวของเคลือบที่รุนแรง ช่วยทำให้เคลือบมีดัชนีหักเหแสงสูงขึ้น ทำให้เคลือบใสมากขึ้น และ การใช้ทองแดงออกไซด์ ในปริมาณที่เหมาะสมยังส่งผลให้เคลือบมีความมันแวววาวมากยิ่งขึ้น สอดคล้องกับ ปริดา พิมพ์ขาวขำ (2547) ที่กล่าวว่า และเมื่อใช้ทองแดงออกไซด์ เป็นองค์ประกอบในเคลือบจะมีพฤติกรรมเป็นตัวลดจุดหลอมตัวของตัวเคลือบที่รุนแรง ละลายได้ดีและเข้าเป็นเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของแก้ว ทำให้เคลือบมีสีเขียว และสอดคล้องกับงานวิจัยของ ภรดี พันธุภากร และ เสกสรรค์ ตันยาภิรมย์ (2542) ที่พบว่า กลุ่มเคลือบที่ใช้ทองแดงออกไซด์ เป็นสารให้สีในสูตรเคลือบ ร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 5 เคลือบจะมีความมันแวววาว ส่วนสูตรเคลือบที่มีทองแดงออกไซด์ ร้อยละ 7 จะมีแนวโน้มมีความทนไฟมากกว่าสูตรที่มีการใช้ทองแดงออกไซด์ ร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 5 นอกจากนี้ ไพจิตร อังศิริวัฒน์ (2547) ยังกล่าวว่า หากเผาเคลือบที่มีส่วนผสมของแบเรียมคาร์บอเนต แล้วแช่ที่อุณหภูมิสูงสุดไว้ที่ระยะเวลาประมาณ 10 นาที เคลือบจะมีคุณภาพดี ไม่เกิดตำหนิเป็นฟองหลังการเผา

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีและนวัตกรรมเซรามิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย ซึ่งทำให้การดำเนินการวิจัยสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยขอขอบคุณ มา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

ณัฐนันท์ บัวงาม. (2553). **ความสุนทรีย์จากม้าน้ำ**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ)

มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ.

ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. (2547). **เซรามิกส์**. (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไพจิตร อังศิริวัฒน์. (2546). **สีเซรามิก**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์

ไพจิตร อังศิริวัฒน์. (2547). **รวมสูตรเคลือบเซรามิกส์**. (พิมพ์ครั้งที่2). กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

ภรดี พันธุ์ภากร, และเสกสรรค์ ตันยาภิรมย์. (2542). **เคลือบเซรามิกส์จากเปลือกหอยนางรม**. .

(รายงานผลการวิจัย). ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา.

สมศักดิ์ ขวาลาวัณย์. 2549. **เซรามิกส์**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

สุขุมล เล็กสวัสดิ์. (2548). **เครื่องปั้นดินเผา พื้นฐานการออกแบบและปฏิบัติงาน**.

กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Singer, S. S. (1963). **Industrial Ceramics**. London: Chapman and Hall Ltd.