

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

KASEM BUNDIT Engineering Journal

ISSN 3027-6519 (Print) ISSN 3027-6527 (Online)



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม 2567
Vol.14 No.2 May-August 2024

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

Kasem Bundit Engineering Journal (KBEJ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตจัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและพัฒนา ผลงานวิชาการ ตลอดจนองค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ของอาจารย์ นักวิชาการอิสระ และวิศวกรทั่วไป และเป็นสื่อกลางระหว่างมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิตกับสังคมภายนอกในการเผยแพร่ความรู้ต่างๆ ด้านวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อให้เป็นฐานความรู้จะนำไปสู่การพัฒนาด้านวิศวกรรมต่อไป โดยมีกำหนดตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ ออกเป็นราย 4 เดือน (ประจำเดือนมกราคม-เมษายน พฤษภาคม-สิงหาคม และ กันยายน-ธันวาคม)

วัตถุประสงค์

- เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่ผลงานวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
- เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่ผลงานวิจัยและพัฒนา และผลงานวิชาการของคณาจารย์ทั้งในและนอกสถาบัน ตลอดจนนักวิชาการอิสระและวิศวกรทั่วไป
- เพื่อส่งเสริมและกระตุ้นให้เกิดการวิจัยทั้งภายในและภายนอกสถาบัน ส่งผลให้มีการต่อยอดงานวิจัยและการพัฒนาองค์ความรู้ทางวิศวกรรม เพื่อให้เกิดความเชื่อมโยงระหว่างวิชาการและวิชาชีพ อันจะเป็นประโยชน์แก่ชุมชนและสังคมโดยรวม
- เพื่อสร้างกลไกสนับสนุนการเผยแพร่รวมถึงระบบการรวบรวมและคัดสรรผลงานวิจัยและงานสร้างสรรค์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในวงวิชาการและวิชาชีพ ซึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งของการประกันคุณภาพการศึกษา

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตจะเน้นเป็นบทความวิจัย (Research Article) หรืออาจจะเป็นบทความวิชาการ (Academic Article) ได้ เช่น บทความปริทัศน์ (Review Article) บทความทางเทคนิค (Technical Article) บทความเชิงปฏิบัติในวิชาชีพ (Professional Practice) เป็นต้น หรือในบางครั้งจะเป็นบทความรับเชิญ (Invited Article) หรือบทความอื่นๆ (Other Article) ด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการ โดยทุกบทความควรมีลักษณะดังนี้

- เป็นบทความวิจัยหรือบทความทางวิชาการ ในลักษณะที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการและวิชาชีพ
- เป็นบทความที่ไม่เคยได้รับการตีพิมพ์มาก่อนทั้งภายในประเทศหรือต่างประเทศ
- เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ในระหว่างการพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ
- เป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น เนื้อหาในบทความไม่ได้ลอกเลียนหรือคัดลอกมาจากผลงานวิจัยของผู้อื่นหรือจากบทความอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือปราศจากการอ้างอิงที่เหมาะสม
- ผู้เขียนได้แก้ไขบทความตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Reviewer) หรือกองบรรณาธิการแล้ว
- บทความในลักษณะอื่นๆ นอกเหนือจากรายละเอียดข้างต้นจะได้รับการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็นกรณีเฉพาะ

การประเมินบทความ

การประเมินบทความที่ดีมีพลังในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตมีรายละเอียดดังนี้

- บทความทุกฉบับจะได้รับการอ่านและตรวจสอบโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะในสาขาวิชานั้นๆ จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ท่าน ในระบบ Double-blind Review โดยผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เขียนบทความจะถูกปกปิดชื่อระหว่างกระบวนการพิจารณาบทความ
- กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบบทความ ถ้าไม่ผ่านการพิจารณา จะส่งกลับไปแก้ไข ถ้าผ่านจะเข้าสู่การพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ เมื่อผลการประเมินผ่านหรือไม่ผ่านหรือมีการแก้ไขจะแจ้งผลให้ผู้เขียนทราบ เมื่อผู้เขียนดำเนินการแก้ไขบทความตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ และ/หรือ กองบรรณาธิการแล้ว จากนั้นจึงจะแจ้งให้ทราบกำหนดการตีพิมพ์บทความนั้นต่อไป
- กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิในการตรวจแก้ไขรูปแบบบทความที่ส่งมาตีพิมพ์และอาจจะส่งเรื่องคืนมายังผู้เขียนให้เพิ่มเติมหรือพิมพ์ต้นฉบับใหม่แล้วแต่กรณี
- การยอมรับการตีพิมพ์หรือปฏิเสธการตีพิมพ์บทความเป็นสิทธิของกองบรรณาธิการ และกองบรรณาธิการจะไม่รับผิดชอบในเนื้อหาหรือความถูกต้องของบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ทุกเรื่อง ความถูกต้องของเนื้อหา การใช้ภาษาและรูปแบบการเขียนถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียน

การส่งบทความ

ผู้เขียนจะต้องจัดเตรียมบทความต้นฉบับที่พิมพ์ตามข้อกำหนดของรูปแบบวารสาร จำนวน 1 ชุด และผู้เขียนบทความกรอกข้อมูลใบนำส่งบทความ พร้อมสแกนใบนำส่งบทความและแนบไฟล์

ต้นฉบับบทความส่งมาที่ E-Mail: engkasemjournal@kbu.ac.th หรือ ผู้เขียนสามารถส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System ได้ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/kbej/user/register>

หากมีปัญหาในการส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System โปรดติดต่อกองบรรณาธิการ ที่ 02-320-2777 ต่อ 1211

ลิขสิทธิ์

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ถือเป็นกรรมสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ห้ามนำข้อความทั้งหมดไปตีพิมพ์ซ้ำ ยกเว้นได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิตแล้ว หากบทความที่ได้รับการตีพิมพ์นั้นเป็นบทความที่จะเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นหรือมีความไม่ถูกต้องในเนื้อหาของบทความ ผู้เขียนบทความนั้นต้องเป็นผู้รับผิดชอบ

กำหนดตีพิมพ์

ปีละ 3 ฉบับ ออกเป็นราย 4 เดือน (ประจำเดือนมกราคม-เมษายน พฤษภาคม-สิงหาคม และกันยายน-ธันวาคม)

จัดพิมพ์โดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

คณะที่ปรึกษา:

ดร.วัลลภ สุวรรณดี	อธิการบดี มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.สุวัฒน์ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.เสนีย์ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายวางแผนและพัฒนา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.อริศ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายทรัพยากรบุคคล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ประสาร มาลากุล ณ อยุธยา	รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.อิงอร ตันพันธ์	ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.สุนิติ สุภาพ	หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

บรรณาธิการ:

รศ.ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
------------------------------	--

รองบรรณาธิการ:

ผศ.อนุชิต เจริญ	รองคณบดีฝ่ายวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
-----------------	---

กองบรรณาธิการ:

ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.โจเซฟ เคดาร์	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและ นวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เตชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Prof. Dr.Belkacem Zeghamati	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.จิรนุช เสี่ยงมศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.บุญเลิศ สือเจย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ

รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกกร วรากุลศิริพันธุ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.วสิน มหัตนรินทร์กุล	วิศวกร ที่ปรึกษาโรงงาน อาจารย์พิเศษ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ:

รศ.วิญญู แสงสินกสิกิจ	อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักรการ
อ.ธีรยุทธ จันทรแจ่ม	ผศ.ดร.หนึ่งฤทัย ทิมย้ายงาม
ผศ.วรารกร เกิดทรัพย์	อ.อุบลรัตน์ วาริพัฒนะ

ฝ่ายเลขานุการ:

คุณยุพิน ไชยโคตร	คุณรุ่งนภาพร ภูธรราช
------------------	----------------------

บทบรรณาธิการ

“วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต” เป็นวารสารที่ดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องกว่า 14 ปี และปัจจุบันได้ถูกจัดให้เป็น “วารสารกลุ่มที่ 1” ได้รับรองคุณภาพของวารสาร “ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2565 ไปจนถึงวันที่ 31 ธันวาคม 2667” โดยมีกำหนดการเผยแพร่ทุก 4 เดือน (3 ฉบับต่อปี) นอกจากนี้ กองบรรณาธิการยังคงมุ่งมั่นในการปรับปรุงการดำเนินงาน ตลอดจนพัฒนาและยกระดับคุณภาพด้านวิชาการและวิจัยของวารสารอย่างต่อเนื่อง โดยปัจจุบันเป็นยุคที่เทคโนโลยีมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และแนวคิดทางวิศวกรรมได้รับการพัฒนาขึ้นมาก ไม่ว่าจะเป็นด้านการวิจัยทางปัญญาประดิษฐ์ (AI) การเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) หรือการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อความยั่งยืน ซึ่งทางกองบรรณาธิการของวารสารฯ รู้สึกเป็นเกียรติอย่างยิ่งที่ได้เป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาและยกระดับคุณภาพด้านวิชาการและวิจัยของประเทศไทย และมีความก้าวหน้าและเติบโตขึ้น

หนึ่ง ผลสัมฤทธิ์ในครั้งนี้จะเกิดขึ้นไม่ได้หากขาดการสนับสนุนจากผลงานที่มีคุณภาพด้านวิชาการและวิจัยจากนักวิชาการ นักวิจัย และผู้เขียนทุกท่าน รวมถึงคณะผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความที่กรุณาส่งสนับสนุนการดำเนินงานของวารสารฯ เป็นอย่างดีเสมอมา ตลอดจนทีมงานกองบรรณาธิการฯ ทุกท่าน

สุดท้ายนี้ ทางกองบรรณาธิการขอยืนยันว่า กองบรรณาธิการยังคงมุ่งมั่นในการปรับปรุงการดำเนินงาน ตลอดจนพัฒนาและยกระดับคุณภาพด้านวิชาการและวิจัยของวารสารอย่างต่อเนื่อง และเกิดประโยชน์สูงสุดต่อนักวิชาการ นักวิจัย ผู้เขียน และผู้อ่านในวงกว้างต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ
บรรณาธิการวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความวิจัย (Research Article)

ผลกระทบของห้องอบสองชั้นต่ออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในกระบวนการอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

EFFECTS OF DOUBLE DRYING CHAMBER ON TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY IN BANANA (MUSA ABB) DRYING PROCESS BY GREENHOUSE SOLAR DRYING

1

เจิมธง ปรรณนารักษ์ จุติพร อินทะนิน กชกร หัสโรค์ และ พรอริยา ฉิรินัง

การศึกษาและออกแบบเตาเผาขยะห้องเผาไหม้ 2 ห้องขนาดเล็กโดยใช้แผ่นเหล็กกล้าเป็นผนังกันห้อง

STUDY AND DESIGN OF THE SMALL DOUBLE CHAMBER WASTE INCINERATOR USING STEEL PLATES AS ROOM PARTITIONS

25

ภักดี สิทธิฤทธิ์กวิน

THE IMAGE PROCESSING IN A VISION SYSTEM-BASED SIZE INSPECTION FOR DRIED FLATTENED BANANAS

44

Narisara Suwichien and Seksan Suchaipron

การประเมินศักยภาพการบรรเทาปัญหาอุทกภัยในพื้นที่ลุ่มแม่น้ำมูลบริเวณจังหวัดบุรีรัมย์และสุรินทร์ด้วยแบบจำลอง MIKE11

ASSESSMENT OF FLOOD MITIGATION STRATEGIES IN THE MUN RIVER IN THE PROVINCES OF BURIRAM AND SURIN USING THE MIKE11 MODEL

60

สุวารี สงฆ์พัฒน์แก้ว วิษุวัฒน์ ตั้สมบัติ และ ดวงนภา วาณิชสรรพ

การพัฒนากระบวนการหมักหัวมันสำปะหลังเพื่อให้ได้โปรตีนเป็นส่วนผสมอาหารสัตว์
DEVELOPMENT OF THE FERMENTATION PROCESS OF CASSAVA ROOTS TO PRODUCE PROTEIN AS AN ANIMAL FEED INGREDIENT

76

สากล ทองประภา ศุภรัชชัย วรรัตน์ สุรศักดิ์ จันทร์นาย และ ณัฐฐ์ นาคกร

บทความวิจัย (Research Article) (ต่อ)

การจำลองสถานการณ์กระบวนการผลิตอาหารสัตว์ด้วยโปรแกรมเฟลกซิม กรณีศึกษา
โรงงานผลิตอาหารสัตว์จังหวัดสุโขทัย

SIMULATION MODELLING OF SILAGE PRODUCTION PROCESS WITH
FLEXSIM SOFTWARE: A CASE STUDY OF THE SILAGE FACTORY IN
SUKHOTHAI PROVINCE

99

ศิริกาญจน์ จันทรสมบัติ ไกลรุ่ง พรอนันต์ กัญญาณัฐ น่วมอ้อม และ สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ

การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการไม่สับย่อยมันสำปะหลัง โรงงานผลิตแป้งมัน จังหวัด
กำแพงเพชร

IMPROVEMENT BLADE CHOPPED FOR REDUCE LOSSES IN CHOPPING
CASSAVA PROCESS KAMPHAENG PHET STARCH FACTORY

114

ชยันต์ คำบรรลือ ปรียานุช เมฆฉาย อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี ธงชัย เบ็ญจลักษณ์ และ
ธัญนรี พรไพโรเพชร

การวิเคราะห์แนวทางการพัฒนาการตรวจสอบและแจ้งเตือนการรักษาความมั่นคง
ปลอดภัยของระบบปฏิบัติการด้วยการประยุกต์ใช้โมเดลอัตโนมัติ

ANALYZING AUDIT DEVELOPMENT GUIDELINES AND NOTIFYING THE
OPERATING SYSTEM OF SECURITY MAINTENANCE BY APPLYING THE
AUTOMATA MODEL

130

ทิภาพร ศุภมิตร สุวิทย์ วงศ์คุ้มสิน ชนะธิป ชำรงวิทยภาคย์ และ อัฐติศักดิ์ เมืองสง

MEASURING THE ENERGY EFFICIENCY OF RDF QUERY PROCESSING

Marko Niinimäki, Kitichai Chanyalikit and Atamfon Udofia

147

การใช้โครงข่ายประสาทเทียมช่วยในการวิเคราะห์กำลังสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า
ระบบจำหน่ายในสภาวะโหลดปกติและโหลดเกิน

USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO ANALYZE POWER LOSSES OF
DISTRIBUTION TRANSFORMER UNDER NORMAL LOAD AND OVERLOAD
CONDITIONS

166

บุญเลิศ สือเฉย สมศักดิ์ สิริโปรยานนท์ และ นฤตม์ เพ็ชรเจริญ

ผลกระทบของห้องอบสองชั้นต่ออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ใน
กระบวนการอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
**EFFECTS OF DOUBLE DRYING CHAMBER ON TEMPERATURE AND
RELATIVE HUMIDITY IN BANANA (MUSA ABB) DRYING PROCESS BY
GREENHOUSE SOLAR DRYING**

เจิมธง ประรณารักษ์¹ จutiporn อินทะนิน² กชศร หัสโรค์³ และ พรอริยา ฉิรินัง⁴

^{1,2}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี, 38 ต.นาวั่ง อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000,

¹chermdhong.pra@mail.pbru.ac.th, ²jutiporn.int@mail.pbru.ac.th

³อาจารย์, สาขาวิชาวิทยาการแปรรูปและการประกอบอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 96 ถ.พุทธมณฑลสาย 5 ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล
จ.นครปฐม 73170, kanokorn.hus@rmutr.ac.th

⁴อาจารย์, สาขาวิชาอาหารและโภชนาการประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย
ราชภัฏเพชรบุรี, 38 ม.8 ต.นาวั่ง อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000, pornariya.chi@mail.pbru.ac.th

Chermdhong Prattanaruk¹, Jutiporn Intanin², Kodchasorn Hussaro³, and
Pornariya Chiranang⁴

^{1,2}Lecturer, Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,
Phetchaburi Rajabhat University, 38 Moo 8, Muang, Phetchaburi, 76000 Thailand,

¹chermdhong.pra@mail.pbru.ac.th, ²jutiporn.int@mail.pbru.ac.th

³Lecturer, Department of Food Processing and Culinary Science, Faculty of Science and
Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, 96 Phutthamonthon Sai
5 Salaya, Phutthamonthon Nakhon Pathom, 73170, Thailand, kanokorn.hus@rmutr.ac.th

⁴Lecturer, Department of Applied Food and Nutrition, Faculty of Science Technology,
Phetchaburi Rajabhat University, 38 Moo 8, Muang, Phetchaburi, 76000, Thailand,
pornariya.chi@mail.pbru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ที่มีห้องอบชั้นเดียวเปรียบเทียบกับห้องอบสองชั้น และใช้กล้วยน้ำว้าเป็นตัวอย่างในการทดสอบด้วยการอบแห้งทั้งการพาความร้อนแบบธรรมชาติและแบบบังคับ ใช้ความชื้นกล้วยน้ำว้าเริ่มต้นที่ 65 – 67 % มาตรฐานเปียก (w.b.) อบแห้งจนมีความชื้นต่ำกว่า 20 % (w.b.) จากการศึกษาพบว่าเครื่องอบแห้งที่ใช้ห้องอบสองชั้นสามารถกระจายความร้อนในห้องอบได้เป็นอย่างดี อุณหภูมิภายในห้องอบมีค่าใกล้เคียงกัน มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการอบแห้งสูงกว่าเครื่องอบแห้งที่ใช้ห้องอบชั้นเดียว และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่า โดยเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ที่ใช้ห้องอบสองชั้นและเสริมความร้อนด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรดร่วมกับการเปิดและไม่เปิดพัดลมระบายอากาศจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 2.52 และ 2.19 kWh/kg ตามลำดับ ซึ่งระบบที่ใช้ความร้อนเสริมและไม่เปิดพัดลมระบายอากาศจะใช้เวลาน้อยกว่า 2 วันในการอบแห้งกล้วยจนความชื้นต่ำกว่า 20 % (w.b.) สำหรับค่าสีของผลิตภัณฑ์ที่อบด้วยระบบเสริมความร้อนจะมีสีคล้ำที่สุด โดยกล้วยน้ำว้ามีค่าความสว่างลดลงและค่าสีแดงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

คำสำคัญ: โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, ห้องอบสองชั้น, กล้วยน้ำว้า

ABSTRACT

The objective of this research was to find out the outputs of dried product by the solar drying using the single-drying chamber comparing to the double-drying chamber. The bananas (Musa ABB) was used as a sampling in the testing of the natural convection and the forced convection. The initial moisture content was 65-67 % w.b., dried until less than 20 % w.b. The studies showed that the double-drying chambers could internally distribute the temperature well, and consistently similar in all layers. Its thermal efficiency is better than the single-drying chamber. Its specific energy consumption was less than the one of the single-drying chamber. The specific energy consumption of the double-drying-chamber conditioned by including the infrared heater and compared between turning on and turning off the ventilation fan was 2.52 and 2.19 kWh/kg, respectively. The solar drying with infrared heater and turn of the ventilation fan, it took less than 2 days to dry the bananas which had moisture content to 20 % w.b. The color values of the product dried with the inclusion of the infrared heater were the darkest color, its lighting value decreased and the red value increased, both statistically significant ($P \leq 0.05$)

KEYWORDS: Greenhouse solar drying, Double-drying chamber, Banana (Musa ABB)

1. บทนำ

ผลผลิตทางการเกษตรโดยทั่วไปจะมีเป็นฤดูกาล แต่การบริโภคผลิตภัณฑ์เกษตรจะมีตลอดทั้งปี จึงจำเป็นต้องมีการเก็บรักษาที่ดีเพื่อรักษาทั้งคุณภาพและปริมาณคงอยู่ให้ได้มากที่สุด ปัจจัยสำคัญในการเก็บรักษาที่สำคัญอันหนึ่ง คือ ความชื้นในการเก็บรักษาจะต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม กล่าวคือ ถ้าความชื้นผลิตภัณฑ์ทางเกษตรต่ำก็จะเก็บรักษาได้นาน แต่การที่จะอบแห้งผลิตภัณฑ์ให้แห้งมากเกินไปจนความจำเป็น นอกจากจะต้องเสียค่าใช้จ่ายและพลังงานในการอบแห้งเพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็นแล้ว ยังทำให้เกิดความเสียหาย (แตกหัก) ระหว่างการขนส่งได้ง่าย และทำให้สูญเสียน้ำหนักในเชิงพาณิชย์อีกด้วย [1] ผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทยมีมูลค่าสูงนับแสนล้านบาท โดยข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ในปี 2566 ผลผลิตทางการเกษตรในกลุ่มผลไม้ เครื่องเทศ ผัก และยาสูบ เฉพาะที่ส่งออกมีมูลค่ามากกว่า 252,324 ล้านบาท [2] ในจำนวนนี้คิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งกว่า 80,000 ล้านบาท ยังไม่นับรวมผลิตภัณฑ์จำพวกเนื้อสัตว์แห้ง พืชสมุนไพร ข้าว และเมล็ดธัญพืชต่าง ๆ ซึ่งต้องอบแห้งให้ได้มาตรฐานก่อนจำหน่าย จะเห็นว่ากระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรมีความสำคัญในเชิงพาณิชย์และความมั่นคงทางอาหารของประเทศสูงมาก

การทำแห้งที่ง่ายที่สุดคือการตากแห้งทั้งในที่ร่มและตากแดดโดยตรง โดยการตากแดดจะช่วยเพิ่มอัตราการระเหยความชื้นในผลิตภัณฑ์ได้เร็วกว่ามาก จึงเป็นที่นิยมในประเทศที่กำลังพัฒนา [3] แม้ว่าการตากแดดจะเป็นวิธีที่ง่าย ต้นทุนต่ำ และได้ผลดี [1] แต่ความร้อนจากแสงอาทิตย์จะสูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก อีกทั้งในระหว่างการตากแห้งผลิตภัณฑ์มักจะถูกรบกวนจากแมลงและสัตว์ต่าง ๆ มีการปนเปื้อนฝุ่นละออง หรือเปียกฝนจนเกิดเชื้อรา [1, 3] ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำ เพื่อลดปัญหาดังกล่าว โดยทั่วไปจึงนิยมทำเรือนกระจก (Greenhouse) ครอบผลิตภัณฑ์ โดยอาจใช้พลาสติกใสคลุม หรือทำเป็นตู้หรือโรงอาคารที่หุ้มหรือคลุมด้วยวัสดุโปร่งแสง เนื่องจากการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบสภาวะเรือนกระจกมีการสูญเสียความร้อนน้อยกว่าการตากแดดโดยตรงมาก จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการอบแห้งสูงขึ้นและใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลงอย่างเห็นได้ชัด [4-6] อย่างไรก็ตาม การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์มีข้อจำกัดคือ ระยะเวลาการอบที่มีจำกัดในแต่ละวัน และประสิทธิภาพการอบซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีอาทิตย์ สำหรับกระบวนการอบที่ต้องใช้การอบแห้งต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน การเพิ่มแหล่งความร้อนเสริมให้แก่ระบบจึงเป็นเรื่องจำเป็น ซึ่งการอบด้วยอินฟราเรดนอกจากจะช่วยให้อาหารแห้งได้เร็วยิ่งขึ้น ต่อเนื่องยาวนานแล้ว ยังทำให้ความร้อนภายในห้องอบมีความสม่ำเสมอมากขึ้น [7, 8] โดยหลักการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ คือ เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบกับผิวเครื่องอบแห้ง รังสีอาทิตย์ส่วนที่ทะลุผ่านวัสดุโปร่งแสงเข้าไปภายในห้องอบจะมีทั้งรังสีคลื่นยาวและสั้น โดยรังสีคลื่นสั้นเมื่อสูญเสียพลังงานทำให้มีความยาวคลื่นสูงขึ้น [9] คลื่นบางส่วนที่ไม่สามารถทะลุผ่านวัสดุคลุมออกไปได้ ก็จะถูกกักเก็บอยู่ภายในห้องอบ [10] อากาศภายในห้องอบเมื่อได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์แล้ว จะมี

อุณหภูมิสูงขึ้นเกิดการขยายตัว ความชื้นสัมพัทธ์และความหนาแน่นของอากาศร้อนจึงลดลง อากาศร้อนจะลอยตัวขึ้นสูง [11] ผ่านผลิตภัณฑ์ และพาเอาความชื้นที่ระเหยกลายเป็นไออออกจากผลิตภัณฑ์ไหลออกนอกห้องอบ ส่วนอากาศที่เย็นกว่าซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าจะกระจายตัวอยู่ข้างล่าง ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในห้องอบนี้จะมีผลต่อความสม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์มาก เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ด้วยการพาความร้อนแบบธรรมชาติบางแบบมีอุณหภูมิชั้นบนต่างจากชั้นล่างเกินกว่า 20°C [12, 13] จึงเป็นการยากที่จะอบแห้งผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพใกล้เคียงกันได้ทั้งหมด

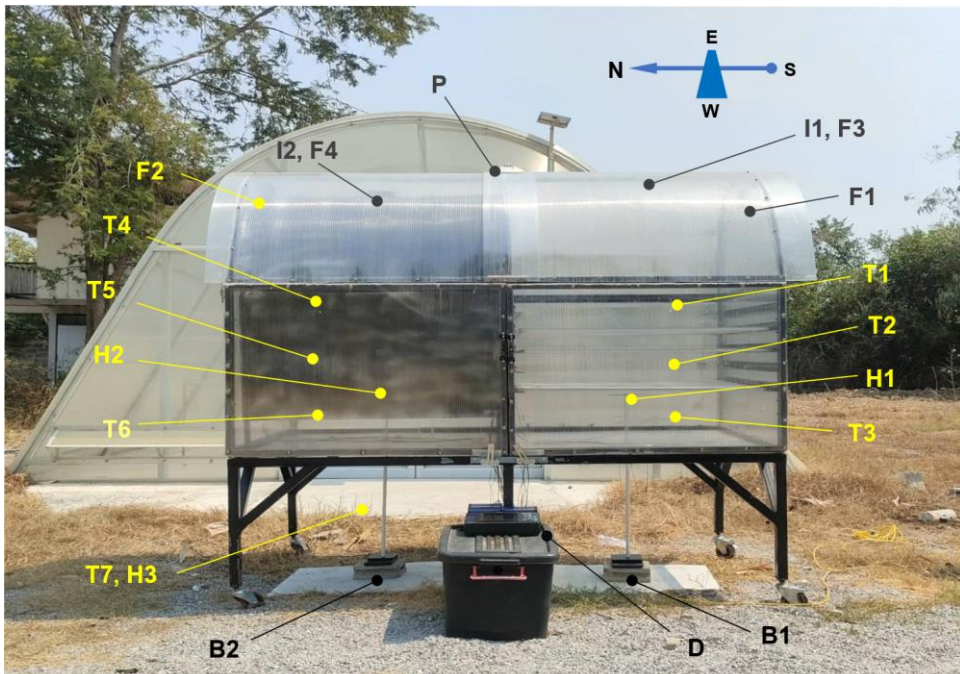
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ห้องอบชั้นเดียวแบบปกติโดยทั่วไปเปรียบเทียบกับห้องอบสองชั้น โดยใช้กล้วยน้ำว้า (Musa ABB Pisang Awak วงศ์ Musaceae) เป็นตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในการทดสอบ เนื่องจากเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ เป็นที่นิยมบริโภค หาได้ง่ายและมีตลอดปี แต่มีอายุการเก็บรักษาสั้น [14-16] โดยจะเปรียบเทียบทั้งการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องอบ อัตราการลดความชื้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ตลอดจนคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์การอบแห้ง

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ในการดำเนินการวิจัยจะใช้เครื่องอบแห้งทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหลังคาโค้งครึ่งวงกลม เนื่องจากรูปทรงดังกล่าวทำอุณหภูมิในห้องอบได้สูงและมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ [4] โดยโครงสร้างสี่เหลี่ยมของเครื่องอบแห้งที่ใช้ มีขนาด $1.00 \times 2.00 \times 0.75 \text{ m}$ หลังคาโค้งครึ่งวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 m คลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตสีขาวใสหนา 6 mm ทุกด้าน เครื่องอบแห้งแบ่งเป็นสองฝั่งโดยติดตั้งฉนวนกันความร้อนกันระหว่างกลางหนา 5 cm แต่ละฝั่งเจาะช่องระบายอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 cm บนระนาบเรียบห่างจากยอดโค้งของหลังคาลงมา 5 cm เพื่อติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 cm ชนิดกระแสตรง $12 \text{ V } 0.1 \text{ A}$ มีอัตราการระบายอากาศ $74 \text{ m}^3/\text{h}$ ฝั่งละหนึ่งตัว (F1, F2) ดังรูปที่ 1 ช่องอากาศเข้าแต่ละฝั่งอยู่ด้านล่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 cm 3 ช่อง ประตูห้องอบเป็นแบบบานสวิงเปิดแยกออกจากกัน เครื่องอบแห้งวางบนขาตั้งขนาด $1.05 \times 2.06 \times 0.76 \text{ m}$ ห้องอบฝั่งซ้ายทำเป็นสองชั้น โดยห้องอบชั้นในทำจากโครงเหล็กขนาด $0.92 \times 0.92 \times 0.56 \text{ m}$ หลังคาโค้งรัศมี 0.46 m หุ้มด้วยแผ่นสแตนเลสหนา 0.35 mm รอบด้าน เปิดฐานโล่งเจาะช่องระบายอากาศกึ่งกลางผิวโค้งด้านบนสำหรับติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรดพิกัดกำลังทางไฟฟ้า 126.5 W (I2) พร้อมพัดลมหมุนวนอากาศขนาดผ่านศูนย์กลาง 12 cm ชนิดกระแสตรง $12 \text{ V } 0.3 \text{ A}$ มีอัตราการไหลของอากาศ $170 \text{ m}^3/\text{h}$ (F4) เพื่อดึงอากาศออกจากห้องอบชั้นในให้เคลื่อนที่ขึ้น เพื่อให้

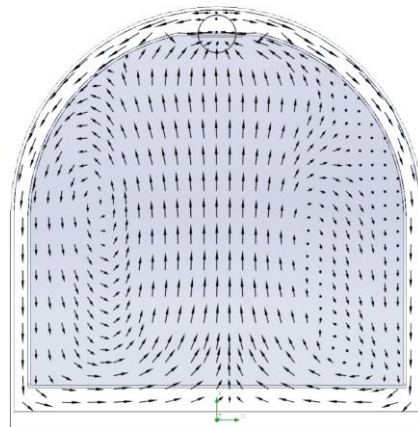
กระแสอากาศปะทะกับผนังโค้งของหลังคา เกิดการหมุนวนย้อนกลับเข้าไปภายในห้องอบแห้ง ห้องอบฝั่งชาวดัดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรด 126.5 W (I1) และพัดลมหมุนวนอากาศชนิดกระแสตรง 12 V 0.3 A (F3) ที่กึ่งกลางผิวโค้งด้านในของหลังคา และทำตารางผลิตภัณท์ภายในห้องอบฝั่งละ 5 ชั้น แต่ละชั้นห่างกัน 10.5 cm โดยถาดมีขนาดกว้าง 95 x 95 cm มีขอบหนา 1 cm ภายในห้องอบทั้งสองฝั่งติดตั้ง Thermocouple type K ฝั่งละ 3 จุด ที่ทำตารางผลิตภัณท์ชั้นบน-กลาง-ล่าง เรียงตามแนวดิ่ง (T1-T3 สำหรับห้องอบชั้นเดียว และ T4-T6 สำหรับห้องอบสองชั้น) สำหรับวัดอุณหภูมิในห้องอบ ติด Humidity sensor (H1, H2) ฝั่งละ 1 จุดกลางห้องอบ เพื่อวัดความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบ พร้อมทั้งติดตั้ง Thermocouple และ Humidity sensor (T7, H3) สำหรับวัดสภาพอากาศแวดล้อมภายนอกเครื่องอบ ด้านล่างเครื่องอบติดตั้งเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 g (B1, B2) เพื่อบันทึกน้ำหนักผลิตภัณท์ตลอดการทดสอบ ใช้ Pyranometer ของ Kipp and Zonen รุ่น CM11 (P) สำหรับวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ ในการเก็บบันทึกความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิทั้ง 7 จุด ใช้เครื่องบันทึกสัญญาณ HIOKI รุ่น LR8401-20 (D) โดยสุ่มเก็บสัญญาณ (Sampling rate) ทุก 1 นาที กรณีความชื้นสัมพัทธ์และน้ำหนักผลิตภัณท์ใช้วิธีการวัดและบันทึกผลทุก 30 นาที



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ (ฝั่งชา) ห้องอบสองชั้น (ฝั่งชา) ห้องอบชั้นเดียว

ห้องอบชั้นในมีรูปทรงสี่เหลี่ยมหลังคาโค้งเช่นเดียวกับตู้อบชั้นนอก หุ้มด้วยสแตนเลสรอบด้าน แต่มีฐานโถ่ง เมื่อวางห้องอบชั้นในลงในเครื่องอบแห้ง ผนังห้องอบชั้นในจะขนานไปกับผนังห้องอบ

ชั้นนอกดังแสดงในรูปที่ 2 (ซ้าย) โดยด้านบนห้องอบชั้นในติดตั้งพัดลมในทิศตั้งฉากกับชั้นบน เพื่อขับเคลื่อนให้กระแสอากาศปะทะกับหลังคาด้านบนแล้วไหลไปตามผิวโค้งหลังคาและผนังด้านในห้องอบชั้นนอก กระแสอากาศจะไหลวนย้อนกลับเข้าสู่อบชั้นในที่ฐานโล่งด้านล่าง ทำให้อากาศเกิดการไหลวนระหว่างห้องอบชั้นในกับชั้นนอก อากาศจะมีการผสมและสัมผัสกันเอง และสัมผัสกับผิววัสดุซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนซึ่งกันและกันดังแสดงในรูปที่ 2 (ขวา)



รูปที่ 2 (ซ้าย) ห้องอบชั้นในภายในเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ (ขวา) ลักษณะการไหลวนของกระแสอากาศในห้องอบสองชั้นเมื่อมองจากด้านข้าง

2.2 วิธีการทดสอบ

ในการทดสอบจะใช้กล้วยน้ำว้าเป็นตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในการศึกษา โดยวางเครื่องอบแห้งขนานไปตามแนวทิศเหนือ-ใต้ (แนวยาวของเครื่องอบแห้งตั้งฉากกับเส้นศูนย์สูตร) ใช้กล้วยน้ำว้าระยะสุกที่ 6 ตามเกณฑ์การแบ่งระยะสุกกล้วยของ CSIRO 1972 [17] ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสีของเปลือกกล้วยที่เป็นสีเหลืองทั้งลูกโดยยังไม่มีจุดดำและยังไม่มีกลิ่น จำนวน 398 ลูก (ประมาณ 22 kg) อบทดสอบผึ่งละ 199 ลูก (ประมาณ 11 kg) โดยทำการปอกเปลือกก่อนนำกล้วยไปวางบนถาดวางผลิตภัณฑ์ชั้นบนสุด-กลาง-ล่างสุด (ถาดที่ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ นำถาดชั้นที่ 2 และ 4 ออก) แต่ละถาดเรียงกล้วยเป็น 6 แถว แถวละ 11 ลูก และวางกล้วยบนเครื่องชั่ง 1 ลูก รวมเป็น 199 ลูก ในห้องอบแต่ละผึ่ง ดำเนินการอบแห้ง ตั้งแต่ 6.00-18.00 น. โดยนำตัวอย่างเก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ในสภาวะสุญญากาศระหว่างที่หยุดพักจากการอบแห้งในตอนกลางคืน และนำไปอบต่อในวันถัดไปรวมเป็นระยะเวลา 3 วัน จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์กล้วยอบแห้งที่ได้ไปทดสอบคุณภาพสี โดยแบ่งการทดสอบเป็น 4 การทดสอบ คือ การทดสอบที่ 1 ทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยการพาแบบธรรมชาติ (ปิดพัดลมและฮีตเตอร์ทั้งหมด) การทดสอบที่ 2 ทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยการพาแบบบังคับด้วยพัดลมระบายอากาศและหมุนวนอากาศ การทดสอบที่ 3

ทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยการพาแบบบังคับด้วยพัดลมระบายอากาศและหมุนวนอากาศร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรด และการทดสอบที่ 4 ทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยการพาแบบบังคับด้วยพัดลมหมุนวนอากาศร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรด โดยการทดสอบที่ 2 3 และ 4 เปิดพัดลมและฮีตเตอร์ตามเงื่อนไขแต่ละการทดสอบตลอดกระบวนการอบแห้ง

2.2.1 การวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์

การหาความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ดัดแปลงจากวิธีของ Kunwisawa et al [14] โดยนำกล้วยน้ำว้าที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแสงอาทิตย์ครบ 3 วันแล้ว หั่นเป็นแว่นหนาประมาณ 3 mm แล้วนำไปอบต่อด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณปริมาณความชื้นดังสมการที่ 1 [18]

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

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)

w คือ มวลเปียกของกล้วย (g)

d คือ มวลแห้งของกล้วย (g)

2.2.2 การคำนวณอัตราการอบแห้ง

การแสดงผลสมรรถนะของเครื่องอบแห้งจะแสดงในรูปอัตราการอบแห้ง (Drying Rate) คือ อัตราส่วนของปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ที่ระเหยออกต่อเวลาที่ใช้ในการอบ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการระเหยน้ำของเครื่องอบแห้ง โดยคำนวณจากสมการที่ 2 [19, 20]

$$DR = \frac{d(M_{wi} - M_{wf})}{t} \quad (2)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (g_{water}/h)

d คือ มวลแห้งของกล้วย (g_{solid})

M_{wi} คือ ความชื้นเริ่มต้น (g_{water}/g_{solid})

M_{wf} คือ ความชื้นที่เวลา t (g_{water}/g_{solid})

t คือ เวลาที่ใช้อบแห้ง (h)

2.2.3 การคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) แสดงถึงความสามารถทางพลังงานในการทำแห้งของเครื่องอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งโดยอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ต่อพลังงานที่ใส่เข้าสู่ระบบอบแห้งดังสมการที่ 3 [21]

$$\eta = \frac{(m_{wi} - m_{wf}) \times h_{fg}}{(A \times I \times t) + E} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง (%)

m_{wi} คือ มวลของผลิตภัณฑ์ก่อนการอบแห้ง (kg)

m_{wf} คือ มวลของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง (kg)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kWh/kg)

A คือ พื้นที่รับรังสีดวงอาทิตย์ของเครื่องอบแห้ง (m^2)

I คือ ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นราบ (W/m^2)

t คือ ระยะเวลาในการอบแห้ง (h)

E คือ พลังงานอื่นๆ ที่ใช้กับอุปกรณ์ในระบบอบแห้ง (Wh)

สำหรับพลังงานอื่น ๆ ที่ใช้กับอุปกรณ์ในระบบอบแห้ง ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมระบายอากาศ พัดลมหมุนวนอากาศ และฮีตเตอร์อินฟราเรด ซึ่งมีพิกัดกำลังไฟฟ้า 1.2 3.6 และ 126.5 W ตามลำดับ

2.2.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) แสดงถึงความสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการนำความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนการใช้พลังงานต่อหน่วยมวลน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ ดังสมการที่ 4 [21]

$$SEC = \frac{(A \times I \times t) + E}{m_{wi} - m_{wf}} \quad (4)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kWh/kg)

ความสิ้นเปลืองพลังงานอื่น ๆ ที่ใช้ในระบบอบแห้ง ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมระบายอากาศ พัดลมหมุนวนอากาศ และฮีตเตอร์อินฟราเรด ซึ่งมีพิกัดกำลังไฟฟ้า 1.2 3.6 และ 126.5 W ตามลำดับ โดยเปิดพัดลมและฮีตเตอร์ตามเงื่อนไขของการทดสอบตลอดกระบวนการอบแห้ง สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบ จะคำนวณจากระยะเวลาอบแห้ง ค่ารังสีอาทิตย์ และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งตั้งแต่เริ่มกระบวนการจนความชื้นลดลงถึง 20 % (w.b.)

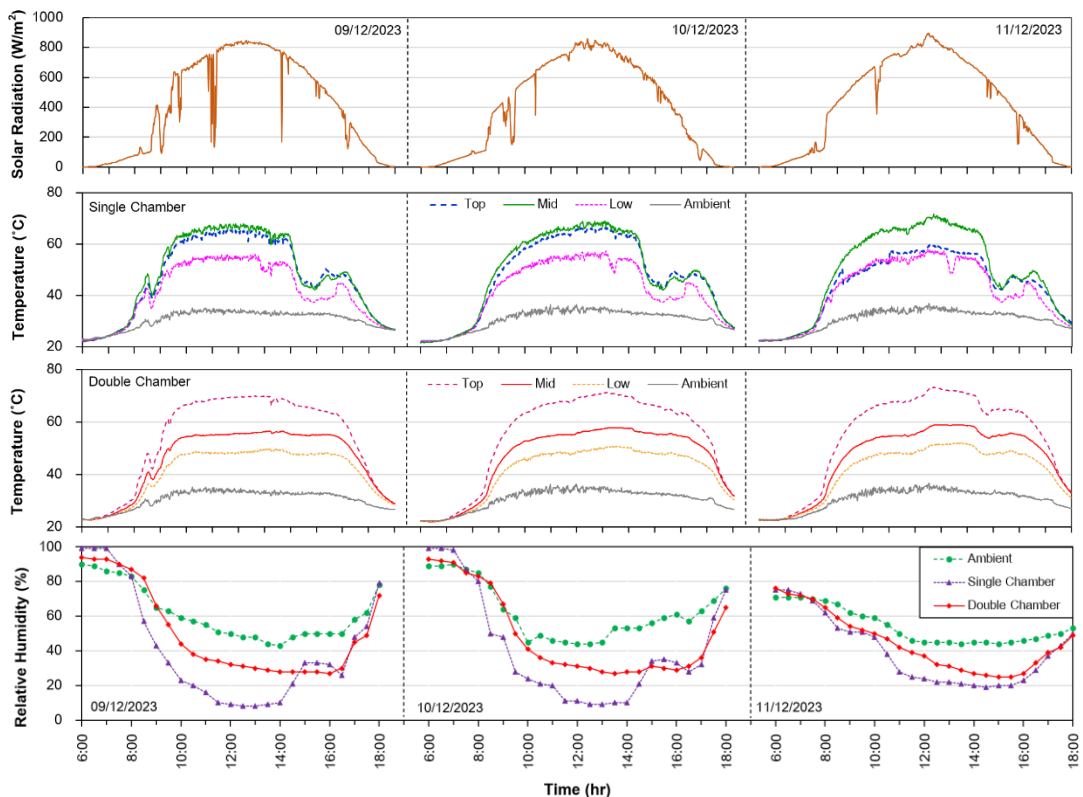
2.2.5 การวัดคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์

การวัดคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์อบแห้งใช้เครื่องทดสอบ Colorimeter ยี่ห้อ FRU รุ่น WF28 โดยใช้ในการวัดค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ค่า L^* (Lightness Parameter) แสดงถึงค่าความสว่างของวัตถุ ใช้ระดับสีเทาของสี มีค่า 0=ดำ ถึง 100=ขาว a^* (Redness Parameter) แสดงถึงค่าสีแดง (+ a^*) หรือสีเขียว (- a^*) และ b^* (Yellow Parameter) แสดงถึงค่าสีเหลือง (+ b^*) หรือน้ำเงิน (- b^*) ในการวัดสีจะสุ่มวัดตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากถาดวางตัวอย่างชั้นบนสุดและล่างสุด (ถาดที่ 1 และ 5) ชั้นละ 5 ตัวอย่าง และตัวอย่างบนเครื่องชั่งอีก 1 ตัวอย่าง รวมเป็น 11 ตัวอย่าง หลังจากการอบแห้งในวันที่ 3 เสร็จสิ้น โดยแสดงผลในรูปแบบ mean $\pm$ SD วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 5 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

3. ผลการวิจัย

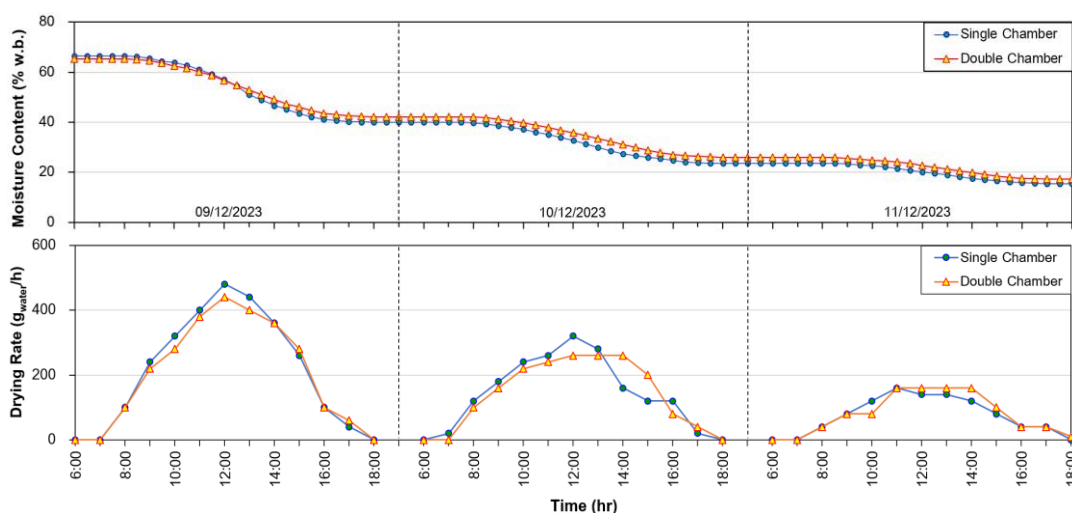
3.1 ผลการอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์

ผลการทดสอบที่ 1 เป็นผลจากการทดสอบอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยการพาแบบธรรมชาติ ในการทดสอบจะไม่ใช้พัดลมและความร้อนเสริมใด ๆ โดยดำเนินการทดสอบในช่วงวันที่ 9-11 ธันวาคม 2566 ช่วงวันดังกล่าว ท้องฟ้าแจ่มใสมีเมฆเล็กน้อยเป็นระยะเวลาดังกล่าว ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ช่วงเที่ยงสุริยะทั้งสามวันมีค่ามากกว่า 800 W/m² รังสีอาทิตย์เฉลี่ยทั้งสามวันอยู่ที่ 421.51 W/m² อุณหภูมิที่ถาดวางผลิตภัณฑ์ทั้งสามระดับภายในห้องอบชั้นเดียวและห้องอบสองชั้นมีค่าที่ต่างกันมาก โดยอุณหภูมิระหว่างชั้นวางผลิตภัณฑ์ในห้องอบสองชั้นมีความแตกต่างกันมากกว่าและมีความราบเรียบมากกว่า ดังรูปที่ 3 สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบสองชั้นจะมีค่าสูงกว่าความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบชั้นเดียว อย่างไรก็ตามความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบทั้งสองแบบยังคงต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอก



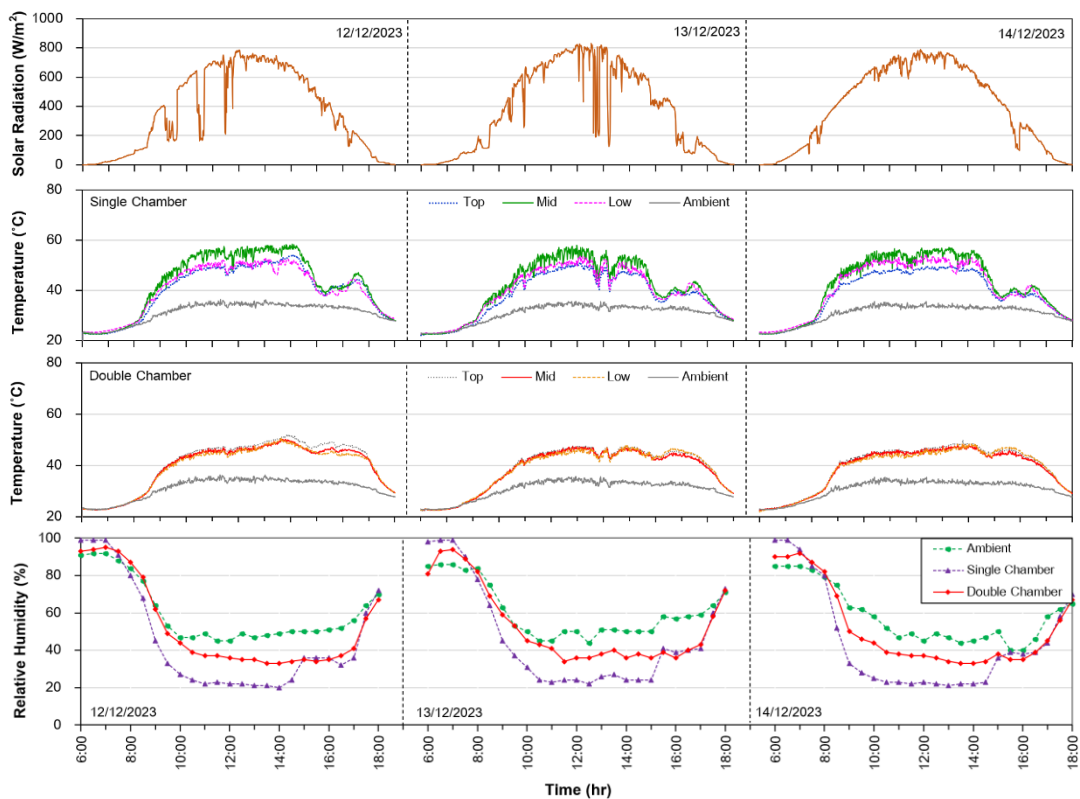
รูปที่ 3 รังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบที่ใช้การอบแห้งโดยการพาแบบธรรมชาติ

เมื่อพิจารณาผลทดสอบการอบลดความชื้นโดยอาศัยการพาแบบธรรมชาติ พบว่า เครื่องอบแห้งสามารถลดความชื้นผลิตภัณฑ์จาก 66.5 % (w.b.) และ 65.4 % (w.b.) สำหรับห้องอบชั้นเดียวและสองชั้นตามลำดับ จนเหลือ 20 % (w.b.) ซึ่งเป็นความชื้นกล้วยตากที่นิยมใช้เชิงพาณิชย์ ได้ภายในเวลา 3 วัน และมีความชื้นสุดท้ายที่ 15.44 และ 17.18 % (w.b.) ตามลำดับ ดังรูปที่ 4 อัตราการอบแห้งผลิตภัณฑ์จะสูงที่สุดในวันแรก และลดลงตามลำดับในวันถัดไป โดยอัตราการอบแห้งในแต่ละวันจะแปรผันตามความเข้มรังสีอาทิตย์ และจะเห็นได้ว่าการอบแห้งโดยการพาแบบธรรมชาติด้วยห้องอบชั้นเดียวสามารถลดความชื้นผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าห้องอบสองชั้นเล็กน้อย

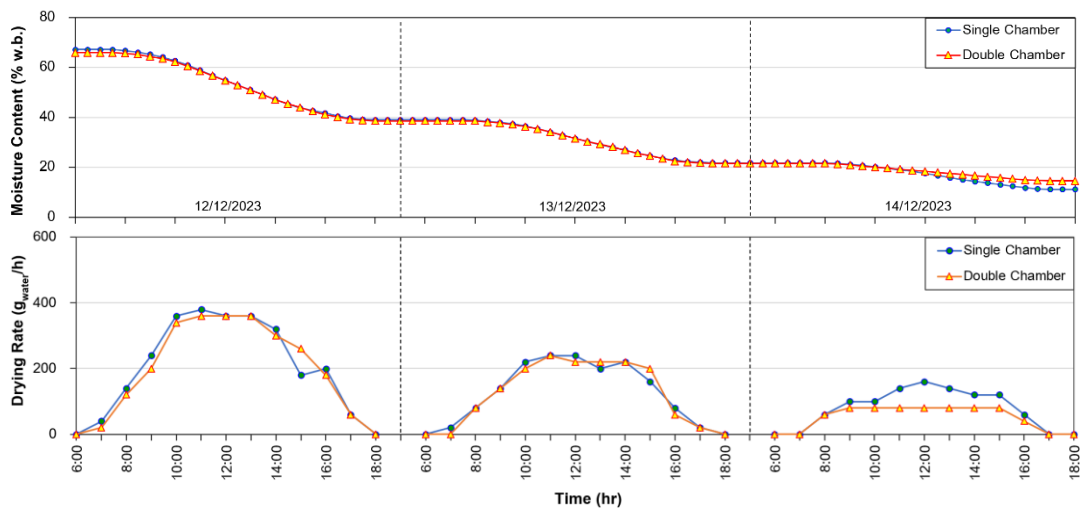


รูปที่ 4 ความชื้นกล้วยน้ำว้าและอัตราการอบแห้งในการอบแห้งแสงอาทิตย์โดยการพาแบบธรรมชาติ

ผลการทดสอบที่ 2 เป็นการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์แบบบังคับโดยเปิดพัดลมระบายอากาศ และพัดลมหมุนวนในห้องอบทั้งสองฝั่งตลอดการทดสอบ ในวันที่ 12-14 ธันวาคม 2566 ตั้งแต่เวลา 6.00 น.-18.00 น. เป็นช่วงที่ท้องฟ้าปลอดโปร่ง มีแดดตลอดทั้งวัน มีเมฆมากเป็นบางช่วง ความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดตอนเที่ยงมากกว่า 780 W/m^2 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 385.11 W/m^2 โดยอุณหภูมิที่ถาดวางผลิตภัณฑ์ทั้งสามระดับภายในห้องอบสองชั้นจะมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าในห้องอบชั้นเดียว เป็นเพราะอากาศที่ไหลวนระหว่างห้องอบชั้นนอกและชั้นในผสมและถ่ายเทความร้อนให้กัน โดยอุณหภูมิเฉลี่ยในห้องอบสองชั้นจะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากในช่วงวันที่ทำการทดสอบมีค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีอาทิตย์น้อยกว่า อุณหภูมิเฉลี่ยในการทดสอบนี้จึงต่ำกว่าการทดสอบที่ 1 อีกทั้งการเปิดพัดลมระบายอากาศ นอกจากทำให้สูญเสียความร้อนออกจากระบบแล้ว ยังเป็นการดึงอากาศใหม่ (Fresh air) ซึ่งมีความชื้นสูงกว่าให้ไหลเข้ามาในห้องอบเป็นปริมาณมาก ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในการทดสอบที่ 2 สูงกว่าการทดสอบที่ 1 และเนื่องจากอุณหภูมิในห้องอบสองชั้นต่ำกว่าอุณหภูมิในห้องอบชั้นเดียว ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบสองชั้นจึงมีค่าสูงกว่าความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบชั้นเดียว การลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ในห้องอบชั้นเดียวจึงเร็วกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาที่ความชื้นผลิตภัณฑ์และอัตราการอบแห้งผลิตภัณฑ์ในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า ผลิตภัณฑ์ในห้องอบชั้นเดียวสามารถลดความชื้นได้ดีกว่าเล็กน้อย เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ที่ใช้ห้องอบชั้นเดียวและสองชั้นสามารถลดความชื้นถึง 20 % (w.b.) ได้ภายในเวลา 3 วัน มีความชื้นสุดท้ายที่ 11.24 และ 14.62 % (w.b.) จากความชื้นเริ่มต้นที่ 67.2 และ 65.9 % (w.b.) ตามลำดับ

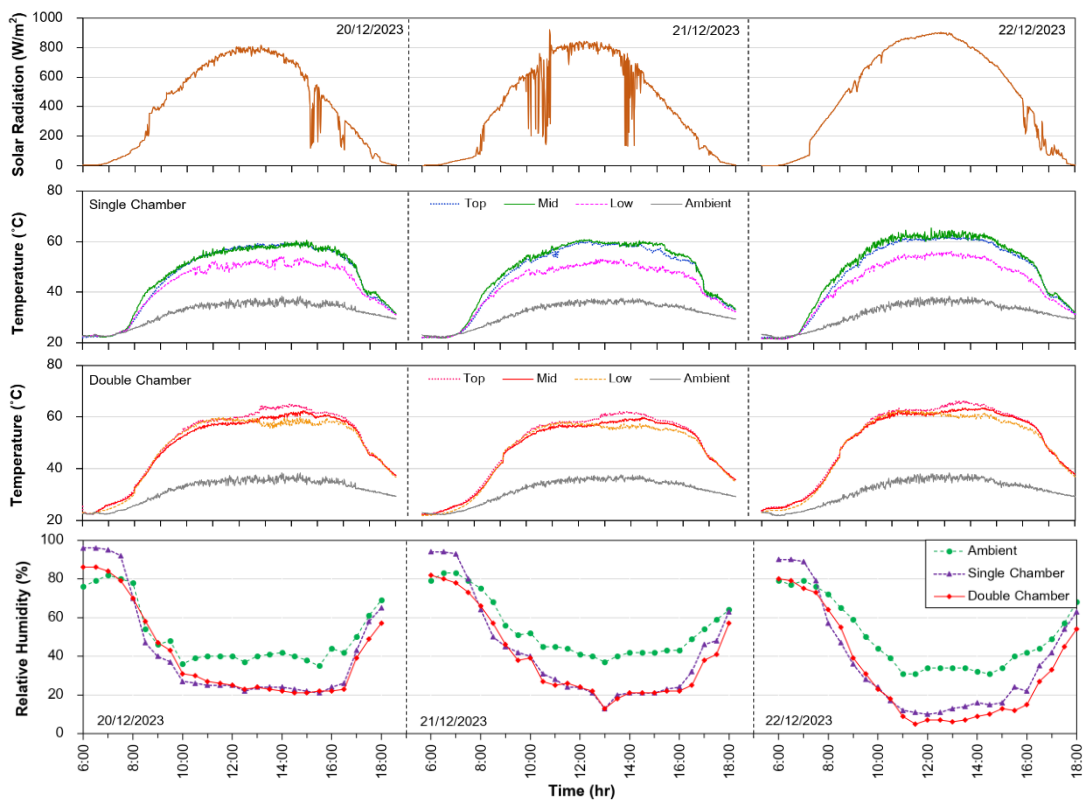


รูปที่ 5 รังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบที่ใช้การอบแห้งโดยการพาแบบบังคับด้วยพัดลมระบายอากาศและหมุนวนอากาศ



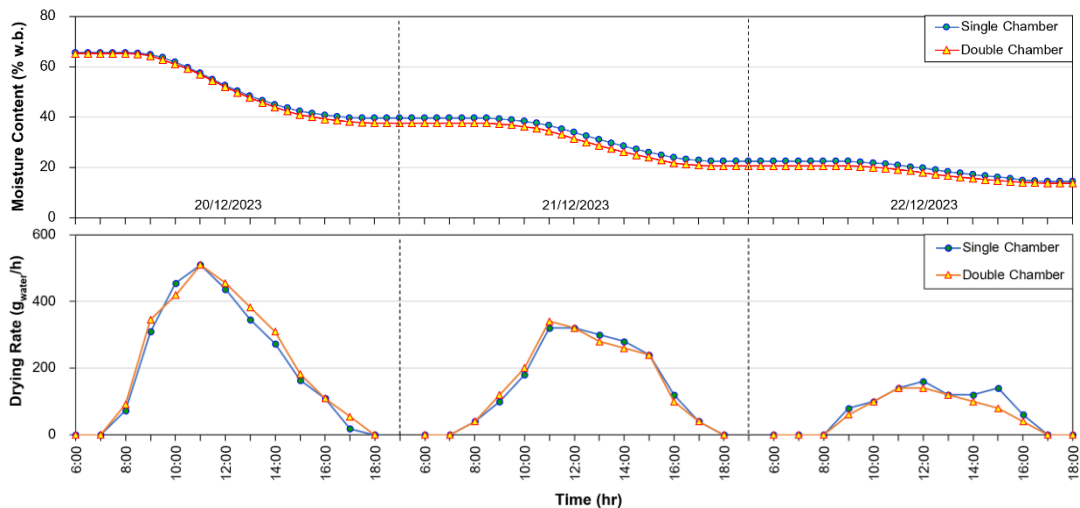
รูปที่ 6 ความชื้นกลัวย่น้ำและอัตราการอบแห้งในการอบแห้งแสงอาทิตย์โดยการพาแบบบังคับด้วยพัดลมระบายอากาศและหมุนวนอากาศ

ผลการทดสอบที่ 3 เป็นการอบแห้งผลิตภัณฑ์จากพลังงานแสงอาทิตย์โดยการพาแบบบังคับ ด้วยการเปิดพัดลมระบายอากาศและพัดลมหมุนวนอากาศร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดในตู้อบทั้งสองฝั่ง การทดสอบนี้ดำเนินการในช่วงวันที่ 20-22 ธันวาคม 2566 ซึ่งช่วงวันดังกล่าวมีสภาพอากาศปลอดโปร่ง ท้องฟ้าแจ่มใส มีเมฆเป็นระยะในบางวัน ความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดตอนเที่ยงสุริยะทั้งสามวันมากกว่า 800 W/m^2 มีความเข้มเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 435.71 W/m^2 การเสริมความร้อนด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรดช่วยให้อุณหภูมิในห้องอบทั้งสองแบบสูงขึ้น โดยอุณหภูมิสูงสุดในห้องอบสองชั้นสูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดของห้องอบชั้นเดียวเล็กน้อย อุณหภูมิเฉลี่ยในห้องอบชั้นเดียวมีค่าเท่ากับ 45.82°C และมีอุณหภูมิเฉลี่ยในห้องอบสองชั้นที่ 47.26°C โดยมีการกระจายตัวของอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังจะเห็นได้จากอุณหภูมิที่ถาดวางผลิตภัณฑ์มีค่าใกล้เคียงกันทั้งสามระดับ อุณหภูมิในห้องอบจะสูงขึ้นตามความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยช่วงกลางของการอบแห้งในแต่ละวัน อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 60°C แต่เนื่องจากการทดสอบนี้มีการระบายอากาศ จึงมีอากาศใหม่ซึ่งมีความชื้นสูงกว่าไหลเข้าระบบ ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องอบไม่ลดต่ำลงมากนัก



รูปที่ 7 รังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบที่ใช้การอบแห้งโดยการพาแบบบังคับด้วยพัดลมระบายอากาศและหมุนวนอากาศร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรด

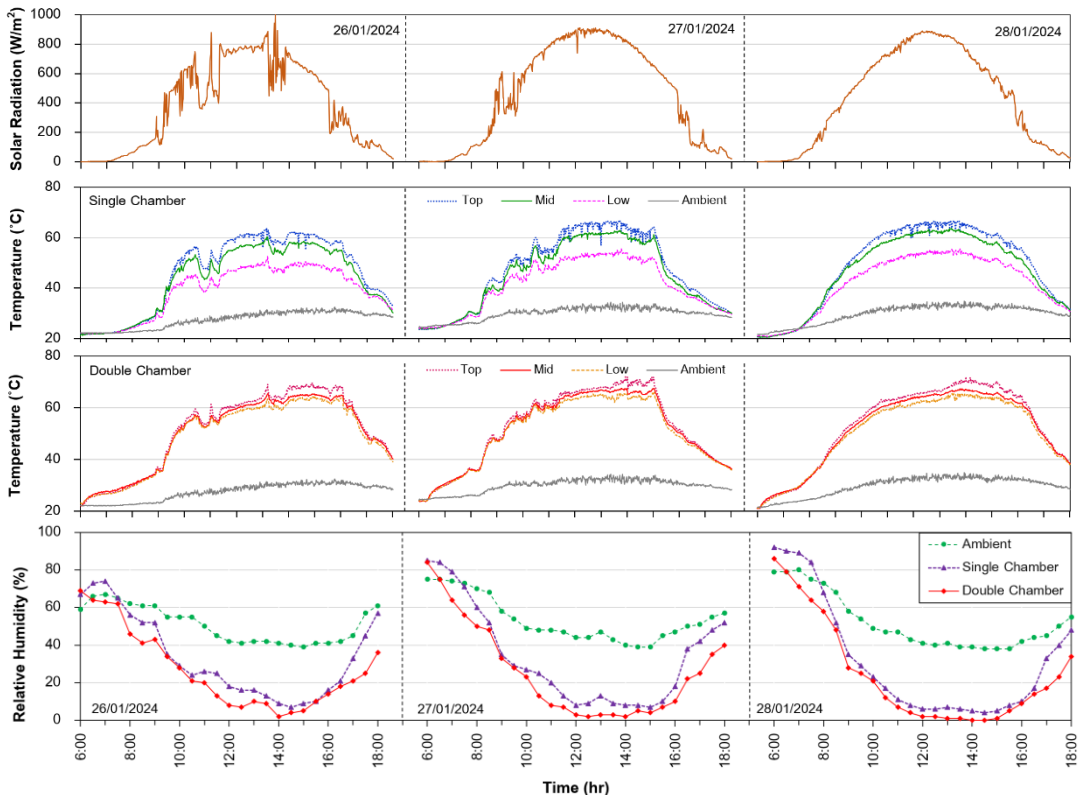
โดยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของอากาศ ทำให้ปริมาตรจำเพาะของอากาศเพิ่มขึ้น จึงเป็นสภาวะที่อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jeentada and Phetsongkram [4] และเป็นไปตามพฤติกรรมของ คุณสมบัติอากาศชื้นในแผนภูมิไซโครเมตริก เนื่องจากอุณหภูมิภายในห้องอบชั้นเดียวกับอุณหภูมิในห้องอบสองชั้นใกล้เคียงกัน จึงทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบทั้งสองฝั่งมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 7 ส่งผลให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงในลักษณะเดียวกัน อัตราการอบแห้งของ ผลิตภัณฑ์จึงมีค่าใกล้เคียงกัน ผลิตภัณฑ์ในเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ที่ใช้ห้องอบชั้นเดียวและห้องอบสองชั้นมีความชื้นเริ่มต้นที่ 65.61 และ 65.23 % (w.b.) ตามลำดับ โดยห้องอบทั้งสองแบบสามารถลดความชื้นกล้วยน้ำว้าได้ต่ำกว่า 20 % (w.b.) ภายใน 3 วัน และมีความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 14.46 และ 13.74 % (w.b.) ตามลำดับ ดังผลการทดสอบในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความชื้นกล้วยน้ำว้าและอัตราการอบแห้งในการอบแห้งแสงอาทิตย์โดยการพาแบบบังคับด้วยพัดลมระบายอากาศและหมุนวนอากาศร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรด

การทดสอบที่ 4 เป็นการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยใช้พัดลมหมุนวนอากาศและความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรด ทำการทดสอบในวันที่ 26-28 มกราคม 2567 ตั้งแต่เวลา 6.00-18.00 น. สภาพท้องฟ้าอากาศในวันแรกมีเมฆสลับกับแดดตลอดทั้งวัน และท้องฟ้าปลอดโปร่งในวันที่ 2 และ 3 โดยมีเมฆเป็นครั้งคราวในช่วงเช้าและช่วงเย็น อย่างไรก็ตามทั้งสามวันมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ตอนเที่ยงสุริยะมากกว่า 880 W/m^2 มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 426.01 W/m^2 โดยความร้อนจากแสงอาทิตย์และฮีตเตอร์อินฟราเรดทำให้อุณหภูมิภายในห้องอบชั้นเดียวและสองชั้นสูงกว่า 65 และ 70°C มีอุณหภูมิในห้องอบเฉลี่ยที่ 44.46°C และ 51.25°C

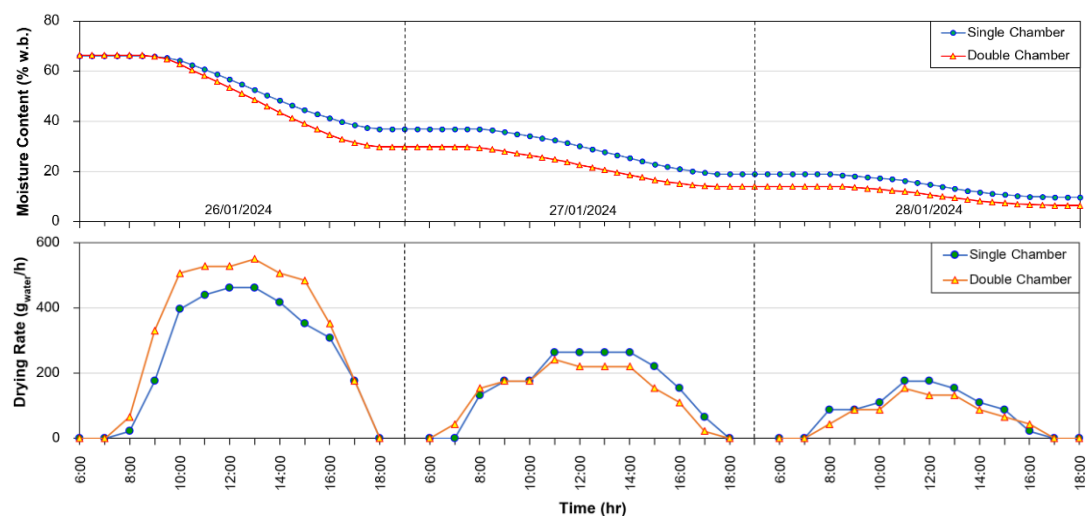
ตามลำดับ กรณีห้องอบสองชั้นซึ่งมีอากาศไหลวนระหว่างผนังของห้องอบชั้นนอกและชั้นใน ทำให้อากาศเกิดการผสมและแลกเปลี่ยนถ่ายโอนความร้อนซึ่งกันและกัน อุณหภูมิที่ถาดวางผลิตภัณฑ์ทั้งสามระดับภายในห้องอบสองชั้นจึงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 รังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบที่ใช้การอบแห้งโดยการพาแบบบังคับด้วยพัดลมหมุนวนอากาศร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรด

เนื่องจากการทดสอบนี้ไม่มีการเปิดพัดลมระบายอากาศ จึงมีการสูญเสียความร้อนออกจากห้องอบน้อยมาก ทั้งยังมีการเสริมความร้อนด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรด อุณหภูมิภายในห้องอบที่สูงขึ้นทำให้อากาศขยายตัว ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องอบลดลง มวลน้ำในผลิตภัณฑ์จะระเหยออกสู่อากาศรอบ ๆ การขยายตัวของอากาศนอกจากทำให้อากาศสามารถรับไอน้ำได้มากขึ้นแล้ว ยังดันอากาศขึ้นออกจากห้องอบตามช่องว่างระหว่างใบพัดลมระบายอากาศอย่างต่อเนื่อง ซ้ำ ๆ อากาศส่วนใหญ่ที่เหลือจะถูกพัดลมหมุนวนในห้องอบผลักอากาศให้เคลื่อนที่วนกลับมารับมวลน้ำที่ระเหยจากผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น กรณีนี้อากาศในห้องอบมีความชื้นสูงขึ้นมาก อากาศใหม่ซึ่งมีความชื้นน้อยกว่าจะไหลเข้าห้องอบในปริมาณเท่ากับอากาศที่ระบายออก มวลน้ำ

ในอากาศที่ระบายออกจึงมากกว่ามวลน้ำในอากาศที่ไหลเข้าห้องอบ ทำให้อัตราส่วนความชื้นของอากาศในห้องอบลดลง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจึงลดต่ำลงอีกตามหลักการไซโครเมตริก จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้อากาศภายในห้องอบมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำมาก ในขณะที่อุณหภูมิภายในห้องอบค่อนข้างสูง อัตราการถ่ายโอนมวลน้ำออกจากผลิตภัณฑ์จึงสูงกว่าการทดสอบอื่น ๆ ส่งผลให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ที่ใช้ห้องอบสองชั้นสามารถลดความชื้นให้ต่ำกว่า 20 % (w.b.) ได้ภายในเวลา 2 วัน จากการทดสอบอบแห้งผลิตภัณฑ์พบว่า ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยน้ำว้าในเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ที่ใช้ห้องอบชั้นเดียวและห้องอบสองชั้นอยู่ที่ 66.10 และ 66.41 % (w.b.) ตามลำดับ เมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งครบสามวันจะมีความชื้นสุดท้ายที่ 9.70 และ 6.41 % (w.b.) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อัตราการอบแห้ง จะเห็นว่าอัตราการอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ที่ใช้ห้องอบสองชั้นมีอัตราการอบแห้งในวันแรกสูงกว่าแบบห้องอบชั้นเดียว โดยมีอัตราการอบแห้งสูงสุดในวันแรก 550 g_{water}/h ดังรูปที่ 10 มวลน้ำรวมที่ระเหยออกในวันแรกเท่ากับ 4.026 kg จากน้ำหนักเริ่มต้น 10.98 kg



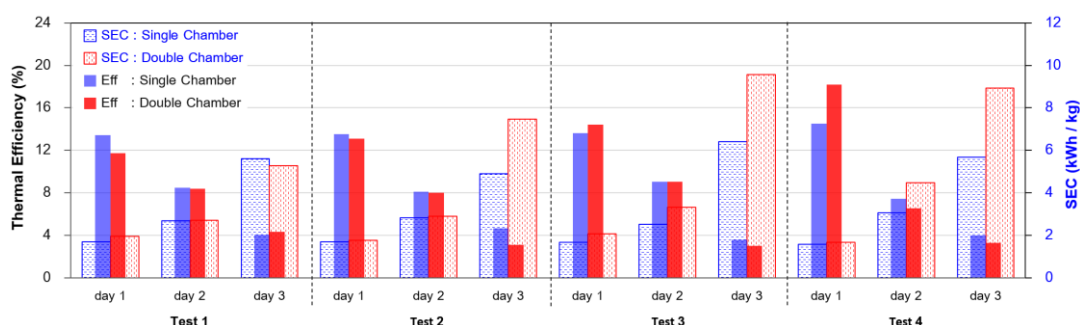
รูปที่ 10 ความชื้นกล้วยน้ำว้าและอัตราการอบแห้งในการอบแห้งแสงอาทิตย์โดยการพาแบบบังคับด้วยพัดลมหมุนวนอากาศร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรด

3.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

สำหรับประสิทธิภาพเชิงความร้อนและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งกล้วยน้ำว้ารายวันเปรียบเทียบกันทั้ง 4 การทดสอบ แสดงดังรูปที่ 11 จะเห็นว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ (กราฟสีทึบ) จะมีค่าสูงที่สุดในวันแรกและลดลงในวันถัดไป

ทุกการทดสอบ และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (กราฟสีโปร่ง) จะต่ำที่สุดในวันแรกและสูงขึ้นในวันถัดไป

ในช่วงเริ่มต้นกล้วยน้ำว้ายังมีความชื้นอยู่มาก เมื่ออุณหภูมิของอากาศในห้องอบสูงขึ้น ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวกล้วยน้ำว้ากับอากาศในห้องอบมีมาก จึงเกิดการถ่ายโอนความร้อนเข้าสู่เนื้อผลิตภัณฑ์พร้อมกับการถ่ายโอนมวลความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี ทำให้ปริมาณความชื้นลดลงมากในการอบแห้งวันแรก จึงมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง ส่งผลให้การใช้พลังงานในการลดความชื้นต่อหน่วยมวลความชื้นหรือความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำ สำหรับในวันถัดไปความชื้นของกล้วยน้ำว้าลดน้อยลง การแพร่ความชื้นในเนื้อกล้วยน้ำว้าไปยังผิวของกล้วยเกิดขึ้นอย่างไม่ต่อเนื่อง ผิวด้านนอกของกล้วยจึงเริ่มแห้ง เมื่อความชื้นที่ผิวกล้วยมีน้อย อุณหภูมิที่ผิวกล้วยจะสูงขึ้นมาก ทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวกล้วยกับอากาศร้อนเกิดขึ้นน้อยลง อัตราการอบแห้งจึงลดลง [1] การใช้พลังงานในการลดความชื้นต่อหน่วยมวลความชื้นจึงสูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลง โดยความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงความชื้นต่ำที่สุดซึ่งเป็นความชื้นสมดุล [1, 15, 16]



รูปที่ 11 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนรายวันและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรายวัน

การคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะพิจารณาจากระยะเวลาอบแห้ง รังสีอาทิตย์ และพลังงานอื่นๆ ที่ใช้กับอุปกรณ์ในระบบอบแห้ง ตั้งแต่เริ่มกระบวนการจนความชื้นลดลงถึง 20 % (w.b.) โดยระยะเวลาอบแห้ง รังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมและฮีตเตอร์อินฟราเรด แสดงดังตารางที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะต่าง ๆ ที่ได้จากการอบแห้งพบว่า การอบโดยไม่เปิดพัดลมระบายอากาศ (การทดสอบที่ 1 และ 4) จะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยในห้องอบสูงขึ้น การเปิดพัดลมหมุนวนอากาศ (การทดสอบที่ 2, 3 และ 4) ทำให้อุณหภูมิภายในห้องอบสองชั้นมีค่าสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน การอบโดยใช้ความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์ช่วยให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลง แม้ว่าการใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดจะทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น แต่การอบแห้งด้วยห้องอบสองชั้นร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดกลับทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งลดลง เห็นได้จากการทดสอบที่ 1 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ของห้องอบสองชั้นอยู่ที่ 2.71 kWh/kg หรือเท่ากับ 9.76 MJ/kg เมื่ออบแห้งโดยเปิดพัดลมหมุนวนอากาศและใช้ความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์อินฟราเรด (ดังผลการทดสอบที่ 4) จะทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงเหลือเพียง 2.19 kWh/kg (7.88 MJ/kg) เท่ากับค่าความสิ้นเปลืองพลังงานลดลง 19.19 % กรณีที่เปิดพัดลมระบายอากาศร่วมด้วย (ดังผลการทดสอบที่ 3) จะทำให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 2.79 และ 2.52 kWh/kg สำหรับห้องอบหนึ่งชั้นและสองชั้นตามลำดับ สำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีที่ 4 จะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยห้องอบชั้นเดียวและห้องอบสองชั้นที่ 4.70 และ 6.05 % ตามลำดับ ในขณะที่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 2.76 และ 2.19 kWh/kg ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยห้องอบชั้นเดียวกับห้องอบสองชั้น จะเห็นได้ว่าการอบแห้งด้วยห้องอบสองชั้นมีการใช้พลังงานลดลง 0.57 kWh/kg หรือลดลง 20.65 % เมื่อพิจารณาผลประหยัดทางพลังงาน โดยเปรียบเทียบเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบห้องอบชั้นเดียวกับสองชั้นเมื่อทำเป็นห้องอบสองชั้นทั้งสองฝั่งจะสามารถอบกล้วยน้ำว้าได้ครั้งละ 22 kg การอบแห้งกล้วยน้ำว้าโดยเปิดพัดลมหมุนวนอากาศร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดหนึ่งครั้งใช้เวลา 2 วัน (19.5 ชั่วโมง ตามผลการทดสอบที่ 4) ในหนึ่งปีอบแห้งได้ 135 ครั้ง (คิดที่ 270 วัน ตามสภาพอากาศและฤดูกาล) จะคิดเป็นค่าพลังงานที่ประหยัดได้ 1,693 kWh ต่อปี

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นในการทดสอบ

Drying Process Parameters	ผลการอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบห้องอบชั้นเดียวและสองชั้น จนได้ความชื้น 20 % (w.b.)							
	การทดสอบ 1		การทดสอบ 2		การทดสอบ 3		การทดสอบ 4	
	ชั้นเดียว	สองชั้น	ชั้นเดียว	สองชั้น	ชั้นเดียว	สองชั้น	ชั้นเดียว	สองชั้น
Average T_{chamber} ($^{\circ}\text{C}$)	45.82	47.26	40.51	39.26	45.85	49.14	44.46	51.25
Max T_{chamber} ($^{\circ}\text{C}$)	73.19	73.20	58.37	52.19	65.37	66.44	66.67	72.02
Max different T_{chamber} ($^{\circ}\text{C}$)	16.17	21.94	10.02	4.31	11.32	8.19	9.91	7.43
Average I_{solar} (W/m^2)	421.51	421.51	385.11	385.11	435.71	435.71	426.01	426.01
Drying time (h)	30.5	32	29	28.5	28.5	27	23	19.5
$E_{\text{fan}} + E_{\text{heater}}$ (kWh)	0	0	0.14	0.14	2.89	3.15	2.99	2.54
Overall η_{th} (%)	4.22	3.73	4.47	4.66	4.68	5.20	4.70	6.05
Overall SEC (kWh/kg)	2.39	2.71	2.27	2.20	2.79	2.52	2.76	2.19

3.3 ค่าคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์

ผลการวัดค่าสีของกล้วยน้ำว้าหลังการอบแห้งทั้ง 4 การทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 โดยค่าสีของกล้วยน้ำว้าสดก่อนอบแห้งมีค่าความสว่าง L^* เท่ากับ 82.17 ± 1.23 ค่าสีแดง a^* เท่ากับ 1.28 ± 0.16 และค่าสีเหลือง b^* เท่ากับ 10.91 ± 0.90 จากการทดสอบพบว่า กล้วยน้ำว้าที่ผ่านกระบวนการอบแห้งจะมีสีเข้มมากขึ้นสังเกตได้จากค่าความสว่าง (L^*) ที่ลดลงและค่าสีแดง (a^*) ที่เพิ่มขึ้น โดยการอบแห้งในการทดสอบที่ 4 จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีเข้มมากที่สุด เนื่องจากวิธีการอบแห้งดังกล่าวมีการใช้ความร้อนร่วมจากฮีตเตอร์อินฟราเรดและไม่มีการระบายอากาศ ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบสูงกว่าการอบด้วยวิธีอื่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) มากกว่า [21, 22]

ตารางที่ 2 คุณภาพด้านสีของกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการอบแห้ง

การทดสอบ	ตัวอย่างจากถาด	ห้องอบหนึ่งชั้น			ห้องอบสองชั้น		
		L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
1	ชั้นบนสุด	50.51 ± 0.49^f	11.64 ± 0.27^d	12.60 ± 0.54^a	48.01 ± 0.45^e	11.57 ± 0.35^c	12.73 ± 0.49^b
	ชั้นล่างสุด	53.89 ± 0.37^{ab}	11.85 ± 0.43^{cd}	12.12 ± 0.24^{ab}	54.37 ± 0.27^b	12.08 ± 0.55^c	13.90 ± 0.46^a
2	ชั้นบนสุด	52.43 ± 0.47^c	10.02 ± 0.41^e	11.77 ± 0.51^{bc}	57.77 ± 0.15^a	9.54 ± 0.40^d	11.87 ± 0.65^c
	ชั้นล่างสุด	54.31 ± 0.39^a	10.38 ± 0.30^e	11.98 ± 0.44^{ab}	58.28 ± 0.34^a	8.90 ± 0.52^e	12.82 ± 0.45^b
3	ชั้นบนสุด	51.59 ± 0.51^d	12.01 ± 0.27^{cd}	11.76 ± 0.44^{bc}	52.49 ± 0.88^d	12.85 ± 0.47^b	10.85 ± 0.46^d
	ชั้นล่างสุด	53.42 ± 0.46^b	12.18 ± 0.40^c	11.13 ± 0.49^c	53.51 ± 0.44^c	11.86 ± 0.49^c	10.55 ± 0.43^d
4	ชั้นบนสุด	50.64 ± 0.34^{ef}	13.60 ± 0.38^a	10.38 ± 0.57^d	47.54 ± 0.40^e	14.13 ± 0.34^a	10.17 ± 0.36^d
	ชั้นล่างสุด	51.14 ± 0.37^{de}	12.91 ± 0.37^b	11.64 ± 0.41^{bc}	47.80 ± 0.29^e	13.98 ± 0.22^a	10.16 ± 0.43^d

หมายเหตุ: อักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการวัดค่าสีผลิตภัณฑ์แสดงให้เห็นว่า การอบโดยไม่เปิดพัดลมระบายอากาศและพัดลมหมุนวนอากาศ การถ่ายเทความร้อนภายในห้องอบเป็นการพาแบบธรรมชาติ อุณหภูมิในห้องอบค่อนข้างสูง โดยอุณหภูมิที่ถาดวางผลิตภัณฑ์ชั้นบนสุด (ถาดที่ 1) และชั้นล่างสุด (ถาดที่ 5) แตกต่างกันถึง 16.17°C และ 21.94°C สำหรับห้องอบชั้นเดียวและสองชั้นตามลำดับ ดังผลการทดสอบที่ 1 ในตารางที่ 1 คุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงต่างกัน เห็นได้จากค่าสีของผลิตภัณฑ์ในการทดสอบที่ 1 สีของผลิตภัณฑ์ในห้องอบชั้นเดียวที่ถาดชั้นบนสุดมีค่าความสว่าง 50.51 และชั้นล่างสุดมีค่า 53.89

และในห้องอบสองชั้นมีค่าความสว่างชั้นบนสุดที่ 48.01 และชั้นล่างสุดที่ 54.37 รวมถึงค่าสีแดงและสีเหลืองที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kunwisawa et al [14] ที่ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสีของกล้วยหอมทองแผ่นอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 80 90 และ 100 °C พบว่า กล้วยแผ่นจะมีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้นเมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น การควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ในห้องอบที่อุณหภูมิต่างกันมากให้มีค่าคุณภาพสีใกล้เคียงกันจึงมีความยุ่งยากสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ในห้องอบสองชั้นที่มีการเปิดพัดลมหมุนวนอากาศทำให้อุณหภูมิในห้องอบใกล้เคียงกัน ในการทดสอบที่ 2 และ 4 กล้วยน้ำว้าในห้องอบสองชั้นจะมีค่าคุณภาพสีของกล้วยน้ำว้า ได้แก่ ค่าความสว่างและค่าสีแดงใกล้เคียงกัน โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ในขณะที่การทดลองที่ 3 ซึ่งเป็นการอบแห้งโดยเปิดพัดลมหมุนวนอากาศและพัดลมระบายอากาศ ค่าความสว่างมีค่าใกล้เคียงกันมากแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$)

4. สรุปผลการวิจัย

ในการทดสอบอบกล้วยน้ำว้าสดจนได้ความชื้น 20 % (w.b.) ด้วยเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ที่ใช้ห้องอบชั้นเดียวเปรียบเทียบกับห้องอบสองชั้นพบว่า

4.1 การอบแห้งโดยการพาแบบธรรมชาติทั้งแบบห้องอบชั้นเดียวและสองชั้นจะมีอุณหภูมิภายในห้องอบค่อนข้างสูง และมีผลต่างอุณหภูมิระหว่างชั้นวางผลิตภัณฑ์มาก โดยผลต่างอุณหภูมิอยู่ที่ 16.17 และ 21.94 °C ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีสีเข้มคล้ำไม่สม่ำเสมอหรือใกล้เคียงกัน

4.2 การอบผลิตภัณฑ์ในห้องอบสองชั้นโดยเปิดพัดลมหมุนวนอากาศช่วยให้อุณหภูมิระหว่างชั้นวางผลิตภัณฑ์ในห้องอบราบเรียบสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน ข้อดีของห้องอบที่มีอุณหภูมิระหว่างชั้นใกล้เคียงกัน คือ สามารถทำตารางผลิตภัณฑ์ในห้องอบแห้งซ้อนกันได้หลายชั้น โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความแห้งสม่ำเสมอเท่า ๆ กัน และมีสีผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกัน

4.3 การอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ แม้ว่าการใช้ความร้อนร่วมจากฮีตเตอร์อินฟราเรดจะทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น แต่การอบผลิตภัณฑ์โดยใช้ห้องอบสองชั้นกลับทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งลดลง จากการศึกษาพบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานลดลงถึง 20.65 % เมื่อใช้ห้องอบสองชั้นร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดและพัดลมหมุนวน ซึ่งคิดเป็นค่าพลังงานที่ประหยัดได้ 1,693 kWh ต่อปี

5. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการเปิดพัดลมระบายอากาศทำให้สูญเสียความร้อนออกนอกระบบ อีกทั้งอากาศภายนอกที่ไหลเข้าห้องอบมีความชื้นสูงกว่า การเปิดพัดลมระบายอากาศจึงควรทำเป็นช่วงใน

ระยะเวลาสั้น ๆ โดยอาจเพิ่มระบบควบคุมการเปิดปิดพัดลมระบายอากาศและฮีตเตอร์ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพดีขึ้นและใช้งานได้สะดวกมากขึ้น นอกจากนี้การใช้ฮีตเตอร์เป็นความร้อนเสริมเป็นทางเลือกหนึ่งในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ในช่วงเวลาที่ไม่ได้มีแสงแดด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ผู้สนับสนุนเงินวิจัยประจำปีงบประมาณ 2567 และขอขอบคุณสถาบันวิจัยและส่งเสริมศิลปวัฒนธรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรีที่อำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานและดำเนินการทางเอกสารวิจัย

References

- [1] Soponronnarit S. Drying of cereal grains and certain foods. 7th ed. Bangkok, Thailand: King Mongkut's University of Technology Thonburi Press; 1997. (In Thai)
- [2] Office of Agricultural Economics Ministry of Agriculture and Cooperatives. Export [Internet]. 2023 [cited 2023 Jan 14]. Available from: <https://impexpth.oae.go.th/export> (In Thai)
- [3] Janjai S. Solar Drying Technology. Nakhon Pathom, Thailand: Phetkasem Printing; 2017. (In Thai)
- [4] Jeentada W, Phetsongkram P. Geometrical effects of solar greenhouse dryer on rubber sheet drying. The journal of kmutnb 2017;27(1):89-99. (In Thai)
- [5] Witinantakit K, Uengkimbuan N, Rungsawang S. Mathematical modeling of shiitake mushroom drying using infrared vacuum technique. SWU Engineering Journal 2019; 14(3):1-13. (In Thai)
- [6] Pengpoo A, Jamjang K. The Production of banana flour with antioxidant from 4 type of bananas. The 3rd Kamphaeng Phet Rajabhat University National conference; 2016; Kamphaeng Phet Rajabhat University, Kamphaeng Phet, Thailand. p. 410-15. (In Thai)
- [7] Jaekhom S, Witinantakit K, Sitranon J, Suwannatud T. Study and comparison herb drying using vacuum combined far infrared radiation and hot air. Journal of Renewable Energy for Community 2019;2(2):71-7. (In Thai)
- [8] Witinantakit K, Jaekhom S. Mathematical modeling of combined infrared and vacuum drying of galangals. Kasem Bundit Engineering Journal 2019;9(3):29-44. (In Thai)

- [9] Piwsaoad J. Performance of a greenhouse solar dryer for drying para rubber sheets [Doctor of Philosophy in Physics]. Nakhon Pathom, Thailand: Silpakorn University; 2014. (In Thai)
- [10] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Ministry of Energy. Handbook of heat production from solar energy. Bangkok, Thailand: Department of Alternative Energy Development and Efficiency; 2019. (In Thai)
- [11] Taikhao A, Teekasap S. Natural convection and forced convection solar dryers. EAU Heritage Journal Science and Technology 2013;7(1):23-31. (In Thai)
- [12] Srichat A, Vengsungnle P, Hongtong K, Kaewka W, Jongpluempiti J. A comparison of temperature for parabola and sinusoidal greenhouse solar dryer by CDF. IOP Conference Series: Material Science and Engineering 2019;501:012006.
- [13] Chawda K, Khare T. Thermal performance analysis of greenhouse solar dryers using computational fluid dynamics and comparison with different geometrical structures. International Research Journal of Engineering and Technology 2021;8(4);2007-18.
- [14] Kunwisawa J, Prachayawarakorn J, Soponronnarit S. Effect of drying temperature on volatile compounds and physical qualities of banana slices. KMUTT Research and Development Journal 2007;30(4):611-21. (In Thai)
- [15] Doungporn S, Loykaew A, Panprom P, Thaipituk P. Drying of gros michel banana by using solar combined with Infrared dryer. The Science Journal of Phetchaburi Rajabhat University 2019;16(1):12-24. (In Thai)
- [16] Im-erb N, Witinantakit K. The study of drying kinetics and qualities of dried banana slices by vacuum-infrared dryer. Srinakharinwirot University Engineering Journal 2021; 16(3):24-36. (In Thai)
- [17] Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO). Banana ripening guide. Banana Research Advisory Committee, Technical Bulletin 3. Melbourne, Australia: Banana Research Advisory Committee; 1972.
- [18] Bala BK. Drying and storage of cereal grain. New Delhi: Oxford and IBH Publishing; 1997.
- [19] Pruengam P, Pathaveerat S, Pukdeewong P. Fabrication and testing of double-sided solar collector dryer for drying banana. Case Studies in Thermal Engineering 2021;27: 101335.

- [20] Ninchuewong T, Ekphon A, Tirawanichakul S, Tirawanichakul Y. Drying of air dried sheet rubber using hot air dryer and solar dryer for small entrepreneurs and small rubber cooperatives. Burapha Sciecn Journal 2012;17(2):50-59. (In Thai)
- [21] Ongprasert T, Jitjack K. A study of solar greenhouse drying in association with infrared heater for dehydration cherry tomatoes. Kasem Bundit Engineering Journal 2020;10(3):62-83. (In Thai)
- [22] Jaekhom S, Witinantakit K. Drying kinetics of chicken using superheated steam technique. Kasem Bundit Engineering Journal 2019;9(3):201-17. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



เจิมธง ประรณนารักษ์ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี 38 หมู่ 8 ต.นาวิ่ง อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000 E-mail: chermdhong.pra@mail.pbru.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: พลังงานทดแทน เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์และมหาสมุทร การควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้า พลศาสตร์ของระบบพลังงาน และการควบคุม



จutipพร อินทะนิน สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี 38 หมู่ 8 ต.นาวิ่ง อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000 E-mail: jutiporn.int@mail.pbru.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: พลังงานทดแทน เทคโนโลยีชีวมวล วัสดุวิศวกรรม อิเล็กทรอนิกส์พลังงานในอาคารและโรงงาน เทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม



กชศร หัสโรค์ สาขาวิชาวิทยาการแปรรูปและการประกอบอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 96 หมู่ 3 ถ.พุทธมณฑลสาย 5 ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170 E-mail: hussarokanokorn@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: พลังงานทดแทน การจัดการสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม การจัดการพลังงาน วัสดุนาโน และการจัดการก๊าซเรือนกระจก



พรอริยา จิรินทร์ สาขาวิชาอาหารและโภชนาการประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี 38 หมู่ 8 ต.นาุ้ง อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000 E-mail: pornariya.chi@mail.pbru.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: การแปรรูปอาหาร อาหารเพื่อสุขภาพ ความยั่งยืนทางอาหาร ฤทธิ์ทางชีวภาพของสมุนไพร การวิเคราะห์ทางเคมีอาหาร การยืดอายุการเก็บอาหาร

Article History:

Received: February 23, 2024

Revised: June 11, 2024

Accepted: June 18, 2024

การศึกษาและออกแบบเตาเผาขยะห้องเผาไหม้ 2 ห้องขนาดเล็ก
โดยใช้แผ่นเหล็กกล้าเป็นผนังกั้นห้อง
**STUDY AND DESIGN OF THE SMALL DOUBLE CHAMBER WASTE
INCINERATOR USING STEEL PLATES AS ROOM PARTITIONS**

ภักดี สิริสุทธิกวิน

อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย
199 ม. 6 ต.ป่าอ้อดอนชัย อ. เมือง จ.เชียงราย 57000, pakdee.me@gmail.com

Pakdee Sittiritkawin

Lecture, Department of Mechanical engineering, Faculty of engineering, Chiangrai college
199 Moo 6 Paoordonchai Subdistrich, Muang, Chiangrai, Thailand 57000,
pakdee.me@gmail.com.

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ในการทำวิจัยเพื่อออกแบบและสร้างเตาเผาขยะที่มีห้องเผาไหม้สองห้อง โดยใช้แผ่นเหล็กกล้าเป็นผนังกั้นระหว่างห้องเผาไหม้ทั้งสองและเพื่อประเมินสมรรถนะของเตาเผาขยะในแง่ของประสิทธิภาพการเผาไหม้ อัตราการป้อนขยะและค่ามลพิษของไอเสีย โดยมีวิธีการศึกษาเก็บข้อมูลปริมาณขยะแล้วนำข้อมูลมาออกแบบและสร้างเตา จากนั้นจึงทำการทดสอบเผาขยะในอัตราส่วนขยะเปียกและขยะแห้งโดยน้ำหนักระหว่าง 0:100 – 60:40 ใช้อัตราการป้อนขยะ 50 kg/h ผลจากการวิจัยพบว่าสามารถใช้เผาขยะที่มีอัตราส่วนได้ไม่เกิน 50:50 และสามารถป้อนขยะได้สูงสุดในอัตรา 42 kg/h โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพเตาสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 98.5 และยังพบว่าการใช้เหล็กกล้าเป็นวัสดุทำเป็นผนังกั้นสามารถช่วยลดค่ามลพิษทางอากาศให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานควบคุมได้โดยมีปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) จะมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 44 ppm ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) มีค่า 135 ppm และค่าความทึบแสง (Opacity) ที่ 17 % แต่ถ้ามีการเพิ่มขยะเปียกไปเป็นร้อยละ 60 ของขยะทั้งหมดจะทำให้ค่ามลพิษทางอากาศเกินมาตรฐาน

คำสำคัญ: เตาเผาขยะ, ห้องเผาไหม้, เหล็กกล้า

ABSTRACT

The purpose of the study is to design and build waste incinerators with a double combustion chamber by using a steel plate as a wall between the two combustion chambers, then evaluate their performance in terms of combustion efficiency, waste feed rate, and exhaust pollution value, by a method of studying and collecting waste data and then using it to design and build the incinerators. Then do a test of burning waste with a ratio of wet waste to dry waste by weight between 0:100 to 60:40 and a waste feed rate of 50 kg/h. The results of the study found that they can be used to burn waste with a ratio not exceeding 50:50 and can feed waste at a maximum rate of 42 kg/h. Considering that the incinerator's efficiency is as high as 98.5%, In addition, It was also found that using steel as a material for partition walls can help reduce air pollution levels to within control standards by the amount of carbon monoxide (CO) gas having a minimum value of 44 ppm, oxides of nitrogen (NO_x) having the value of 135 ppm, and the opacity value of 17%. However, adding wet waste to 60% of the total waste will cause the air pollution levels to exceed the standard.

KEYWORDS: incinerator, combustion chamber, steel

1. บทนำ

การจัดการขยะเป็นหนึ่งในประเด็นสำคัญที่ต้องช่วยกันแก้ปัญหาโดยเฉพาะสังคมขนาดเล็กที่มีความต้องการในการรับมือกับขยะที่เกิดขึ้นในพื้นที่ของตนเอง การกำจัดขยะด้วยวิธีการเผาเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากสะดวกและรวดเร็วใช้พื้นที่น้อยประหยัดงบประมาณโดยเฉพาะหน่วยงานระดับท้องถิ่นหลายแห่งใช้เตาเผาขยะเพื่อกำจัดขยะในพื้นที่ของตนเอง แต่ก็พบว่าบางชุมชนต้องกำจัดขยะด้วยตนเองด้วยวิธีการเผาซึ่งก็พบปัญหาเตาเผาขยะเหล่านั้นสร้างมลพิษทางอากาศขึ้นมาอีกครั้ง จากการศึกษาข้อมูลที่ผ่านมาพบว่ามีการวิจัยที่ศึกษาการออกแบบเตาเผาขยะขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดขยะและสามารถควบคุมมลพิษได้ดี ซึ่งการกำจัดมลพิษจากเตาเผาสามารถทำได้หลากหลายวิธีเช่นการออกแบบระบบควบคุมมลพิษไอเสียจากเตาเผาขยะด้วยหอพ่นน้ำโดยอาศัยหยดน้ำที่ถูกพ่นออกมาจับตัวกับอนุภาคฝุ่นและก๊าซต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ อย่างเช่นงานวิจัยของ Sittiritkawan et al [1] ได้พัฒนาเตาเผาขยะขนาดเล็กโดยใช้ถังเหล็กขนาด 200 ลิตร ร่วมกับหอพ่นน้ำเพื่อใช้กำจัดขยะในชุมชน พบว่าสามารถลดค่ามลพิษทางอากาศให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ และยังพบว่า Olisa et al [2] ออกแบบและสร้างเตาเผาขยะที่เสริมอุปกรณ์เป็นชั้นตะแกรงเหล็กที่อยู่ในเตาเผาเพื่อเพิ่มระยะเวลาการคอย

ให้หัยขณะอยู่ในเตาทำให้ความร้อนในเตาช่วยทำให้หัยะแห้งมากขึ้นก่อนจะเผาไหม้ซึ่งวิธีนี้ช่วยลดค่ามลพิษทางอากาศได้เช่นกัน

นอกจากนั้นในการออกแบบห้องเผาไหม้ที่มีการควบคุมไหลของไอเสียเพื่อที่จะชะลอความเร็วของก๊าซร้อนให้ไหลช้าลงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยให้เกิดการเผาไหม้ช้าแต่ต้องมีอุณหภูมิสูงเพียงพอในการเผาไหม้ก๊าซติดไฟที่อุณหภูมิประมาณ $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งก๊าซติดไฟส่วนใหญ่ประกอบด้วย CO , H_2 และ CH_4 อย่างเช่นงานวิจัยของ Sukchana [3] ได้ศึกษาทดสอบสมรรถนะของเตาเผาหัยะขนาดเล็กแบบไอเสียวกกลับภายในห้องเผาไหม้ก่อนออกไปทางปล่องควันโดยมีรังผึ้งสะสมความร้อนภายในปล่องควันเพื่อช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นและสามารถทำให้มลพิษ CO , NO ลดลง มีสมรรถนะในการเผาหัยะได้ในอัตรา 50 kg/h ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้เฉลี่ยประมาณร้อยละ 99 และยังพบว่า Damrongsak et al [4] ได้พัฒนาเตาเผาหัยะชุมชนที่ออกแบบให้ควันหรือไอเสียที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ในห้องเผาไหม้ไหลย้อนลงมาด้านล่างเพื่อเผาซ้ำอีกครั้งหนึ่งซึ่งก็พบว่ามีประสิทธิภาพการเผาทำลายสูงโดยมีประสิทธิภาพการเผาทำลายสูงสุดที่ร้อยละ 94.5 และช่วยลดอนุภาคนขนาดเล็กลงได้

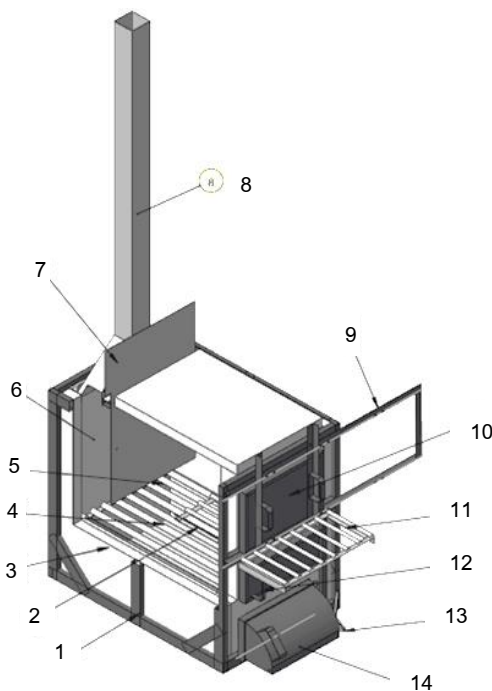
จากแนวทางการควบคุมไหลของไอเสียของเตาเผาหัยะให้ช้าลงเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ช้าได้นั้นยังสามารถทำได้ด้วยการใช้ห้องเผาไหม้แบบสองห้อง ซึ่งก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยควบคุมมลพิษได้อย่างเช่น Chongrungreong [5] มีการศึกษาวิจัยการเผาไหม้เตาเผาหัยะห้องเผาไหม้เดี่ยวและสองห้องเผาไหม้ที่ออกแบบเป็นแบบผนังก่ออิฐที่ไม่มีการใช้หัวเผาเข้ามาช่วย ซึ่งพบว่าเตาสองห้องเผาไหม้ให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และอนุภาคนขนาดเล็กน้อยกว่าเตาเผาแบบห้องเดี่ยว Achawangkul et al [6] ศึกษาเตาเผาหัยะสองห้องที่ใช้สำหรับผลิตแก๊สชีววมวลโดยการติดตั้งชุดหัวเผาช่วยในห้องเตาไหม้ที่สอง เพื่อให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงต่อเนื่องเกิดการเผาไหม้ช้า ในส่วนงานของ Obuka and Ozioko [7] มีการศึกษาออกแบบและการประเมินเตาเผาหัยะแบบมีสองห้องเพื่อลดการปล่อยมลพิษโดยแต่ละห้องมีหัวเผาและระบบจ่ายอากาศเสริม ทำให้ห้องเผาไหม้ที่สองทำงานที่อุณหภูมิอย่างน้อย $1,100\text{ }^{\circ}\text{C}$ และยังช่วยเพิ่มเวลาให้ก๊าซไอเสียอยู่ในเตาได้นานขึ้น (Residence time) ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้น

จากข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการออกแบบเตาเผาหัยะแบบสองห้องเผาไหม้จะช่วยลดมลพิษจากการเผาไหม้ได้ แต่ก็พบว่าห้องเผาไหม้ที่สองยังคงต้องใช้หัวเผาเสริมเพื่อช่วยให้อุณหภูมิในส่วนนี้มีค่าที่สูงเพียงพอต่อการเผาไหม้ก๊าซที่ติดไฟได้ช้า แต่การใช้หัวเผาเสริมในห้องเผาไหม้ที่สองอาจไม่สะดวกกับการใช้งานในระดับชุมชนเพราะต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มในส่วนของการเชื่อมเหล็ก ก๊าซ LPG ฉะนั้นถ้าเราใช้ผนังกันห้องเผาไหม้ที่สองด้วยแผ่นเหล็กกล้าเพื่อให้สามารถส่งผ่านความร้อนจากห้องเผาไหม้ที่หนึ่งที่มีอุณหภูมิสูงไปยังห้องเผาไหม้ที่สองได้และเกิดการเผาไหม้ช้า ซึ่งจะช่วยลดมลพิษให้ต่ำลงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจที่จะช่วยให้ชุมชนสามารถจัดการกับหัยะอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการวิจัยเพื่อศึกษาออกแบบและสร้างเตาเผาหัยะที่มีห้องเผา

ไหม้สองห้องที่ใช้แผ่นเหล็กกล้าเป็นผนังกันระหว่างห้องและศึกษาผลที่เกิดจากเตาเผาขยะที่มีห้องเผาไหม้สองห้อง โดยมีการประเมินสมรรถนะของเตาเผาในแง่ของ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ อัตราการป้อนขยะ ค่ามลพิษของไอเสีย

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

ในการคำนวณหาขนาดเตาเผาขยะที่เหมาะสมกับปริมาณขยะต่อวันที่มีอยู่ในชุมชน โดยเตาเผาจะอาศัยหลักการเผาไหม้ขยะภายในเตาด้วยตัวเองไม่ใช้หัวเผาและพัดลมช่วยในการเผาไหม้ แต่จะอาศัยหลักการปรากฏการณ์ปล่องควัน (Chimney effect) ห้องเผาไหม้ในเตาเผาแยกเป็น 2 ส่วน คือ ห้องเผาไหม้ที่หนึ่ง เป็นห้องเผาไหม้ขยะหลัก ส่วนห้องเผาไหม้ที่สองเป็นห้องเผาไหม้รอง แสดงดังรูปที่ 1 แสดงส่วนต่างๆของเตาเผาประกอบไปด้วย 1) โครงสร้างเตา 2) ตะแกรง 3) ผนังเตา 4) ตะแกรงกรองขี้เถ้า 5) ห้องเผาไหม้ที่หนึ่ง 6) ห้องเผาไหม้ที่สอง 7) แผ่นกันเหล็กกล้า 8) ห้องเผาไหม้ที่สอง 9) ปล่องควัน 10) รางเลื่อนประตู 11) ประตูบานเลื่อนและช่องเติมขยะ 12) ตะแกรงพักขยะ 13) ประตูช่องเกลี่ยขยะ 14) ประตูช่องลมหลักและช่องเขี่ยขี้เถ้า 14) ช่องปรับปริมาณอากาศ



รูปที่ 1 ลักษณะของเตาเผาขยะแบบห้องเผาไหม้สองห้อง

2.1 การออกแบบส่วนประกอบของเตาเผาขยะ

1) ขนาดของห้องเผาไหม้ที่หนึ่ง คำนวณจากสมการ

$$V_1 = \frac{Q_{net}}{Q_0} \quad (1)$$

เมื่อ V_1 คือ ปริมาตรห้องเผาไหม้ที่หนึ่ง, (m^3)

Q_0 คือ อัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนในเตาเผา มีค่า $550 \text{ MJ}/(m^3 \cdot h)$ [8]

Q_{net} คือ ปริมาณความร้อนสุทธิที่ใช้ออกแบบสร้างเตาเผา, MJ/h

$$Q_{net} = Q_{total} - Q_{loss} \quad (2)$$

$$Q_{total} = \dot{m}HV_{ขยะ} \quad (3)$$

เมื่อ Q_{total} คือ ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่เกิดจากการเผาไหม้, MJ/h

$\dot{m}$ คือ อัตราการป้อนขยะ, kg/h

$HV_{ขยะ}$ คือ ค่าความร้อนของขยะ, MJ/kg

ในการคำนวณปริมาณความร้อนที่สูญเสีย (Q_{loss}) จะประกอบไปด้วย ปริมาณความร้อนที่สูญเสียในการระเหยน้ำหรือความชื้นในขยะ (Q_{H_2O}) ปริมาณความร้อนที่สูญเสียในการระเหยน้ำจากการเผาไฮโดรเจน (Q_{H_2}) และ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียในการแผ่รังสีอื่นๆ (Q_R) คิดเป็นร้อยละ 20 ของความร้อนทั้งหมดที่เกิดจากการเผาไหม้ (Q_{total}) [9] มีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

$$Q_{H_2O} = w\dot{m}h_{fg} \quad (4)$$

เมื่อ w คือ มวลของน้ำในขยะ, kg_{H_2O} / kg_{refuse}

h_{fg} คือ เอนทาลปีของการระเหยน้ำให้เป็นไอที่ $25^\circ C$

$$Q_{H_2} = 9m_{H_2}\dot{m}h_{fg} \quad (5)$$

เมื่อ m_{H_2} คือ มวลของไฮโดรเจนในขยะ, kg_{H_2} / kg_{refuse}

$$Q_R = 0.2Q_{total} \quad (6)$$

2) ตะแกรงของเตาเผาขยะ พื้นที่ของตะแกรงรับขยะในเตา โดยที่คำนวณจากอัตราการป้อนขยะเข้าเตาต่อพื้นที่ตะแกรงรับขยะ (LG), $\text{kg/m}^2 \text{ h}$ [10] คำนวณจากสมการ

$$LG = 10 \log(\dot{m}) \quad (7)$$

3) พื้นที่ช่องผ่านก๊าซร้อนจากห้องเผาไหม้ที่หนึ่งไปยังห้องเผาไหม้ที่สอง (A_p) คำนวณได้จากสมการ

$$A_p = \dot{V}_g / v_p \quad (8)$$

เมื่อ $\dot{V}_g$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซไอเสียกรณีการเผาไหม้สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 600°C , m^3/s

v_p คือ ความเร็วของก๊าซไอเสียที่ผ่านช่อง เท่ากับ 17 m/s [10]

4) ขนาดห้องเผาไหม้ที่สอง (V_2), m^3 คำนวณจากสมการ

$$V_2 = A_2 h_c \quad (9)$$

$$A_2 = \dot{V}_g / v_2 \quad (10)$$

เมื่อ V_2 คือ ปริมาตรห้องเผาไหม้ที่สอง, m^3

v_2 คือ ความเร็วของก๊าซไอเสียที่ใช้การออกแบบเท่ากับ 2 m/s [10]

h_c คือ ความสูงของเตาเผาขยะ, m

A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดห้องเผาไหม้, m^2

5) ความสูงของปล่องไอเสีย (h) สำหรับนำไอเสียออกจากห้องเผาไหม้ที่สอง [11]

$$h = \frac{T_a T_g \rho_w D_t}{464.5 P_b (T_g - T_a)} \quad (11)$$

เมื่อ T_a คือ อุณหภูมิภายนอกเตา, K

T_g คือ อุณหภูมิก๊าซไอเสียก่อนออกจากปล่อง, K

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ, kg/m^3

D_t คือ กระแสลมแรงตามธรรมชาติ 3 – 6 mm_{H_2O} เลือกใช้เท่ากับ 3.5 mm_{H_2O} [12]

P_b คือ ความดันบรรยากาศภายนอก 760 mm_{H_2O}

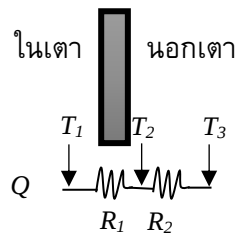
6) พื้นที่หน้าตัดของปล่องไอเสีย (A_g), m^2 คำนวณได้จากสมการ

$$A_g = \dot{V}_g / v_g \quad (12)$$

เมื่อ v_g คือ ความเร็วของก๊าซไอเสียขณะอยู่ในปล่องไอเสียที่ใช้การออกแบบเท่ากับ 10 m/s [10]

7) การออกแบบผนังเตาเผาขยะ

การคำนวณหาความหนาของผนังเตาเพื่อลดการสูญเสียความร้อนและปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน จำเป็นต้องทราบความต้านทานการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเตาแสดงดังรูปที่ 2 โดยเลือกอิฐทนไฟที่มีจำหน่ายในท้องตลาดที่มีขนาดมาตรฐาน อิฐทนไฟ ยี่ห้อ SK-36 ST-76 ขนาด (กว้างxยาวxสูง) 115 x 230 x 75 mm โดยที่ความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวผนังเตาด้านนอกเป็นการสูญเสียความร้อนจากภายในเตาในรูปแบบการพาความร้อนของอากาศแบบอิสระและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งถ้าสามารถลดการสูญเสียความร้อนได้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ดี ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวผนังเตาด้านนอกกับอากาศรอบ ๆ (h_o) โดยทั่วไปประมาณ 30 $\text{w/m}^2.\text{K}$ [13] ซึ่งมีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้



รูปที่ 2 วงจรการถ่ายความร้อนระหว่างผนังภายในกับภายนอกเตาเผาขยะ

$$R_{tot} = R_1 + R_2 = \frac{L}{k} + \frac{1}{h_o} \quad (13)$$

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R_1} = \frac{T_1 - T_3}{R_{tot}} \quad (14)$$

เมื่อ R_{tot} คือ ค่าความต้านทานรวมของผนังเตาเผาขยะ

R_1 คือ ค่าความต้านทานของผนังเตาเผาขยะ

R_2 คือ ค่าความต้านทานของผนังเตาเผาขยะ

L คือ ความหนาผนังเตาอิฐทนไฟหนา 115 mm

k คือ ค่าการนำความร้อนของอิฐทนไฟยี่ห้อ SK-36 รุ่น ST-76 มีค่า 0.24 w/m.K

h_0 คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอากาศแบบอิสระ

T_1 คือ อุณหภูมิผิวผนังภายในเตาเผา มีค่า 800 °C

T_2 คือ อุณหภูมิผิวด้านนอกเตาเผา, °C

T_3 คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมด้านนอกเตาเผา มีค่า 30 °C

8) การคำนวณหาอัตราส่วนการเผาไหม้ที่เหมาะสม

ในการออกแบบเตาเผาขยะต้องคำนึงถึงปริมาณการป้อนขยะในแต่ละครั้งให้สัมพันธ์กับการเผาไหม้ในเตาเผาเพื่อให้รักษาระดับอุณหภูมิในเตา ให้สามารถเผาไหม้ด้วยตนเองได้และมีพื้นที่ว่างในเตาเพียงพอเพื่อให้อากาศสามารถเข้าไปเผาไหม้ได้อย่างสะดวกซึ่งห้องเผาไหม้มีปริมาตร (V_f) = 1.65 m³ ที่ได้จากคำนวณในสมการที่ 1 กำหนดอัตราการเผาไหม้สูงสุดไม่เกิน 50 kg/h ปริมาณความจุขยะที่สามารถใส่ได้เพื่อการเผาในแต่ละครั้งไม่ควรเกินครึ่งของปริมาตรเพื่อเหลือพื้นที่อากาศสำหรับใช้ในการเผาไหม้ ดังนั้นเมื่อคำนวณแล้วได้น้ำหนักขยะที่สามารถเผาได้สูงสุดไม่เกิน 10 kg ต่อ 1 ครั้ง การคำนวณปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ขยะ 10 kg จากสมการอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (ขยะ) [14]

$$AFR_T = (11.44X_C + 34.32X_H + 4.29X_S - 4.29X_O)(1 - X_M - X_A) \quad (15)$$

เมื่อ AFR_T คือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (ขยะ) ทางทฤษฎี โดยมวล

X_C คือ สัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนในขยะ

X_H คือ สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในขยะ

X_S คือ สัดส่วนโดยมวลของซัลเฟอร์ในขยะ

X_O คือ สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในขยะ

X_M คือ สัดส่วนโดยมวลของความชื้นในขยะ

X_A คือ สัดส่วนโดยมวลของเถ้าในขยะ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี (%) ของขยะมูลฝอยชุมชน [13]

C	H	S	O	M	A
63.2	5.5	0.018	32.4	43.5	8.9

คำนวณขนาดช่องเติมอากาศที่เหมาะสมเพื่อเติมอากาศให้เพียงพอกับการเผาไหม้ขยะในเตาที่คำนวณได้จากสมการที่ (15)

$$AFR_T = \dot{V} / \dot{m} \quad (16)$$

$$A = \dot{V} / v_p \quad (17)$$

เมื่อ $\dot{V}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศป้อน, m^3/h

$\dot{m}$ คือ อัตราการป้อนขยะ, kg/h

A คือ ขนาดช่องเติมอากาศที่เหมาะสม, m^2

v_p คือ ความเร็วของก๊าซไอเสียที่ผ่านช่อง เท่ากับ $6 m/s$ [9]

9) การหาประสิทธิภาพการเผาขยะ

การคำนวณหาประสิทธิภาพการเผาทำลายขยะ เพื่อวิเคราะห์หาความสามารถในการกำจัดขยะของเตาเผาขยะ สามารถหาประสิทธิภาพการเผาทำลายขยะได้ดังสมการ [9]

$$\eta = 1 - \frac{CO}{CO_2} \quad (18)$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพการเผาทำลายขยะ

CO คือ ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (ppm)

CO₂ คือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (ppm)

2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

1) การจำแนกประเภทและปริมาณของขยะมีขั้นตอนดังนี้ ในการเก็บข้อมูลขยะในชุมชนแล้ว ซึ่งและบันทึกโดยเก็บรวบรวมทั้งหมด 3 ครั้ง มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $262 kg/day$ กำหนดใช้ปริมาณเผาขยะในอัตรา $50 kg/h$ รวบรวมขยะที่เกิดขึ้นในแต่ละวันนำมาเทกองที่ลานคัดแยกขยะของเตาเผาและทำ

การคัดแยกขยะที่เผาไหม้ไม่ได้ ออกแบ่งเป็นขยะแห้ง จำพวก กระดาษ ไม้ ไม้ ถูพลาสติก ฯลฯ และ ส่วนที่เหลือเป็นขยะเปียกจำพวกเศษอาหาร เปลือกผลไม้ ฯลฯ

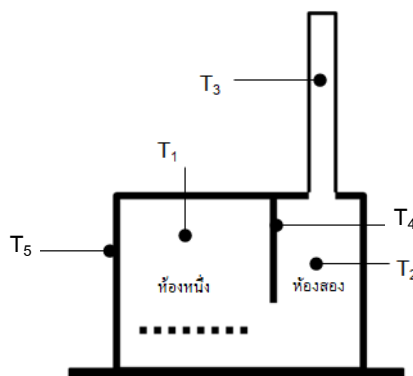
2) การทดสอบเตาเผาขยะโดยการป้อนขยะเพื่อที่จะหาอัตราการเผาไหม้ที่เหมาะสม โดยการจากเก็บขยะเป็นชุด ชุดละ 10 kg ในแต่ละชุดมีอัตราส่วนขยะเปียกต่อขยะแห้งโดยน้ำหนัก 0:100, 20:80, 40:60, 50:50, 60:40 ในระหว่างการป้อนขยะจะควบคุมการป้อนให้เหมาะสมเพื่อให้ การเผาไหม้มีอุณหภูมิในเตาสูงเพียงพอไม่ให้เตาเผาดับ ก่อนป้อนขยะชุดแรกจะทำการจุดเตาเผา ขยะด้วยขยะแห้งจำพวกไม้แห้ง กระดาษ ให้เผามีอุณหภูมิประมาณ 800 – 900 °C เป็นเวลา 20 min เพื่อให้เตาเผาสามารถเผาไหม้ด้วยตัวได้แล้วจึงป้อนขยะชุดแรก จากนั้นทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เก็บค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์

3) การประเมินสมรรถนะเตาเผาขยะ โดยการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ Thermocouple type K ทั้งหมด 5 จุด ได้แก่ ห้องเผาไหม้ที่หนึ่ง ห้องเผาไหม้ที่สอง ปล่องระบายไอเสีย ผนังเตาเผา ด้านนอก และผนังกันห้องแผ่นเหล็กกล้า ติดตั้งเครื่องวิเคราะห์ก๊าซจากการเผาไหม้ (Flue gas analyzer) ที่ปล่องไอเสีย นำข้อมูลวิเคราะห์ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ อัตราการเผาไหม้ที่เหมาะสม อุณหภูมิส่วนต่าง ๆ ของเตาเผา ปริมาณก๊าซมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาขยะที่ประกอบไปด้วย CO, CO₂, SO₂, NO_x, และความทึบแสงของควัน (Opacity)

2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย

1) เครื่องชั่งสปริงขนาด 150 kg ความละเอียด 0.2 kg

2) เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) Type K รุ่น MT 107 วัดอุณหภูมิสูงสุดได้ 1600 °C ติดตั้งภายในเตาจำนวน 5 จุด แสดงดังรูปที่ 3 T₁ คือตำแหน่งติดตั้งภายในห้องเผาไหม้ที่หนึ่ง T₂ คือตำแหน่งติดตั้งภายในห้องเผาไหม้ที่สอง T₃ คือตำแหน่งติดตั้งก๊าซร้อนที่ปล่องควัน T₄ คือ ตำแหน่งติดตั้งผนังกันห้องเผาไหม้ T₅ คือตำแหน่งติดตั้งผนังด้านนอกห้องเผาไหม้



รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิของก๊าซไอเสียในเตาเผาขยะ

3) เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ Testo 425 hot wire ช่วงการวัดความเร็วลม 0.01 – 30 m/s ความละเอียด 0.01 m/s

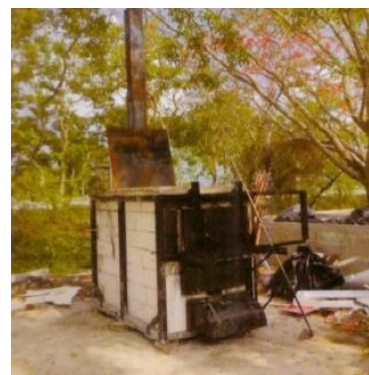
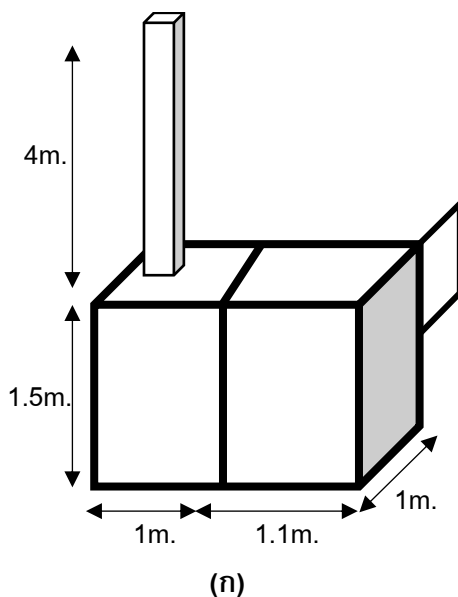
4) เครื่องวิเคราะห์ก๊าซจากการเผาไหม้ (Flue gas analyzer) ยี่ห้อ Testo 330 ใช้วัดองค์ประกอบของก๊าซไอเสียเช่น CO, O₂, CO₂ วัดเป็น ppm ความละเอียด 0.1 ppm

5) เครื่องวัดความทึบแสง (Opacity) ยี่ห้อ Master engineering smoke module 9010 ความละเอียด 0.1% สำหรับการตรวจวัดความทึบแสงสำหรับวัดควันดำ และ ฝุ่นละออง โดยการส่งผ่านของลำแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นแสงเฉพาะผ่านควันหรือฝุ่นละอองเข้าสู่อุปกรณ์รับแสง แล้ววัดค่าความเข้มแสงที่ลดลง เป็นหน่วยร้อยละ (%) โดยบริเวณปล่องควันเตาเผาขยะ

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ส่วนประกอบห้องเผาไหม้ที่ได้จากการออกแบบ

1) ห้องเผาไหม้ที่หนึ่งซึ่งเป็นห้องเผาไหม้หลัก ผนังเผาสร้างจากอิฐทนไฟอิฐทนไฟยี่ห้อ SK-36 รุ่น ST-76 อิฐทนไฟ อลูมินาสูง (อลูมินา 60% ความทนไฟ เบอร์ 36) ทนต่ออุณหภูมิที่ 1650 °C จากการกำหนดค่าความร้อนเชื้อเพลิงขยะ (HV) มีค่า 18.536 MJ/kg [15] ของขยะ ขนาดภายใน กว้าง 1.0 m ยาว 1.1 m สูง 1.5 m ได้ปริมาตรห้องเผาไหม้ที่หนึ่ง(V₁) มีค่า 1.65 m³ และมีขนาดตะแกรงรับขยะ (LG) มีค่า 7 kg/m² และเมื่อป้อนค่าครั้งละไม่เกิน 10 kg จะทำให้ได้ขนาดพื้นที่ตะแกรงอยู่ที่ 1.2 m² แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เตาเผาขยะที่ได้จากการออกแบบ (ก) ขนาดเตาขยะ (ข) เตาเผาขยะสำเร็จ

2) พื้นที่ช่องผ่านก๊าซร้อน (A_p) มีขนาดความกว้าง 1.0 m สูง 0.2 m

3) ขนาดห้องเผาไหม้ที่สอง (V_2) มีขนาดภายในกว้าง 1.0 m ยาว 0.3 m สูง 1.0 m ผังกันระหว่างห้องเผาไหม้หนึ่งและห้องที่สองใช้เหล็กกล้าหนา 10 mm. เนื่องจากกลไกถ่ายเทความร้อนจากห้องเผาไหม้ที่หนึ่งไปยังห้องเผาไหม้ที่สองอาศัยการนำความร้อนเป็นหลัก ดังนั้นความหนาของแผ่นเหล็กกล้าจึงมีผลต่อการนำความร้อนและการบิดเสียรูปของแผ่นเหล็กจากโดยความร้อน ขนาดกว้าง 1.0 m และ สูง 0.7 m ซึ่งขนาดเท่ากับความกว้างของห้องเผาไหม้แต่ส่วนความสูงต้องเว้นช่องพื้นที่ช่องผ่านก๊าซร้อน (A_p)

4) ขนาดพื้นที่ปล่องไอเสีย (A_g) อยู่ที่ 0.032 m^2 สร้างจากเหล็กกล่องขนาด $200 \times 200 \text{ mm}$ เพื่อความสะดวกในการจัดทำหนา 3 mm ความสูงของปล่อง (h) มีค่า 4 m โดยวัดจากด้านบนเตาเผาขยะ

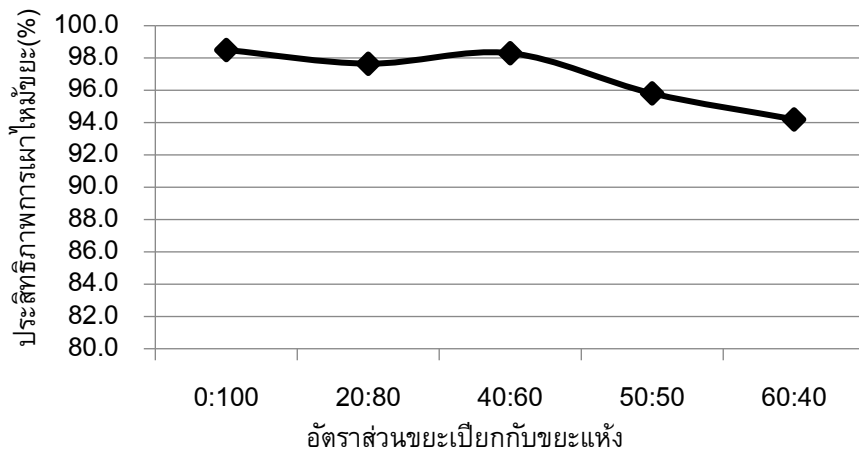
ผนังเตาเผาใช้ฉนวนกันสูญเสียความร้อนหนา 115 mm จากการคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (ขยะ) ทางทฤษฎี (AFR_T) และคิดอากาศส่วนเกินร้อยละ 30 [15] จะต้องใช้อากาศ 3.78 kg ต่อขยะ 1 kg คำนวณจากสมการที่ (17) ป้อนขยะในอัตรา 50 kg/h จากผลการคำนวณ AFR_T มีขนาดช่องอากาศเข้าเตาต้องมีขนาดไม่น้อยกว่า 656 cm^2 ในการออกแบบเลือกใช้ขนาด $50 \times 25 \text{ cm}$ เพื่อใช้ควบคุมปริมาณอากาศได้สะดวกขึ้นด้วยการปรับแผ่นสไลด์ช่องปรับอากาศหน้าเตาเผาขยะ

3.2 ผลการทดสอบการทำงานของเตาเผาขยะ

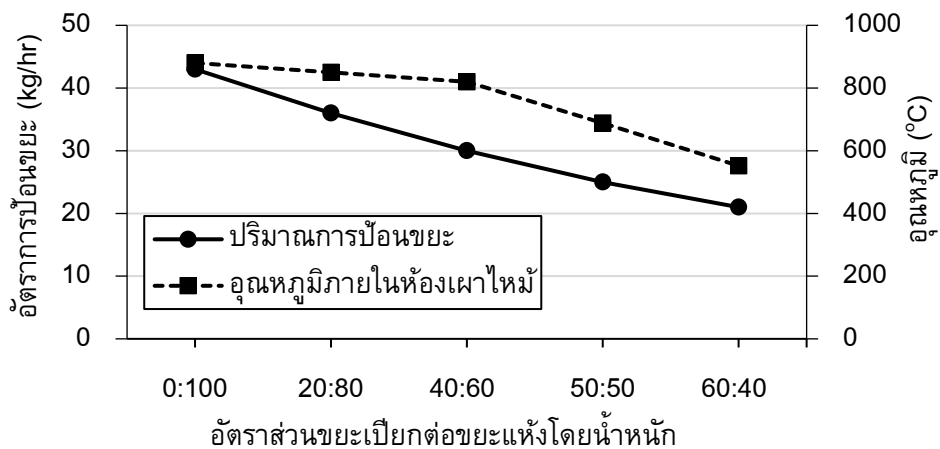
การประเมินประสิทธิภาพการเผาไหม้ด้วยสมการที่ (18) แสดงดังรูปที่ 5 ด้วยการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ตามอัตราส่วนขยะที่ป้อนตั้งแต่ 0:100 – 40:60 ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดมีค่าร้อยละ 98.5 ที่อัตราส่วนขยะ 0:100 เนื่องจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทำให้มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมามากกว่าก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่มีปริมาณน้อยเพราะว่าอุณหภูมิในเตาสูงเกิดแรงดูดอากาศเข้าไปมากกว่าปริมาณความต้องการ จึงทำให้ออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศปริมาณมากที่ยังเผาไหม้ไม่หมด แต่เมื่อป้อนปริมาณส่วนผสมของขยะเปียกเพิ่มขึ้นไปเป็น 60:40 จะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงอย่างมากเนื่องจากขยะเปียกที่ป้อนเข้าไปมีความชื้นสูงแห้งไม่ทันอุณหภูมิในเตาเผาผลดลง ส่งผลให้อัตราการป้อนขยะลดลงตามไปด้วย

ในการทดสอบด้านความสามารถในการกำจัดขยะจะสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราส่วนระหว่างขยะเปียกกับขยะแห้งและอุณหภูมิภายในเตาเผาแสดงดังรูปที่ 6 พบว่าเมื่อป้อนขยะที่มีแต่ขยะแห้งจะสามารถเผาไหม้ได้สูงสุด 45 kg/h มีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 885°C และเมื่อเพิ่มปริมาณขยะเปียกมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 60:40 ความสามารถในการกำจัดขยะลดลงเหลือ 22 kg/h เนื่องจากขยะเปียกโดยส่วนใหญ่จะเป็นเศษอาหารที่มีความชื้นสูงเช่น เปลือกผลไม้ ผัก เมื่อเข้าเตาเผาไปในปริมาณ

มากจะทำให้อุณหภูมิภายในเตาตกลงอย่างรวดเร็วมีอุณหภูมิประมาณ 553°C ซึ่งไม่สามารถเพิ่มปริมาณขยะเปียกได้อีกเพราะจะทำให้เตาเผาขยะดับ



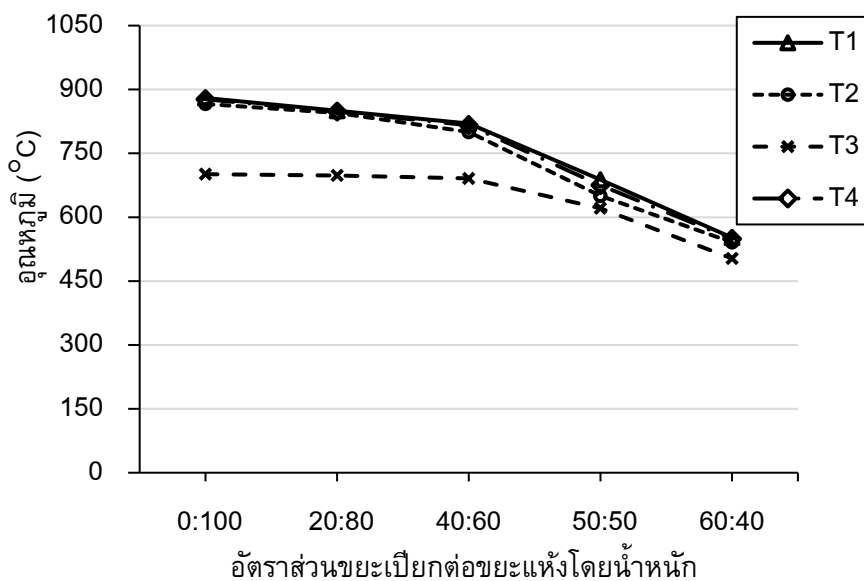
รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของขยะ



รูปที่ 6 ความสามารถในการเผากำจัดขยะและปริมาณความร้อนของเตาเผาขยะ

อุณหภูมิในส่วนต่าง ๆ ของเตาเผาขยะแสดงดังรูปที่ 7 อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ 1 (T_1) สูงสุดที่ 885°C และลดลงเล็กน้อยอยู่ที่ 862°C ในห้องเผาไหม้ที่ 2 (T_2) และลดลงเรื่อย ๆ ตามปริมาณขยะเปียกที่เพิ่มขึ้นจนลดลงต่ำสุดที่ 552°C ที่อัตราส่วนขยะเปียกต่อขยะแห้ง 60:40 ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่จะสามารถรักษาให้มีการเผาไหม้ต่อเนื่องได้ อุณหภูมิไอเสีย (T_3) อยู่ระหว่าง $503 - 700^{\circ}\text{C}$

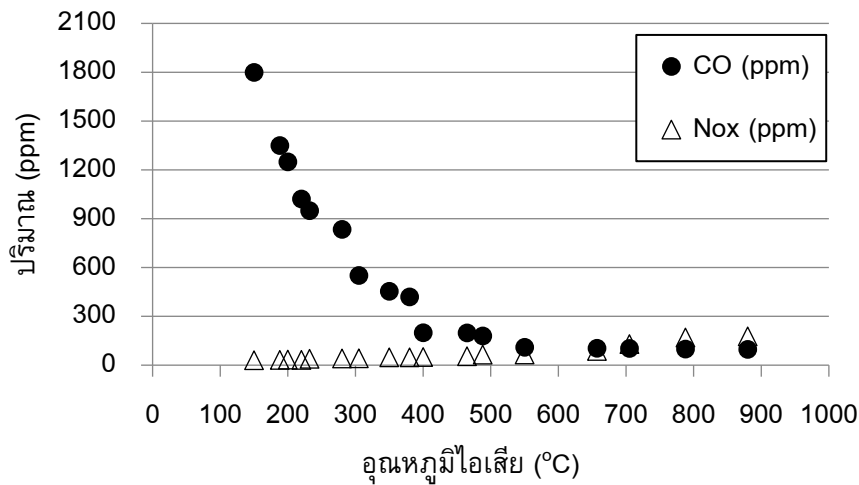
และส่วนสุดท้ายอุณหภูมิผนังเหล็กกล้า (T_4) อยู่ระหว่าง $580 - 860^\circ\text{C}$ มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับห้องเผาไหม้ที่หนึ่งเนื่องจากแผ่นเหล็กกล้ามีค่าการนำความร้อนสูงสามารถนำความร้อนจากห้องเผาไหม้ที่หนึ่งไปยังห้องที่สองได้ดีกว่าเตาเผาที่ใช้อิฐเป็นผนังกันระหว่างห้อง ส่งผลให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่สองสูงขึ้นมากกว่าเตาที่ใช้อิฐกันซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิไอเสียของเตาขยะโดยทั่วไป อย่างเช่นของ Sukchana [3] มีการพัฒนาเตาเผาขยะมูลฝอยชุมชนขนาดเล็กมีอุณหภูมิไอเสียอยู่ที่ประมาณ 680°C และห้องเผาไหม้ที่สองจะมีอุณหภูมิไอเสียให้ลดลงเนื่องจากความร้อนส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้เผาไหม้ซ้ำ ในส่วนของอุณหภูมิผิวผนังเตาด้านนอก (T_5) อยู่ระหว่าง $48 - 57^\circ\text{C}$ ใกล้เคียงกับที่ออกแบบกำหนดไว้ที่ 50°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน



รูปที่ 7 อุณหภูมิเฉลี่ยส่วนต่าง ๆ ของเตาเผาขยะ

การเทียบปริมาณ CO และ NO_x เทียบกับอุณหภูมิก๊าซไอเสียที่แสดงดังรูปที่ 8 วัดได้จากปล่องควันจากตัวอย่างการเผาขยะที่อัตราส่วน 20:80 พบว่าปริมาณ CO แนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออุณหภูมิไอเสียสูงขึ้นโดยเฉพาะที่อุณหภูมิตั้งแต่ 550°C ปริมาณ CO จะลดลงเหลือประมาณ 188 ppm และลดลงเรื่อยจนต่ำสุดที่ 98 ppm

และในส่วนของปริมาณ NO_x ก็มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิไอเสียซึ่งเมื่ออุณหภูมิไอเสียสูงขึ้นปริมาณของ NO_x ก็สูงตามไปด้วยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 177 ppm โดยที่ปริมาณก๊าซทั้งสองตัวยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน [16] ที่กำหนดเกณฑ์ในการควบคุมมลพิษ ไว้ไม่เกิน 110 ppm และ 250 ppm ตามลำดับ



รูปที่ 8 ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และปริมาณก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) เทียบกับอุณหภูมิไอเสีย

ตารางที่ 2 ปริมาณก๊าซมลพิษจากเตาเผาขยะเทียบกับอัตราส่วนขยะเปียกต่อขยะแห้ง

List	0:100	20:80	40:60	50:50	60:40
1. CO (ppm)	44	98	540	652	1002
2. CO ₂ (ppm)	12,220	13,321	14,455	14,832	15,111
3. SO ₂ (ppm)	0	0	14	11	3
4. NO _x (ppm)	185	177	154	137	135
5. Opacity (%)	17	17	19	20	39

การควบคุมมลพิษในตารางที่ 2 แสดงปริมาณมลพิษจากการทดลองเผาขยะในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 44 – 1002 ppm โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและสอดคล้องกับค่า Opacity ที่สูงร้อยละ 39 ทำให้ค่ามลพิษสูงกว่าเกณฑ์ที่ได้กำหนดในมาตรฐานที่ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมกำหนดไว้ [16] เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณขยะเปียกในสัดส่วนที่มากขึ้นทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จากขยะเปียกที่มีความชื้นสูงแห้งไม่ทัน ส่งผลให้อุณหภูมิในเตาลดลงและการไหลของอากาศเข้าเตาได้น้อยลงซึ่งการเผาไหม้ขยะมูลฝอยที่มีประสิทธิภาพจะต้องควบคุมอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สุดท้ายไม่น้อยกว่า 850 °C และมีระยะเวลาในการเผาไหม้ก๊าซไอเสียไม่น้อยกว่า 2 วินาที และควบคุมความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ควรมีค่าสูงสุดไม่เกิน 100 ppm [17] แต่เมื่อ

เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Nattrairoph et al [18] ที่มีการศึกษาประเมินสมรรถนะเตาเผาขยะและการจัดการขยะชุมชนพบว่าปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) อยู่ระหว่าง 64 – 1089 ppm จะเห็นได้ชัดว่าเตาเผาขยะแบบสองห้องมีความสามารถดมลพิษได้มากกว่า เนื่องจากความร้อนที่ส่งผ่านผนังเหล็กกล้าที่มีค่าการนำความร้อนสูงทำให้ความร้อนสามารถเคลื่อนที่จากห้องที่หนึ่งไปยังห้องที่สองได้เป็นอย่างดีและยังช่วยชะลอความเร็วของก๊าซไอเสียให้ช้าลงช่วยให้เกิดการเผาไหม้ซ้ำสามารถลดปริมาณ CO ได้ ซึ่งก็สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chongrungreong [5] ที่ศึกษาเรื่องเตาเผาขยะแบบสองห้องด้วยเช่นกัน ในส่วนก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 135 – 185 ppm อยู่ในเกณฑ์การควบคุมของรัฐต้องไม่เกิน 250 ppm [10] NO_x จะมีปริมาณสูงขึ้นที่สัดส่วนขยะเปียกน้อยทำให้การเผาไหม้ได้ดีส่งผลให้อุณหภูมิในเตาสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างไนโตรเจนกับออกซิเจน แต่ถ้าเพิ่มสัดส่วนขยะเป็น 40:60 จะทำให้ปริมาณการเกิด NO_x ไม่ให้เกินมาตรฐานก็เพราะว่าอุณหภูมิในเตาไม่สูงเกินไป ซึ่งในระหว่างการเผาขยะต้องมีการตรวจสอบและควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงระหว่าง 850 – 1100 °C ตลอดเวลาเพื่อให้กระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์และเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด แต่ถ้าอุณหภูมิในห้องเผาสูงเกิน 1100 °C จะมีโอกาสก่อให้เกิดมลพิษประเภทสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เพิ่มมากขึ้นและทำให้วัสดุ องค์ประกอบของเตาเผาได้รับความเสียหายได้ [17] และมีค่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) สูงสุด 14 ppm ซึ่งเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะที่มีกำมะถัน แต่เมื่อตรวจสอบค่ามลพิษกับงานวิจัยที่ใช้หอฟันน้ำเป็นอุปกรณ์กำจัดมลพิษของ Sittitirkawin et al [1] พบว่ามลพิษทางอากาศมีค่า CO, CO_2 , NO_x อยู่ที่ 736 – 803 ppm, 12,000 – 18,000 ppm, 5 – 20 ppm ตามลำดับ ซึ่งให้ผลค่อนข้างสูงกว่า เนื่องจากหอฟันน้ำจะมีความสามารถดักจับเฉพาะ NO_x และอนุภาคฝุ่นได้ดีกว่าก๊าซ CO ที่ละลายในน้ำได้น้อยกว่ามาก

4. บทสรุป

จากการออกแบบและสร้างเตาเผาขยะที่มีการใช้ห้องเผาไหม้สองโดยใช้แผ่นเหล็กกล้าเป็นผนังกันระหว่างห้องเผาไหม้ทั้งสองสามารถควบคุมมลพิษให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ มีอัตราขยะเปียกและขยะแห้งโดยน้ำหนักได้ระหว่าง 0:100 – 50:50 โดยยังคงรักษาสภาพการเผาไหม้ด้วยตัวเองได้ดีอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานควบคุม และสามารถป้อนขยะได้สูงสุดในอัตรา 42 kg/h โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพเตาสูงที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 98.5 ในส่วนของค่ามลพิษทางอากาศสามารถควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานควบคุมได้โดยมีปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) จะมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 44 ppm ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในห้องเผาไหม้โดยมีค่า 135 ppm และค่าความทึบแสง (Opacity) ที่ร้อยละ 17 แต่ถ้ามีการเพิ่มขยะเปียกไปเป็นร้อยละ 60 ของขยะทั้งหมดจะทำให้ค่ามลพิษทางอากาศเริ่มเกินมาตรฐาน จากข้อมูลงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใช้แผ่นเหล็กกล้าเป็นผนังกันห้องเผาไหม้และพื้นที่ช่องผ่าน

ก๊าซร้อนจากห้องเผาไหม้ที่หนึ่งไปยังห้องเผาไหม้ที่สอง (A_p) ตามที่ได้ออกแบบจะสามารถควบคุมมลพิษได้ แต่ถ้ามีการปรับพื้นที่ช่องดังกล่าวให้มีขนาดลดลงจะส่งผลให้ปริมาณก๊าซร้อนไหลช้าลง ทำให้การเติมอากาศเข้าเตาเผาลดลงซึ่งการเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์ค่ามลพิษจะไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ และถ้ามีการปรับพื้นที่ช่องดังกล่าวให้มีขนาดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณก๊าซร้อนไหลออกจากเตาเผาเร็วเกินไปซึ่งจะทำให้การเผาไหม้ในส่วนของห้องเผาไหม้ที่สองลดลงก็จะส่งผลให้ค่ามลพิษไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานด้วยเช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวิทยาลัยเชียงรายที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

Reference

- [1] Sittitirakwin P, Saengnual S, Manowan S, Rattanapong K. Design and construction of a small-scale solid waste incinerator low emission with water spraying tower. The 7th National Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business administration, Engineering, Science and Technology; 2022 May 26-27; Chumphon, Thailand. p. 441-50. (In Thai)
- [2] Olisa YP, Amos AE, Kotingo K. The design and construction of a step grate incinerator. Global Journal of Researches in Engineering: A Mechanical and Mechanics Engineering 2016;16(3):51-5.
- [3] Sukchana T. The performance test of an incinerator with loopback exhaust. The 28rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand; 2014 Nov 15-17: Khon Kaen, Thailand. p. 365-75. (In Thai)
- [4] Damrongsak D, Khamwiang N, Kaewngen J, Panyatham J. Design and construction of the community garbage incinerator. The 23rd Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand; 2009 Nov 4-7, Chiang Mai, Thailand. p. 266-77. (In Thai)
- [5] Chongrungreong S. Study and design of a solid waste two combustion chambers incinerator. Engineering Journal of Research and Development 1999;10(1):90-101. (In Thai)
- [6] Achawangkul Y, Maruyama N, Chaichana C, Hirota M, Teeratitayangkul P. Study and evaluation for the double-chambered incinerator using biomass gas-derived from gasification. International Journal of Modern Engineering Research 2013;3(6):3818-24.

- [7] Obuka, NSP, Ozioko ER.. Design and evaluation of a double chamber incinerator for low emissions. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Applied Sciences* 2018;7(6):1-21.
- [8] Vesilind PA, Rimer AE. *Unit operation in resource recovery engineering*, New Jersey, USA: Prentice-Hall; 1981.
- [9] Pfeffer JT. *Solid waste management engineering*. New Jersey, USA: Prentice-Hall; 1982.
- [10] Pavoni JL, Heer JE, Hagerty DJ. *Handbook of solid waste disposal materials and energy recovery*. New York, USA: Van Nostrand Reinhold; 1972.
- [11] Bhide AD, Sundarean BB. *Solid waste management in developing countries*: New Delhi, India: Indian National Scientific Documentation Centre; 1983.
- [12] Sasiwimonphan S. *Steam technology*. Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand - Japan); 1992. (In Thai)
- [13] Mangvitkul W. *Processes and techniques reducing energy costs for industrial buildings and factories*. Bangkok, Thailand: Energy Conservation Center of Thailand Publishing; 2001. (In Thai)
- [14] Chantasiriwan S. *Power plant engineering*. Pathumthani, Thailand: Faculty of Engineering, Thammasat University; 2015. (In Thai)
- [15] Department of Alternative Energy Development and Energy Efficiency. *Studying the feasibility of producing energy from waste project to study and prepare investment information on renewable energy and energy conservation*. Bangkok, Thailand: Department of Alternative Energy Development and Energy Efficiency, Ministry of Energy; 2015. (In Thai)
- [16] Announcement of the ministry of natural resources and environment. Regarding the designation of solid waste incinerators as a source of pollution that the release of polluted air into the atmosphere must be controlled. *Royal Gazette Volume 127, Special Section 87 N*, 2010. (In Thai)
- [17] Pollution Control Department. *Guidelines for solid waste management with a solid waste incinerator system*. Bangkok, Thailand: Community Solid Waste and Hazardous Substance Management Division; 2022. (In Thai)
- [18] Nattraihop T, Jomphakdee W, Chaiyathap S. Performance evaluation of incinerator for community-based solid waste management. *The 22rd Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand*; 2008 Oct 15-17; Pathumthani, Thailand. p. 20-5. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ภักดี สิทธิฤทธิ์กวิน ตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล (สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล) คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย เลขที่ 199 ม.6 ต.ป่าอ้อดอนชัย อ.เมือง จ.เชียงราย 57000 โทรศัพท์ 086-3023878 Email: pakdee.me@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: ด้านพลังงานความร้อนจากเตาเผาขยะ

Article History:

Received: March 6, 2024

Revised: July 3, 2024

Accepted: July 5, 2024

THE IMAGE PROCESSING IN A VISION SYSTEM-BASED SIZE INSPECTION FOR DRIED FLATTENED BANANAS

Narisara Suwichien¹ and Seksan Suchaipron²

¹Lecturer, Department of Production Engineering Technology,

Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University,

156 Moo 5, Plai Chumphon Subdistrict, Mueang Phitsanulok, Phitsanulok 65000, Thailand,

narisara.su@psru.ac.th

²Lecturer, Department of Automated Manufacturing Engineering,

Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University,

422 Marupong Road, Na Mueang Subdistrict, Mueang District, Chachoengsao 24000,

Thailand, seksan.suc@rru.ac.th

ABSTRACT

The bananas are an economically significant fruit in Thailand, both for domestic consumption and export. Thailand has opportunities to further expand the value of exports. This includes the development of various banana products, especially dried bananas, which is a method of transforming regular bananas into higher-value products. In the distribution of dried flattened bananas, they are sorted into two groups: small and large sizes. Currently, the size sorting of dried flattened bananas is done manually. The human-based size sorting varies among individuals due to the lack of standardized criteria for distinguishing small and large sizes. Furthermore, this manual process can lead to fatigue, especially when working for extended periods of time. For this reason, the aim of this research is to develop an automated system for automatically sorting the sizes of dried flattened bananas using a vision system with LabVIEW software. The criteria for size sorting are as follows: large-sized bananas must have a length greater than 77 mm, and the surface area captured by the low-cost web camera must be no less than 2780 mm². Based on the experimental results, the sorting was divided into three categories: detecting only small-sized dried bananas, detecting only large-sized ones, each with a quantity of 50 pieces, and detecting a mixture of small and large sizes, with a total quantity of 50 pieces (25 of each size). The accuracy of the program for

detecting small-sized dried bananas, large-sized ones, and the mixed sizes was found to be 96.00%, 94.00%, and 94.00%, respectively.

KEYWORDS: Dried flattened bananas, Drying bananas, Images processing, Inspection, Vision system

1. Introduction

Bananas are one of the most important agricultures in world trade [1]. In addition, bananas are one of the industries' products that significantly contribute to the economy of Thailand and are popularly used in various food processing and culinary applications. The preservation of bananas for future consumption is also in demand, particularly dried bananas. In the process of drying bananas, ripe bananas are peeled and sun-dried until they achieve the desired color and texture that meets the quality standards set by businesses. Subsequently, these dried bananas are compressed to become flat for distribution. The bananas are sorted and divided into two sizes after compression: large and small, through human observation. Evaluating objects through human visual observation is a process that is greatly influenced by personal judgment, monotonous, requires a significant amount of time, and demands considerable effort [2-4].

In order to enhance both the productivity and quality of food production, it's imperative to create proficient and innovative methods for detecting food processing [5]. An intriguing alternative involves the application of computerized image analysis techniques, often referred to as computer vision systems. These techniques effectively address the shortcomings of visual and instrumental methods, offering an objective way to measure color and other physical factors. [2, 6, 7]. Fundamentally, the vision system is made up of standard sources of illumination, a digital or video camera employed to capture images, and computer software specifically designed for the analysis of these images. [8-11]. However, the fact that there is a difference in the intensity of pixel brightness, leading to a change in the count of pixels with different characteristics, will reduce the precision of the measurement. [12]

Applications of computer vision systems encompass tasks like categorization, size determination, defect detection, and quality assessment across various sectors, including the food and fruit industry. In the pursuit of quality monitoring, this effort significantly aids

researchers and industry professionals, thereby contributing substantially to the enhancement of inspection efficiency such as apple, carrot, fish, banana, soybean etc. [1, 13-19]

The aim of this research is to classify the sizes of dried bananas into small and large sizes, with the intention of reducing the reliance on manual labor and establish standardized sorting procedures using low cost web-camera. The criteria for this sorting process include evaluating both the [1] length and [2] surface area of the dried bananas, which is achieved using a vision system integrated through the LabVIEW software.

2. Material and method

The separation of dried bananas into large and small sizes employs two criteria: length and area. The length is measured from both borders of the dried banana, and the area is calculated by counting the number of pixels in the image captured by the camera. Subsequently, image analysis is conducted using a vision system. Prior to the image analysis, there are preparatory steps aimed at reducing noise and unnecessary elements from the image, in order to facilitate a rapid and highly accurate analysis. The preliminary steps before image analysis include: 1) Image acquisition, 2) Pre-processing, 3) Processing, and 4) Post-processing. Following these steps, the image is then subjected to analysis to present the results."

The prototype for inspecting dried flattened bananas was designed based on the use of a food-grade conveyor belt for food products, with web camera detection.

2.1 Image acquisition

In this research, a web camera was utilized as the detection camera due to its affordability and suitability for use in small-scale factories. The camera has a resolution of 1280 x 720 pixels and connects to a computer via a USB port. The vision system's critical control factor is the interaction between ambient light and objects. Light is the most crucial element in obtaining high-quality images, as variations in light intensity significantly impact the results of the image analysis program by altering pixel values. Consequently, a covering has been implemented to shield the object and the camera from uncontrollable external light sources, such as light bulbs or sunlight, which might affect the object. Instead, a controllable light source, namely a bar light, is employed, as depicted in Figure 1 The image acquisition

from the web camera while the conveyor belt is in motion results in a colored image, as shown in Figure 2. However, the obtained image is blurry because of capturing photos during movement, and the affordability of the web camera results in a slower shutter speed. The maximum speed of the conveyor belt was 35 cm per second, which prevented the error from blurring. As a result, while feeding dried bananas onto the conveyor belt, it's essential to position them in a direction that is perpendicular with the motion path. This is done to counteract the blurriness in the image that matches the motion direction, thus enabling accurate length measurements.

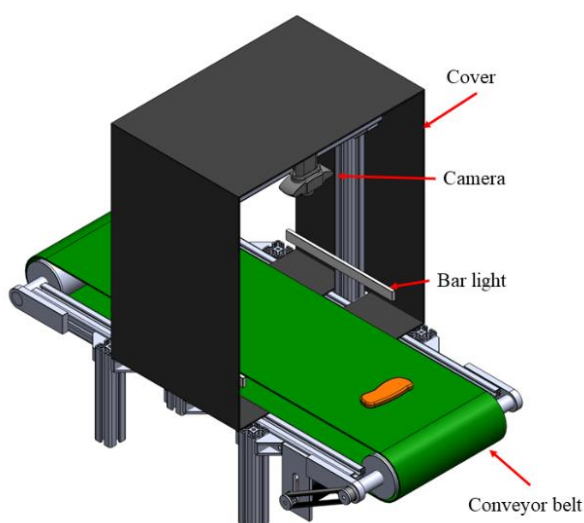


Figure 1 The size-sorting inspection mechanism for dried bananas and the positioning direction of the dried bananas in correspondence with the motion

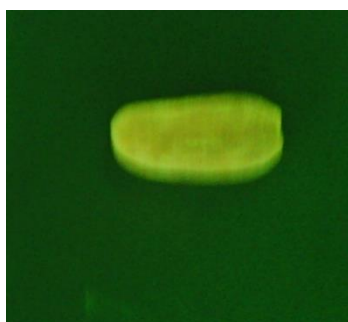


Figure 2 The image obtained from the web camera while the conveyor belt is in motion

2.2 Pre-processing

After acquiring the images, the next procedure involves preprocessing the images before performing any analysis. This stage involves eliminating unnecessary image data, which helps in accelerating the image analysis process by reducing the computational workload. The computation time is influenced by the pixel quantity, and having extra uninformative pixels can lower result accuracy. Therefore, in various scenarios, specific region of interest (ROIs) are isolated. This involves extracting ROIs from individual images using masks that cover either the whole image or a chosen section.

The data values of the images obtained from the camera by the program are represented as pixel values. Therefore, it becomes essential to transform them into real values to facilitate the measurement of length and area for the dried banana. In the process of image conversion, a grid is utilized to enable the program to compute the distance between two points along both the horizontal and vertical axes, using pixels as the unit of measurement. Subsequently, these values are converted into millimeters.

Prior to analyzing the image, it's essential to remove any interference signals (noise) or unnecessary image data. This is achieved by converting the image into a grayscale format, as the image obtained from the camera is in RGB. The fundamental idea is accomplished through the creation of a weighted total involving the R, G, and B components.

$$Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B \quad (1)$$

where Y is pixel value of the gray scale image, R, G, B are three primary colors red, green and blue, respectively

After converting the image into grayscale, in order to eliminate these noisy regions and small pixel areas (i.e. undesired pixels), morphological opening (erosion followed by dilation) and closing (dilation followed by erosion) operations were employed. The determination of the projected area for each identified object was achieved through a process of counting the pixels situated within the boundary of the object within a binary image. This process defines the threshold value, enabling the partitioning of the source image. Pixels with values equal to or exceeding the threshold are recognized as pertinent to the object (illustrated as white pixels), while pixels with values lower than the threshold are recognized as pertaining to the

background (depicted as black pixels), The purpose is to separate whole target regions from the surrounding background. As shown in Figure 3.



Figure 3 Binary image

2.3 Processing

This step involves processing to identify the border of the dried banana for the purpose of measuring its length. The boundaries of the dried banana are detected by initiating from the two sides of the image frames and advancing towards the central region. Two vectors of two sides of the image are moved to the center of the image. Borders are distinguished through the analysis of changes in pixel intensity gradients. The computation entails measuring the absolute difference between a pixel's intensity and its preceding counterpart. When the absolute value of the current pixel significantly diverges from the previous stage, it is recognized as an edge pixel. As shown in Figure 4. Typically, borders can be extracted from grayscale or binary images. However, since we look for the border after converting it into a binary image, it becomes easier to find the border due to the clear changes in pixel values during the search along the edge. Specifically, the background, which has pixel value 0, is distinct from the dried banana object, which has a value of 1. As shown in Figure 5, showing the border value is 1.

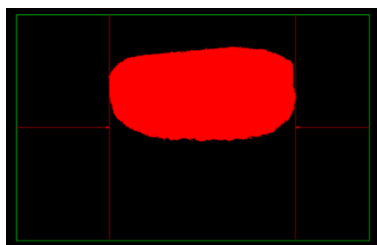


Figure 4 Searching the area of the border (green frame) and the boundary found (red vector)

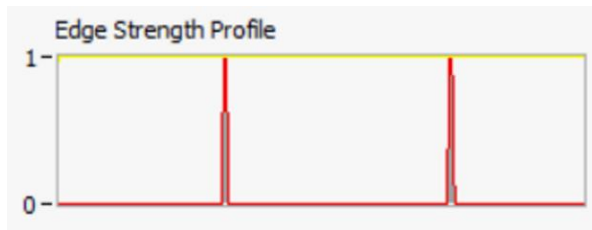


Figure 5 Histogram of boundary

2.4 Post-processing

In post-processing, which is the final step before image analysis, this stage requires preparing the image to be as clear and complete as possible prior to interpreting the image results to prevent erroneous outcomes during analysis. This involves managing image data by segregating the image background from the object. This is necessary due to the varied light sources that may affect the dried banana, potentially distorting pixel values and affecting the conversion to a binary image, which could result in gaps within the dried banana. Therefore, the utilization of the 'Fill Holes' morphological operation is necessary. This operation ensures that objects are completely enclosed, leaving no gaps or interruptions within their boundaries and having no impact on the border as shown in Figure 6.

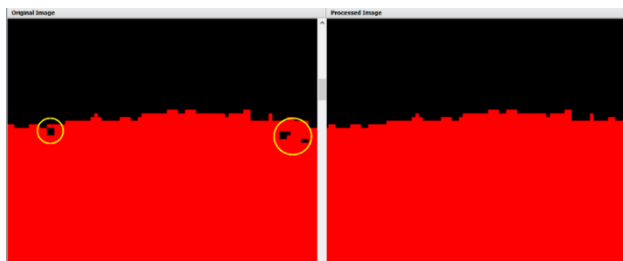


Figure 6 The image from the fill hole function

2.5 Analysis

This constitutes the procedure for interpreting the outcomes extracted from images acquired through the camera. These images have undergone enhancements to yield outcomes of the highest accuracy and precision. In the subsequent image processing step, there is a conversion of units from pixels to real measurements in millimeters by the rule of three 5.713 pixel are 1 mm. This conversion enables the presentation of the actual length

measurement of the dried banana. Furthermore, by identifying the initial and concluding boundaries, both distances, which represent the length measurement of the dried banana, are determined. In the area-determination phase, the process involves the computation of an area obtained through the transformation of an RGB image into a binary image. This is executed by tallying the overall pixel count within the binary image and subsequently converting the result into real-world units, specifically in terms of millimeters squared.

2.6 Criteria for selecting the size of dried banana

In this research, a classification has been established for dried bananas, encompassing two distinct categories: those of modest dimensions classified as "small," and those of more substantial dimensions categorized as "large." The criteria dictating this classification are rooted in both the length and the surface area of the dried bananas. This classification criterion draws from the dimensions of the smallest dried banana among those categorized as larger specimens, essentially serving as the standard for identifying the attributes of 'large' dried bananas. For a dried banana to meet the criteria of being categorized as 'large' in size, it must have a minimum length of 77 mm. This measurement is conducted using a ruler to ensure consistency and accuracy, as shown in Figure 7. For the area of the dried banana, Estimating or determining the area of bananas presents difficulties due to its non-geometric and non-uniform characteristics. Additionally, the lack of uniformity among each piece. Nonetheless, a criterion for selecting the banana size can be established by using the largest banana within the small-size banana group as a reference. This can be achieved by measuring the area using a vision system. Subsequently, the area of this reference banana becomes the benchmark for determining the sizes of all bananas. In other words, if the area of other bananas, which are measured using the vision system, is smaller than the benchmark, they are considered small bananas. Similarly, if the measured area is larger than the benchmark, the respective banana is classified as large. The vision system indicates that the minimum area for a dried banana to be classified as 'large' should not be less than 2780 mm², as delineated by the equations formulated.

$$\text{Size} = \begin{cases} \text{Large, if Length} \geq 77\text{mm and Area} \geq 2780\text{mm}^2 \\ \text{Small, otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

The determination of a dried banana being classified as 'large' in size, it's essential for both its length and area measurements to exceed a predefined threshold.



Figure 7 Measure the dried banana length with a ruler.

3. Result and discussion

3.1 Length and area detection

The examination of dimensions calculated from the program, divided into examinations of length measurement and the measurable area size, with criteria for large-sized dried bananas. The measured length must be greater than 77 mm, and the binary image area must exceed 2780 mm². This involves measuring the size of 15 pieces of dried banana, with each piece being measured three times, then calculating the average length for comparison with the actual measured length obtained using a ruler, in order to determine the error value. However, for the area, direct calculation of the true area isn't feasible due to the banana's non-geometric shape, which complicates precise computation. Therefore, the calculation must be solely carried out through the vision system.

We've divided the size examination into two phases. In the first phases, when examining small-sized dried bananas, the maximum and minimum differences between the average length and the actual measured length are 4.98% and 1.68%, respectively, as shown in Figure 8a. In the second examination phases, when inspecting larger-sized dried bananas, the maximum and minimum differences between the average length and the actual measured length are 2.94% and 0.30%, respectively, as shown in Figure 8b. The margin of error in measuring the length of dried bananas, both small and large, using a vision system compared to actual measurements does not exceed 5%, allowing for reliable length measurements. Concerning the area calculations for dried bananas through the vision system, there are noticeable differences even for repeated measurements of the same piece, as shown in

table 1 for small sizes and table 2 for large sizes, primarily due to external lighting conditions and the camera's relatively slow shutter speed [20]. However, since a minimum area threshold has been defined, this variation doesn't significantly affect the interpretation of the dried banana's area size.

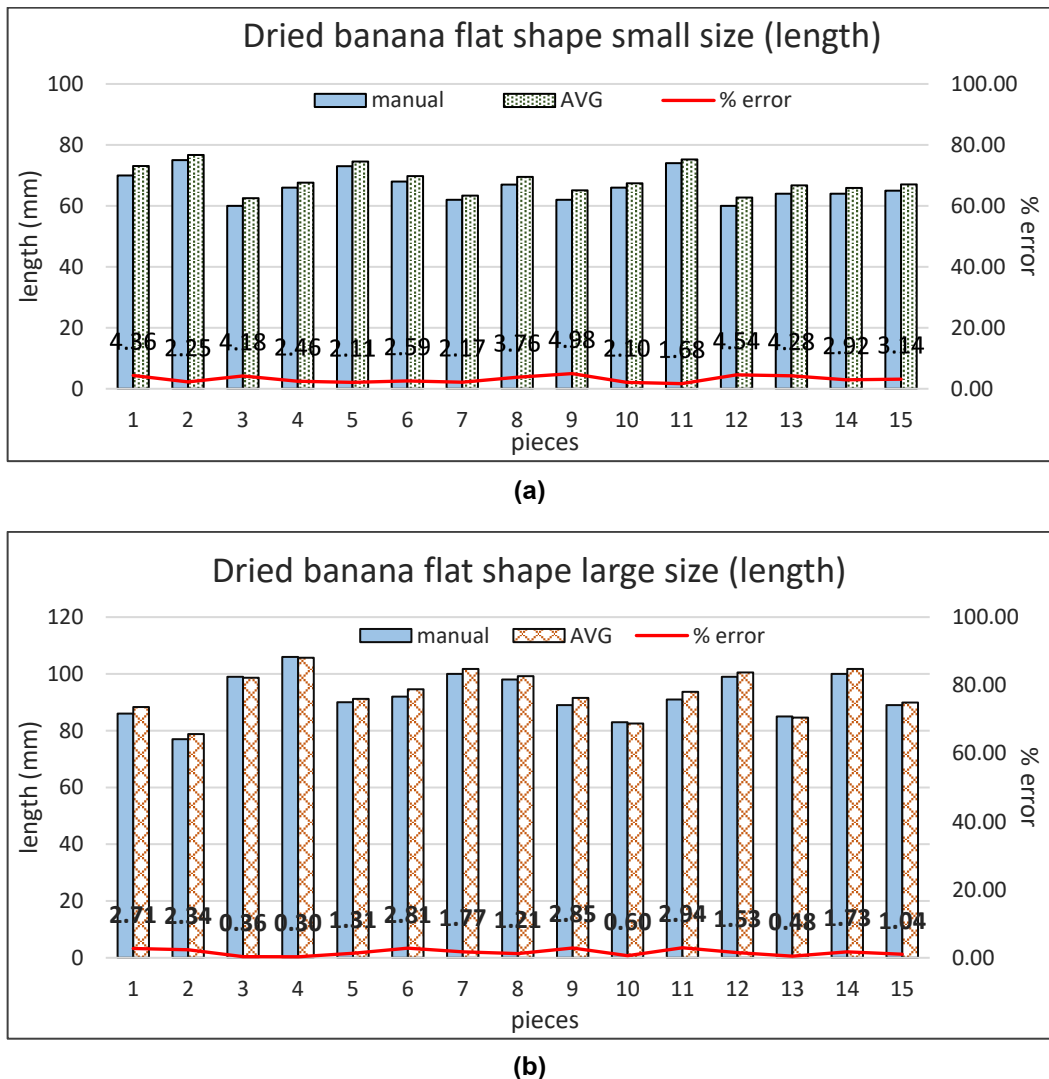


Figure 8 The results from examining the length values of 15 pieces of dried banana, each measured three times (a) For the smaller-sized dried bananas, (b) For the larger-sized dried bananas.

Table1 The area measurements for small sizes

Pieces	Area (mm ²)				
	1	2	3	average	SD
1	2745.49	2566.46	2548.98	2620.31	108.76
2	2519.65	2650.82	2771.11	2647.19	125.77
3	2313.31	2075.46	2182.07	2190.28	119.14
4	2234.65	2278.73	1965.13	2159.50	169.77
5	2480.74	2531.59	2176.42	2396.25	192.07
6	2222.66	2425.82	2232.07	2293.52	114.67
7	1848.14	1919.6	2006.22	1924.65	79.16
8	2230.27	2311.02	2216.02	2252.44	51.23
9	2185.97	2193.42	2269.09	2216.16	45.99
10	2297.53	2188.77	2278.73	2255.01	58.13
11	2576.68	2499.2	2584.93	2553.60	47.29
12	2152.83	2121	2081.28	2118.37	35.85
13	2370.75	2230.76	2241.26	2280.92	77.97
14	2239.64	2312.5	2232.27	2261.47	44.35
15	2346.21	2410.21	2254.99	2337.14	78.01

Table2 The area measurements for large sizes

Pieces	Area (mm ²)				
	1	2	3	average	SD
1	3213.89	3289.6	3214.74	3239.41	43.47
2	2906.07	2942.42	3008.07	2952.19	51.70
3	3978.31	4013.81	4018.96	4003.69	22.13
4	3952.35	3847.45	3888.03	3895.94	52.90
5	3204.66	3028.16	2961.51	3064.78	125.64
6	2864.59	2846.15	2820.72	2843.82	22.03
7	3205.24	3136.03	3108.29	3149.85	49.93

Table2 The area measurements for large sizes (continued)

Pieces	Area (mm ²)				
	1	2	3	average	SD
8	4025.83	3956.88	4065.17	4015.96	54.82
9	2849.16	2808.03	2817.32	2824.84	21.57
10	2893.98	2802.09	2808.21	2834.76	51.38
11	2813.07	2822.17	2853.87	2829.70	21.42
12	2964.98	3116.67	3102.24	3061.30	83.72
13	2824.71	2809.27	2811.58	2815.19	8.33
14	3693.42	3953.53	3847.07	3831.34	130.77
15	2787.92	2857.14	2806.2	2817.09	35.87

3.2 Performance in object detection

The performance testing for the separation of flat dried banana sizes was conducted in three phases. In the initial phase, we focused exclusively on identifying small-sized flat dried bananas, totaling 50 specimens. Subsequently, in the second phase, our attention shifted toward identifying only large-sized flat dried bananas, also amounting to 50 specimens. In the final phase, our task was to detect both small and large-sized flat dried bananas simultaneously, totaling 50 specimens, with 25 from each size category. As demonstrated in Tables 3, 4, and 5, the results of our size-based separation tests across all three phases—small-sized only, large-sized only, and a mixed -size scenario—revealed an accuracy rate of 96.00%, 94.00%, and 94.00%, respectively. In the mixed-size scenario (small and large sizes), errors occurred due to misidentifying 2 large size and 1 small size. These errors from area calculations, which were caused by external light sources, image blurring, and noise from the conveyor belt's cleanliness. For the measured length, no error was observed. However, the position of the flat dried bananas being perpendicular to the motion path, as mentioned earlier, might be a potential cause. The discrepancies encountered during the separation process were primarily attributed to inaccuracies in calculating image areas, stemming from external light disturbances and the camera's shutter speed dynamics, both of which had noticeable impacts on image quality [20].

Table 3 The accuracy percentage for small-sized flat dried bananas

pieces	correct	incorrect	% accuracy
50	48	2	96.00

Table 4 The accuracy percentage for large-sized flat dried bananas

pieces	correct	incorrect	%error
50	47	3	94.00

Table 5 The accuracy percentage for mixed small and large-sized flat dried bananas

pieces	correct	incorrect	%error
50	47	3	94.00

4. Conclusion

A machine vision system is employed to categorize the sizes of flat dried bananas into two groups: large and small. This categorization is based on two key parameters, namely, the length and the surface area of the dried bananas. Through tests assessing its size-sorting capabilities, it has been demonstrated that the system can achieve an accuracy rate of over 90% in both large and small size categorization. This information indicates that the vision system can effectively substitute for human labor, as human workers may experience fatigue and make errors when working for extended periods. The inaccuracies in size sorting primarily arise from the computation of the banana's surface area, which is influenced by external lighting conditions and the camera's image quality. These two factors are the primary determinants impacting the precision of image-based detection.

Acknowledgements

The researchers would like to express our gratitude to the Department of Production Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology at Pibulsongkram Rajabhat University, as well as the Department of Automated Manufacturing Engineering, Faculty of Industrial Technology at Rajabhat Rajanagarindra University, for their support in providing

the necessary resources for this research. Additionally, thank you to the group of entrepreneurs involved in banana production in Phitsanulok province.

Reference

- [1] Mendoza F, Aguilera JM. Application of image analysis for classification of ripening bananas. Journal of food science [Internet]. 2004 [cited 2023 Sep 15];69(9):E471-7. Available from: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb09932.x>
- [2] Shahin MA, Symons SJ. A machine vision system for grading lentils. Canadian Biosystems Engineering [Internet]. 2001 [cited 2023 Sep 15]; 43:7.7-14. Available from: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=9beb464edf5b3574cec6b8b28a1454218791d9c5>
- [3] Brosnan T, Sun DW. Inspection and grading of agricultural and food products by computer vision systems—a review. Computers and electronics in agriculture [Internet]. 2002 [cited 2023 Sep 15]; 36(2-3):193-213. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00101-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00101-1)
- [4] Li Q, Wang, M, Gu W. Computer vision based system for apple surface defect detection. Computers and electronics in agriculture [Internet]. 2002 [cited 2023 Sep 15]; 36(2-3):215-23. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00093-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00093-5)
- [5]. Xu L, Zheng Y, Zhou C, Pan D, Geng F, Cao J, et al. Kinetic response of conformational variation of duck liver globular protein to ultrasonic stimulation and its impact on the binding behavior of n-alkenals. LWT [Internet]. 2021 [cited 2023 Sep 16];150:111890. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111890>
- [6] Paulus I, Schrevels E. Shape characterization of new apple cultivars by Fourier expansion of digitized images. Journal of Agricultural Engineering Research [Internet]. 1999 [cited 2023 Sep 16];72(2):113-18. Available from: <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0352>
- [7] Chen YR, Chao K, Kim MS. Machine vision technology for agricultural applications. Computers and electronics in Agriculture [Internet]. 2002 [cited 2023 Sep 16]; 36(2-3):173-91. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00100-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00100-X)
- [8] Basset O, Buquet B, Abouelkaram S, Delachartre P, Culioli J. Application of texture image analysis for the classification of bovine meat. Food Chemistry [Internet]. 2000 [cited 2023 Sep 16];69(4):437-44. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00057-1](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00057-1)

- [9] Papadakis SE, Abdul-Malek S, Kamdem RE, Yam KL. A versatile and inexpensive technique for measuring color of foods. Food technology (Chicago) [Internet]. 2000 [cited 2023 Sep 16];54(12):48-51. Available from: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=923911>
- [10] O'sullivan MG, Byrne DV, Martens H, Gidskehaug LH, Andersen HJ, Martens M. Evaluation of pork colour: prediction of visual sensory quality of meat from instrumental and computer vision methods of colour analysis. Meat science [Internet]. 2003 [cited 2023 Sep 16];65(2):909-18. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00298-X](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00298-X)
- [11] Brosnan T, Sun DW. Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. Journal of food engineering [Internet]. 2004 [cited 2023 Sep 16];61(1):3-16. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00183-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00183-3)
- [12] Eshkevari M, Rezaee MJ, Zarinbal M, Izadbakhsh H. Automatic dimensional defect detection for glass vials based on machine vision: A heuristic segmentation method. Journal of Manufacturing Processes [Internet]. 2021 [cited 2023 Sep 18];68:973-89. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.018>
- [13] Gongal A, Karkee M, Amatya S. Apple fruit size estimation using a 3D machine vision system. Information Processing in Agriculture [Internet]. 2018 [cited 2023 Sep 18];5(4):498-503. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.06.002>
- [14] Xie W, Wang F, Yang D. Research on carrot surface defect detection methods based on machine vision. IFAC-PapersOnLine [Internet]. 2019 [cited 2023 Sep 18]; 52(30):24-9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.484>
- [15] White DJ, Svellingen C, Strachan NJ. Automated measurement of species and length of fish by computer vision. Fisheries Research [Internet]. 2006 [cited 2023 Sep 18];80(2-3):203-10. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2006.04.009>
- [16] Strachan NJC. Length measurement of fish by computer vision. Computers and electronics in agriculture [Internet]. 1993 [cited 2023 Sep 18];8(2):93-104. Available from: [https://doi.org/10.1016/0168-1699\(93\)90009-P](https://doi.org/10.1016/0168-1699(93)90009-P)
- [17] Momin MA, Yamamoto K, Miyamoto M, Kondo N, Grift T. Machine vision based soybean quality evaluation. Computers and Electronics in Agriculture [Internet]. 2017 [cited 2023 Sep 18];140:452-60. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.06.023>

- [18] Bhargava A, Bansal A. Fruits and vegetables quality evaluation using computer vision: A review. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences [Internet]. 2021 [cited 2023 Sep 18];33(3):243-57. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.06.002>
- [19] Xiao Z, Wang J, Han L, Guo S, Cui Q. Application of machine vision system in food detection. Frontiers in Nutrition [Internet]. 2022 [cited 2023 Sep 18];9:888245. Available from: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.888245>
- [20] Ragavanantham S, Kumar SS, Shyam MS. Optimisation of Shutter Speed in Machine Vision Technique for Monitoring Grinding Wheel Loading. Applied Mechanics and Materials [Internet]. 2015 [cited 2023 Sep 18];766:878-83. Available from: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.766-767.878>

Author's Profile



Narisara Suwichien Department of Production Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, 156 Moo 5, Plai Chumphon Subdistrict, Mueang Phitsanulok, Phitsanulok 65000, Thailand. E-mail: narisara.su@psru.ac.th
The research interested in Automation.



Seksan Suchaipron Department of Automated Manufacturing Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, 422 Marupong Road, Na Mueang Subdistrict, Mueang District, Chachoengsao 24000, Thailand. E-mail: seksan.suc@rru.ac.th
The research interested in Machine Vision, Computer Vision, Automation.

Article History:

Received: February 2, 2024

Revised: June 30, 2024

Accepted: July 6, 2024

**การประเมินศักยภาพการบรรเทาปัญหาอุทกภัยในพื้นที่ลุ่มแม่น้ำมูล
บริเวณจังหวัดบุรีรัมย์และสุรินทร์ด้วยแบบจำลอง MIKE11
ASSESSMENT OF FLOOD MITIGATION STRATEGIES IN
THE MUN RIVER IN THE PROVINCES OF BURIRAM AND SURIN
USING THE MIKE11 MODEL**

สุวาริ สงฆ์พัฒน์แก้ว¹ วิษุวัตก์ แท้สมบัติ² และ ดวงนภา วาณิชสรณ์³

¹นักศึกษา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

1 ม.6 ต.กำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140, suvari0117@gmail.com

²อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

1 ม.6 ต.กำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140, fengwwt@ku.ac.th

³อาจารย์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

85 ถ.มาลัยแมน ต.เมืองนครปฐม อ.เมือง จ.นครปฐม 73000, wanichsan@webmail.npru.ac.th

Suvari Songpatkeaw¹, Wisuwat Taesombat² and Duangnapa Vanichsan³

¹Student, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University Kamphaengsaen

Campus, 1 Moo 6, Kamphaengsaen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand,

suvari0117@gmail.com

²Lecturer, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University Kamphaengsaen

Campus, 1 Moo 6, Kamphaengsaen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand,

fengwwt@ku.ac.th

³Lecturer, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University,

85 Malaiman Rd, Mueang Nakhon Pathom District, Nakhon Pathom 73000, Thailand,

wanichsan@webmail.npru.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการจำลองสภาพการเกิดอุทกภัยและเสนอแนะมาตรการในการบรรเทาอุทกภัยของแม่น้ำมูลบริเวณจังหวัดบุรีรัมย์และสุรินทร์ โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE11 ซึ่งจะใช้ในการจำลองสภาพการไหลแบบหนึ่งมิติของแม่น้ำมูล ส่วนมาตรการบรรเทาอุทกภัยในพื้นที่ศึกษาได้รวบรวมแผนงานจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องซึ่งพบว่ามี 2 หน่วยงาน ได้แก่

กรมเจ้าท่า และกรมทรัพยากรน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้เป็น 3 แนวทางเลือก ประกอบด้วย การทำแก้มลิง (SN.01) การขุดลอกลำน้ำ (SN.02) และการทำแก้มลิงพร้อมการขุดลอกลำน้ำ (SN.03) ผลการศึกษาพบว่า การบรรเทาอุทกภัยโดยการทำแก้มลิงพร้อมการขุดลอกลำน้ำ (SN.03) มีความเหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพแม่น้ำในปัจจุบัน โดยเลือกใช้กรณีศึกษาเป็นเหตุการณ์อุทกภัยในปี พ.ศ. 2560 มาตรการดังกล่าวจะช่วยเพิ่มปริมาณการไหลที่จังหวัดบุรีรัมย์และจังหวัดสุรินทร์ได้เท่ากับ 605.90 และ 754.79 ลบ.ม.ต่อวินาที ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับสภาพปัจจุบันของเหตุการณ์อุทกภัยปี พ.ศ. 2560 นอกจากนี้ยังสามารถลดน้ำท่วมในพื้นที่ชุมชนลงจาก 3,759.36 ไร่ เหลือ 2,220.93 ไร่ หรือคิดเป็นร้อยละ 40.92

คำสำคัญ: การบรรเทาอุทกภัย, แม่น้ำมูล, แบบจำลอง MIKE11

ABSTRACT

The objective of this study is to apply the MIKE11 model to simulate flood conditions and provide strategies to mitigate flooding in the Mun River in Buriram and Surin provinces. This model was employed to recreate the unidirectional flow of the Mun river. The research area gathered flood mitigation measures from relevant agencies and identified two specific entities involved: the Marine Department and the Department of Water Resources. This study used 3 measures: flood retention area (SN.01), river dredging (SN.02), and flood retention area combined with river dredging (SN.03). According to the findings, the flood retention area, together with river dredging (SN.03), was the most suitable option when compared to the current state of the river. By applying the flood event of 2017 as a case study, the flow discharge in Buriram and Surin Provinces was projected to increase by 608.19 and 754.79 cubic meters per second, respectively, in comparison to the pre-flood conditions of 2017. Furthermore, it successfully reduced the extent of flooding in community areas from 3,759.36 rai to 2,220.93 rai, equivalent to a drop of 40.92%.

KEYWORDS: Flood Mitigation, Mun River, MIKE11 model

1. บทนำ

อุทกภัยเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เนื่องจากฝนตกในพื้นที่ลุ่มมีปริมาณมากและตกติดต่อกันเป็นเวลานานจนเกิดน้ำไหลบ่ามาตามผิวดินลงสู่ร่องน้ำ ลำธาร และแม่น้ำ หากลำน้ำตอนใดไม่สามารถรับปริมาณน้ำได้ก็จะบ่าท่วมตลิ่งเข้าไปท่วมพื้นที่ต่าง ๆ หรือชุมชนที่ไม่มีการ

ระบายน้ำที่สมบูรณ์ น้ำท่วมเป็นปัญหาที่มีผลกระทบทั้งทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก

ลุ่มน้ำมูล ตั้งอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ทางตอนบนของลุ่มน้ำส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ราบสูง สภาพภูมิอากาศโดยทั่วไปของลุ่มน้ำมูลได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงใต้ และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ นอกจากนั้นยังได้รับอิทธิพลจากลมดีเปรสชันซึ่งพัดจากทะเลจีนใต้ ทำให้มีฝนตกหนักในฤดูฝน ลุ่มน้ำมูลมีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 1,369.10 มิลลิเมตร ส่วนใหญ่เกิดขึ้นระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงตุลาคม โดยในเดือนกันยายนซึ่งฝนตกสูงสุด มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 259.90 มิลลิเมตร [1] ที่ผ่านมามีจังหวัดบุรีรัมย์และสุรินทร์จัดเป็นพื้นที่ที่มีสภาพปัญหาอุทกภัย มีความลึกน้ำท่วม 0.75 - 1 เมตร ระยะเวลาน้ำท่วม 72 ชั่วโมง สภาพปัญหาน้ำท่วมที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะน้ำท่วมล้นตลิ่งและน้ำท่วมขังในบางพื้นที่ เนื่องจากปริมาณน้ำของแม่น้ำมูลตอนบนมีมาก และน้ำจากลำน้ำสาขาต่าง ๆ ที่ไหลมาบรรจบทำให้มีปริมาณน้ำมากกว่าความจุลำน้ำและมีสิ่งกีดขวางการระบายน้ำหรือได้รับผลกระทบจากท้ายน้ำที่มีระดับสูงจนไม่สามารถระบายน้ำออกจากพื้นที่ได้ทันจนเกิดปัญหาน้ำท่วมขังในพื้นที่ [2]

แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE11 ได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในลุ่มน้ำต่าง ๆ โดยมีหน่วยงานราชการหลายหน่วยงานที่นำแบบจำลอง MIKE11 มาประยุกต์ใช้ เช่น กรมชลประทาน กรมทรัพยากรน้ำ กรมอุตุนิยมวิทยา และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เป็นต้น ซึ่งแบบจำลอง MIKE11 สามารถจำลองลักษณะการไหลของน้ำที่เป็นการไหลแบบทิศทางเดียว คือ ทิศทางตามการไหลของน้ำ (One dimension flow) และไม่คงที่ตามเวลา (Unsteady flow) อีกทั้งมีความคล่องตัวสูงและสะดวกในการใช้งาน จากการทบทวนงานวิจัยได้มีการนำมาตรการบรรเทา น้ำท่วมทั้งใช้สิ่งก่อสร้างและไม่ใช้สิ่งก่อสร้างมาช่วยลดความรุนแรงและบรรเทาผลกระทบที่เกิดจากน้ำท่วมทั้งในและต่างประเทศ เช่น การศึกษาสภาพการเกิดน้ำท่วมและแนวทางบรรเทาอุทกภัย กรณีศึกษาลุ่มน้ำมูลตอนบนในเขตจังหวัดนครราชสีมา พบว่าการใช้ระบบผันน้ำจากเขื่อนร่วมกับการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำ สามารถลดระดับน้ำที่จะเข้าเมืองได้ดีที่สุด และสามารถช่วยระบายน้ำได้รวดเร็วขึ้น [3] การศึกษาการจำลองสภาพน้ำท่วมและการบริหารจัดการอุทกภัยของลุ่มน้ำมูลตอนกลาง โดยการสร้างคันป้องกันน้ำและคลองผันน้ำ พบว่าสามารถลดระดับน้ำหลากสูงสุดและลดระยะเวลาน้ำล้นตลิ่งได้ [4] อีกทั้งการศึกษการปรับปรุงร่องน้ำของแม่น้ำเจ้าพระยาด้วยวิธีการขุดลอก ผลการศึกษาพบว่าแม่น้ำเจ้าพระยา ระดับน้ำมีค่าลดลง และพื้นที่ส่วนใหญ่มีความเร็วและอัตราการไหลเพิ่มขึ้น [5] การศึกษาการแก้ปัญหา น้ำท่วมเรื้อรังในเมืองบันดุง ประเทศอินโดนีเซีย ด้วยวิธีการปรับปรุงเพิ่มความจุและช่องทางการระบายน้ำ ผลการศึกษาพบว่าทั้ง 2 วิธีสามารถบรรเทาปัญหาน้ำท่วมได้ [6] รวมถึงการศึกษการบรรเทาอุทกภัยในแม่น้ำ Padas ประเทศมาเลเซีย ด้วยแบบจำลอง HEC-RAS พบว่าการขุดลอกลำน้ำสามารถลดระดับน้ำท่วมสูงสุดได้ [7] และการศึกษาการวางแผนและการจัดการน้ำท่วม กรณีศึกษาลุ่มน้ำ Phan-Calo ประเทศเวียดนาม

พบว่าการสูบน้ำร่วมกับการสร้างอ่างเก็บน้ำ และการขุดลอกลำน้ำ เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการจัดการน้ำท่วม เนื่องจากมีความเสี่ยงและงบประมาณในการดำเนินการน้อยที่สุด [8] การบรรเทาน้ำท่วมด้วยการขุดลอกลำน้ำเป็นมาตรการบรรเทาน้ำท่วมที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางทั่วโลก ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราการไหลและความจุลำน้ำได้ อีกทั้งในปัจจุบันยังได้นำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการขุดลอกลำน้ำ ดังนี้ 1) Multi-beam sonars 2) Hydrosuction และ 3) Water injection dredge [9] แต่อย่างไรก็ตามการขุดลอกลำน้ำเพียงอย่างเดียวไม่สามารถแก้ปัญหาน้ำท่วมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การจัดการสภาพแวดล้อมของลำน้ำที่ดีจะสามารถลดความเสี่ยงในการเกิดปัญหาน้ำท่วมได้อย่างยั่งยืน [10]

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีการศึกษาสภาพการเกิดอุทกภัยในอดีตและเสนอแนะแนวทางในการบรรเทาอุทกภัยในแม่น้ำมูลบริเวณจังหวัดบุรีรัมย์และสุรินทร์ที่เหมาะสม โดยนำโครงการที่เกี่ยวข้องกับระบบป้องกันและบรรเทาอุทกภัยในลุ่มน้ำมูล จากสำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ ที่มีการรวบรวมเป็นแผนงานการบริหารจัดการอุทกภัยมาศึกษา ซึ่งมีหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการจัดการอุทกภัย ดังนี้ สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ กรมชลประทาน และกรมทรัพยากรน้ำ กรมโยธาธิการและผังเมือง กรมเจ้าท่า การรถไฟแห่งประเทศไทย กรมทางหลวง และกรมทางหลวงชนบท มีพื้นที่ดำเนินการครอบคลุม 7 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดนครราชสีมา จังหวัดบุรีรัมย์ จังหวัดสุรินทร์ จังหวัดยโสธร จังหวัดศรีสะเกษ จังหวัดอำนาจเจริญ และจังหวัดอุบลราชธานี แผนงานดังกล่าวมีการดำเนินโครงการทั้งโครงการขนาดใหญ่และขนาดกลาง ที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาน้ำท่วม และมีหน่วยงานที่ดำเนินโครงการในบริเวณพื้นที่ศึกษา คือ กรมเจ้าท่าและกรมทรัพยากรน้ำ ซึ่งมุ่งเน้นการปรับปรุงสภาพลำน้ำให้เหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพลุ่มน้ำและชะลอน้ำหลากไม่ให้ไหลลงไปทางด้านท้ายน้ำอย่างรวดเร็ว ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำแผนงานดังกล่าวมาศึกษาโดยประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองสภาพการไหลของลำน้ำในพื้นที่ศึกษา และหาแนวทางการบรรเทาอุทกภัยในแม่น้ำมูลบริเวณจังหวัดบุรีรัมย์และสุรินทร์ที่เหมาะสมต่อไป

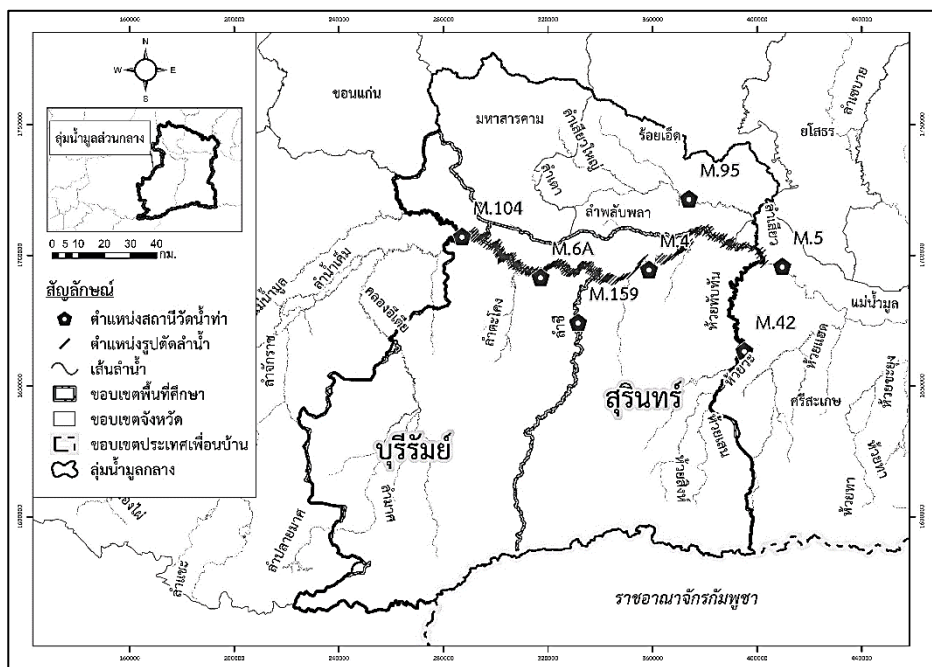
2. วิธีดำเนินการวิจัย

พื้นที่ศึกษา คือ แม่น้ำมูลบริเวณจังหวัดบุรีรัมย์และสุรินทร์ ซึ่งตั้งอยู่ส่วนกลางของลุ่มน้ำมูล มีพื้นที่รับน้ำรวมทั้งสิ้น 24,691.87 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 15,432,421 ไร่ ครอบคลุมพื้นที่ 4 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดบุรีรัมย์ จังหวัดสุรินทร์ บางส่วนของจังหวัดร้อยเอ็ด และจังหวัดมหาสารคาม ลำน้ำในพื้นที่ศึกษาได้แก่ ลำพังซู่ ห้วยตะโคง ลำชี ลำพลับพลา ห้วยทับทัน และลำเสียวใหญ่ โดยแม่น้ำมูลในพื้นที่ศึกษามีระยะทางทั้งสิ้น 290 กิโลเมตร กำหนดขอบเขตด้านเหนือ น้ำที่สถานี M.104 ตั้งอยู่ที่ ต.บ้านจาน อ.พุทไธสง จ.บุรีรัมย์ และขอบเขตด้านท้ายน้ำที่สถานี M.5 ตั้งอยู่ที่ อ.ราษีไศล จ.ศรีสะเกษ ดังรูปที่ 1

2.1 การรวบรวมและตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย

- 1) ข้อมูลน้ำท่ารวบรวมได้จากกรมชลประทาน ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 7 สถานี ได้แก่ M.104, M.6A, M.159, M.4, M.95, M.42 และ M.5
- 2) ข้อมูลโค้งความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับปริมาณน้ำ (Rating curves) ปี พ.ศ. 2564 ที่จัดทำโดยกรมชลประทานจำนวน 3 สถานี ได้แก่ สถานี M.6A, M.4 และ M.5
- 3) ข้อมูลรูปตัดขวางแม่น้ำมูล รวบรวมจากกรมเจ้าท่า ซึ่งมีการสำรวจแม่น้ำมูลเมื่อปี พ.ศ. 2564 จำนวน 213 รูปตัด รวมระยะทางทั้งสิ้น 290 กิโลเมตร



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษา

2.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE11

ในการศึกษานี้ได้ใช้แบบจำลอง MIKE11-HD (Hydrodynamic Model) ซึ่งเป็นแบบจำลองย่อยของแบบจำลอง MIKE11 ที่พัฒนาโดย DHI Water Environment and Health ประเทศเดนมาร์ก ตั้งอยู่บนพื้นฐานของสมการเซนต์-เวินนัท ซึ่งประกอบด้วยสมการต่อเนื่องและสมการโมเมนตัมแสดงดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ นอกจากนี้แบบจำลองดังกล่าวยังสามารถอธิบายถึงสภาพการไหลได้ทั้งการไหลแบบต่ำกว่าวิกฤต (Sub-critical flow) และการไหลแบบเหนือวิกฤต

(Super-critical flow) รวมทั้งสามารถคำนวณการไหลในระบบลำน้ำที่มีการไหลเข้าด้านข้างและแสดงผลการคำนวณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time) และสถานที่ (Space)

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2)$$

โดยที่ Q = อัตราการไหล (ลบ.ม.ต่อวินาที)

A = พื้นที่หน้าตัดของการไหล (ตร.ม.)

q = อัตราการไหลเข้าด้านข้าง (ลบ.ม.ต่อวินาที)

h = ความลึกของน้ำ (เมตร)

α = ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้โมเมนตัม

C = ค่าสัมประสิทธิ์ของ Chezy

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

x = ระยะทาง (เมตร)

t = เวลา (วินาที)

พารามิเตอร์ที่ใช้เปรียบเทียบแบบจำลองนี้ คือ ค่า Manning's n เป็นค่าที่แสดงถึงความเสียดทานต่อการไหลของน้ำในทางน้ำเปิด ในทางน้ำธรรมชาติค่า Manning's n จะอยู่ระหว่าง 0.01-0.05 และค่า Manning's n ในคลองส่งน้ำตาดคอนกรีตจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.013-0.015 [11]

2.3 การเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง MIKE11-HD

การเปรียบเทียบและการพิสูจน์แบบจำลองฯ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การเปรียบเทียบ โดยใช้การไหลแบบ Steady state และ 2) การเปรียบเทียบ โดยใช้ข้อมูลจากเหตุการณ์ในอดีต (Historical event) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนแรกเป็นการเปรียบเทียบ โดยใช้การไหลแบบ Steady state เริ่มต้นจากการวิเคราะห์หา Rating curves ที่เป็นตัวแทนของสถานีวัดน้ำท่า M.6A และ M.4 โดยใช้ข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2557-2564 จากนั้นทำการสมมติค่าปริมาณการไหลที่ขอบเขตด้านเหนือน้ำให้มีค่าคงที่ (Steady state) ปกติจะมีขนาดเท่ากับปริมาณการไหลสูงสุดเท่ากับปริมาณน้ำนองสูงสุดของลำน้ำ สำหรับใน

แม่น้ำมูลจะใช้ค่าระหว่าง 50-1,500 ลบ.ม.ต่อวินาที พร้อมทั้งนำค่าระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลอง และปริมาณการไหลที่มีความสัมพันธ์กันมาลงใน Rating curves เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองฯ กับ Rating curves ที่ได้จากการตรวจวัดจริง โดยเริ่มจากการปรับค่า Manning's n ทั้งในลำน้ำและทุ่งน้ำท่วมด้วยวิธี Trial and Error เพื่อหาค่า Manning's n ที่เหมาะสมจนกว่าค่าระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองฯ มีค่าใกล้เคียงกับ Rating curves ที่ตรวจวัดจริง

สำหรับส่วนที่สองเป็นการปรับเทียบฯ โดยใช้ข้อมูลจากเหตุการณ์ในอดีต (Historical event) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่า Manning's n ที่ปรับเทียบมาได้ โดยเริ่มต้นจากการพิจารณาเลือกข้อมูลที่สามารถใช้ได้จริงในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2557-2561 ส่วนการตรวจพิสูจน์แบบจำลองฯ ใช้ข้อมูลในช่วงปี พ.ศ. 2561-2564 จากนั้นทำการกำหนดขอบเขตด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ โดยใช้ข้อมูลปริมาณการไหลรายวันของสถานี M.104 ในแม่น้ำมูลเป็นขอบเขตทางด้านเหนือน้ำ ส่วนขอบเขตด้านท้ายน้ำใช้ข้อมูล Rating curves ของสถานี M.5 ในแม่น้ำมูล และปริมาณการไหลเข้าด้านข้างที่ประเมินได้จาก Side flow ตามธรรมชาติที่ไหลเข้าสู่แม่น้ำมูลในช่วงระหว่างสถานีวัดน้ำท่า M.104 และ M.5 ของกรมชลประทาน พร้อมทั้งกำหนดค่า Manning's n ให้มีค่าเท่ากับค่า Manning's n ตลอดช่วงแม่น้ำมูลที่ผ่านการปรับเทียบฯ โดยใช้การไหลแบบ Stead state และขั้นตอนสุดท้ายทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณระดับน้ำจากแบบจำลองกับค่าที่ตรวจวัดได้จริงที่สถานี M.6A (กม.ที่ 81+568) และสถานี M.4 (กม.ที่ 169+377) ที่รวบรวมได้จากกรมชลประทาน โดยต้องมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด

2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

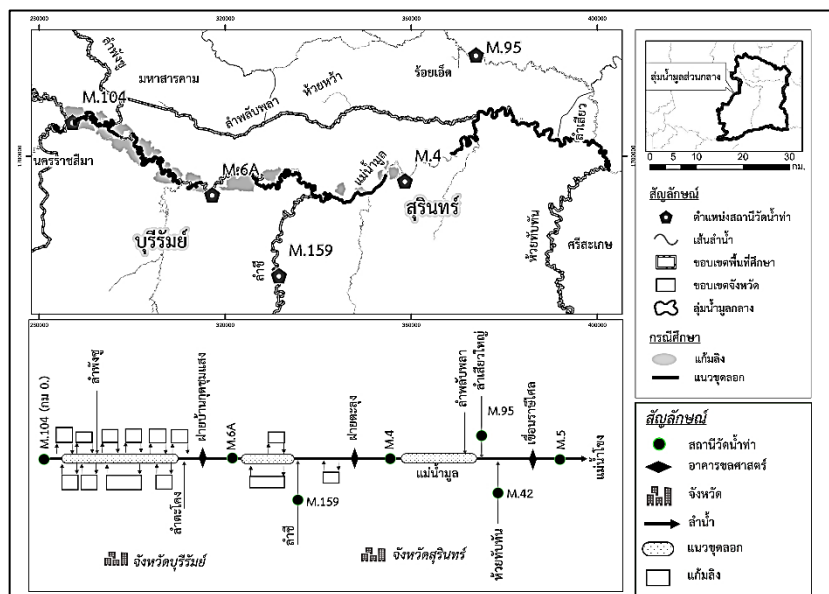
ในการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองฯ นั้น จำเป็นต้องใช้ดัชนีทางสถิติในการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองฯ สำหรับการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ค่า Root mean square error (RMSE) โดยที่ชุดข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองมีค่าน้อยแสดงว่าชุดข้อมูลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลตรวจวัดน้อย และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ยกกำลังสอง (Coefficient of determination, R^2) ต้องมีค่ามากกว่า 0.6 จึงจะเป็นที่ยอมรับค่า Manning's n ลำน้ำที่ได้ [11]

2.5 การศึกษาแนวทางเลือกในการบรรเทาอุทกภัยด้วยแบบจำลอง MIKE11

กรมเจ้าท่า ได้เสนอแผนงานในการบรรเทาอุทกภัยในพื้นที่ลุ่มน้ำมูล โดยการปรับปรุงขุดลอกแม่น้ำสายหลักในภาคตะวันออกเฉียงเหนือปัจจุบัน ได้แก่ แม่น้ำชี แม่น้ำมูล แม่น้ำเลย และแม่น้ำสงคราม การดำเนินโครงการมีกำหนดรูปแบบการขุดลอกแม่น้ำให้สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพลุ่มน้ำ และความลาดชันท้องแม่น้ำ ในส่วนของกรมทรัพยากรน้ำ ได้ดำเนินการศึกษา

โครงการแก้มลิงในพื้นที่ลุ่มต่ำของลุ่มน้ำมูล กำหนดให้มีแก้มลิงบริเวณพื้นที่ลุ่มต่ำทั้งสองฝั่งของแม่น้ำมูล เพื่อชะลอน้ำหลากไม่ให้ไหลลงไปตามด้านท้ายน้ำอย่างรวดเร็วเป็นการตัดยอดน้ำจากแม่น้ำมูลและลำน้ำสาขา ทำให้ความเสียหายที่จะเกิดจากน้ำท่วมลดลง (โครงการจัดทำผังลุ่มน้ำมูล) ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำมาประยุกต์ใช้เป็นทางเลือกสำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ได้ 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 การทำแก้มลิง (SN.01) กรณีที่ 2 การขุดลอกลำน้ำ (SN.02) และกรณีที่ 3 การทำแก้มลิงพร้อมการขุดลอกลำน้ำ (SN.03)

สำหรับการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE11 โดยเริ่มจากจังหวัดบุรีรัมย์ไปจนถึงจังหวัดสุรินทร์ ตั้งแต่สถานีวัดน้ำท่า M.104 ต.ท่าตูม อ.ท่าตูม จ.สุรินทร์ ถึงสถานีวัดน้ำท่า M.5 อ.ราษีไศล จ.ศรีสะเกษ รวมระยะทาง 290 กิโลเมตร และได้พิจารณาเลือกใช้เหตุการณ์อุทกภัยปี พ.ศ. 2560 โดยมีกรณีศึกษาทั้งสิ้น 4 กรณีศึกษา คือ กรณีที่ 1 สภาพปัจจุบัน และกรณีที่ 2-4 เป็นสภาพปัจจุบันแต่มีการใช้มาตรการในการบรรเทาอุทกภัยทั้ง 3 กรณี (SN.01-SN.03) พร้อมทั้งจัดทำแผนที่น้ำท่วมประกอบ



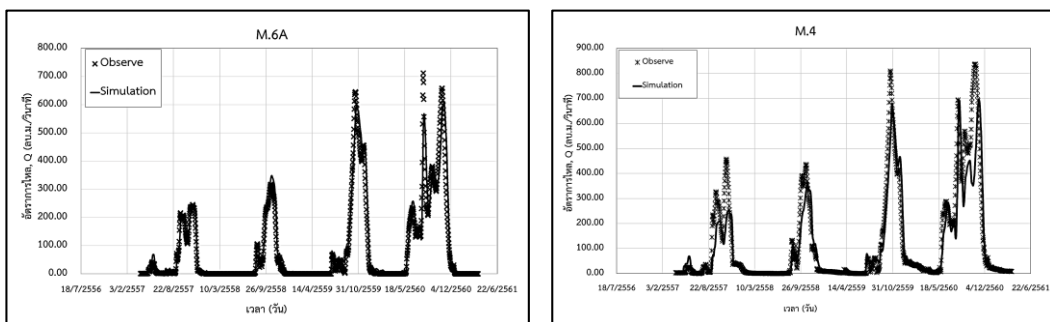
รูปที่ 2 แนวทางเลือกและผังระบบลำน้ำที่ใช้ในแบบจำลอง MIKE11

3. ผลการศึกษา

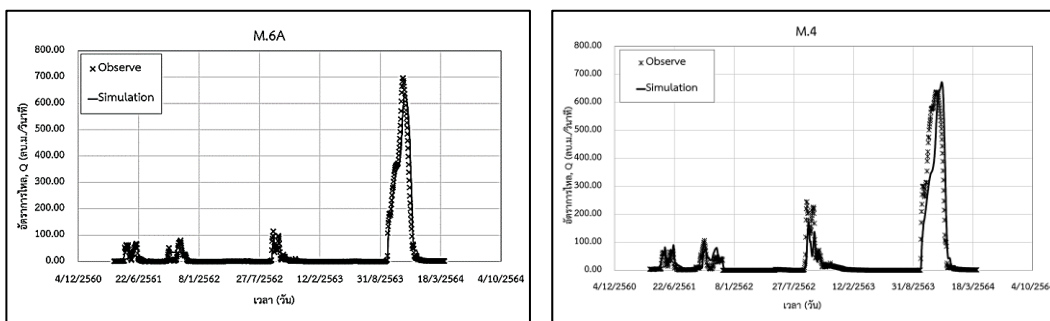
3.1 ผลการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง MIKE11

ผลการศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลอง MIKE11 ที่เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์เพื่อกำหนดค่าของแม่น้ำมูลบริเวณจังหวัดบุรีรัมย์และสุรินทร์ พบว่า ค่า n ของสถานี M.6A และ M.4 มีค่าเท่ากับ

0.060 และ 0.020 ตามลำดับ โดยที่แต่ละสถานีมีความผันแปรค่อนข้างสูง ซึ่งอาจมาจากสาเหตุที่แม่น้ำมูลมีสภาพลำนํ้าคดเคี้ยวประกอบกับลำนํ้าตื้นเขินจากการตกตะกอนหรือการพัดพาของตะกอนทับถม ในบางช่วงที่ทำให้หน้าตัดลำนํ้ามีการเปลี่ยนแปลง ในส่วนของผลการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ที่ใช้เหตุการณ์ในอดีตช่วงระหว่างวันที่ 1 เมษายน 2557 ถึงวันที่ 31 มีนาคม 2561 พบว่า ค่า R^2 ที่สถานี M.6A มีค่าเท่ากับ 0.93 และ 0.94 ตามลำดับ และที่สถานี M.4 มีค่าเท่ากับ 0.82 และ 0.83 ตามลำดับ ส่วนค่า RMSE ที่สถานี M.6A มีค่าเท่ากับ 38.59 และ 28.25 ลบ.ม.ต่อวินาที ตามลำดับ และที่สถานี M.4 มีค่าเท่ากับ 83.37 และ 52.05 ลบ.ม.ต่อวินาที ตามลำดับซึ่งผ่านเกณฑ์การเปรียบเทียบฯ โดยแสดงกราฟเปรียบเทียบปริมาณน้ำและตรวจพิสูจน์ที่ได้ดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง MIKE11 ปี พ.ศ. 2557 ถึง 2561



รูปที่ 4 ผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง MIKE11 ปี พ.ศ. 2561 ถึง 2564

3.2 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE11 ในการศึกษาแนวทางเลือก

จากผลการศึกษาทั้ง 3 กรณี ที่ได้พิจารณาจากเหตุการณ์อุทกภัยในปี พ.ศ. 2560 พบว่า การทำแก้มลิงพร้อมกับการขุดลอกลำนํ้า (SN.03) สามารถเพิ่มปริมาณการไหลและลดระดับน้ำได้อย่างมีนัยสำคัญกว่าทางเลือกอื่นกล่าวคือ จังหวัดบุรีรัมย์ สถานี M.6A ก่อนการทำแก้มลิงพร้อมการขุด

ลอกลำน้ำมีปริมาณการไหลและระดับน้ำสูงสุดเท่ากับ 593.94 ลบ.ม.ต่อวินาที และ 130.00 ม.รทก. ตามลำดับ และเมื่อมีการทำแก้มลิงพร้อมกับการขุดลอกลำน้ำ พบว่ามีปริมาณการไหลสูงสุดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 605.90 ลบ.ม.ต่อวินาที หรือคิดเป็น 2.02% ส่วนระดับน้ำสูงสุด พบว่าสามารถลดระดับน้ำลงจากเดิม 0.47 เซนติเมตร หรือเหลือระดับน้ำสูงสุดเท่ากับ 129.53 ม.รทก. ในขณะที่จังหวัดสุรินทร์ สถานี M.4 ก่อนการทำแก้มลิงพร้อมกับการขุดลอกลำน้ำมีปริมาณการไหลและระดับน้ำสูงสุดเท่ากับ 742.38 ลบ.ม.ต่อวินาที และ 121.09 ม.รทก. ตามลำดับ เมื่อมีการทำแก้มลิงพร้อมกับการขุดลอกลำน้ำ พบว่ามีปริมาณการไหลสูงสุดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 754.79 ลบ.ม.ต่อวินาที คิดเป็น 1.67% ส่วนระดับน้ำสูงสุดลดลงจากเดิม 0.71 เซนติเมตร หรือลดลงเหลือ 120.38 ม.รทก. แสดงดังตารางที่ 1

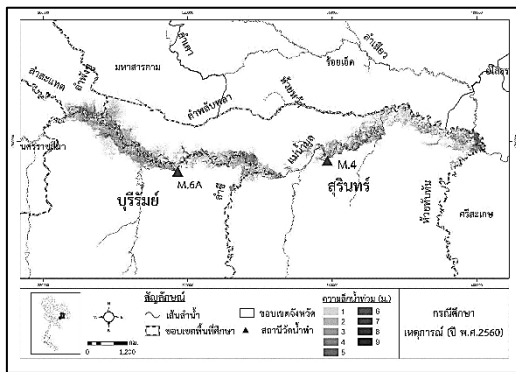
ตารางที่ 1 ผลการศึกษาการบรรเทาอุทกภัยด้วยแบบจำลอง MIKE11

กรณีศึกษา	ปริมาณการไหลสูงสุด (ลบ.ม.ต่อวินาที)		ระดับน้ำสูงสุด (ม.รทก.)		ปริมาตร (volume) ลบ.ม.		ขอบเขต พื้นที่น้ำท่วม (ไร่)
	M.6A	M.4	M.6A	M.4	M.6A	M.4	
เหตุการณ์ (ปี 2560)*	593.94	742.38	130.00	121.09	4447.70	5581.21	299,956.71
SN.01	593.30	741.63	129.91	120.96	4395.69	5546.61	279,577.74
ร้อยละ	(-0.11%)	(-0.10%)	(-0.07%)	(-0.10%)	(-1.17%)	(-0.62%)	(-6.80%)
SN.02	605.31	754.54	129.65	120.50	4396.12	5441.66	207,552.98
ร้อยละ	(1.92%)	(1.64%)	(-0.26%)	(-0.49%)	(-1.16%)	(-2.50%)	(-30.81%)
SN.03	605.90	754.79	129.53	120.38	4396.24	5441.69	202,954.80
ร้อยละ	(2.02%)	(1.67%)	(-0.36%)	(-0.59%)	(-1.16%)	(-2.50%)	(-32.34%)

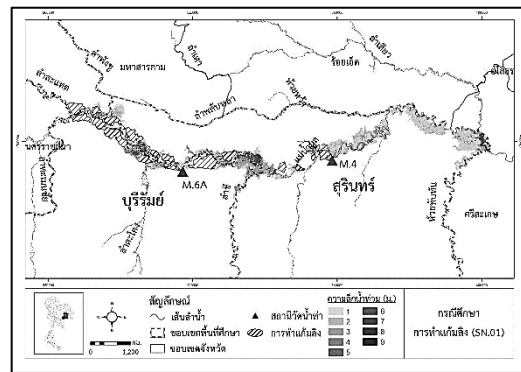
หมายเหตุ: - * อ้างอิงข้อมูลจากกรมพัฒนาที่ดินปีพ.ศ. 2562

- ผลที่มีเครื่องหมายลบ คือค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับสภาพปัจจุบัน ผลที่มีเครื่องหมายบวก คือค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสภาพปัจจุบัน

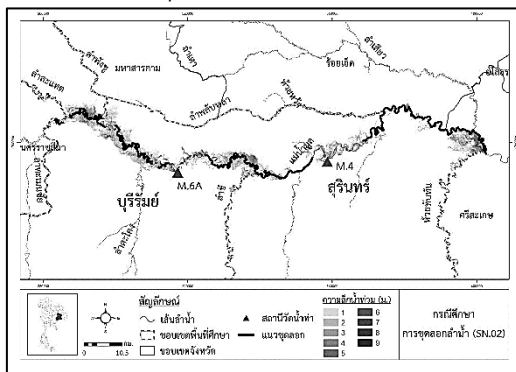
อีกทั้งเมื่อพิจารณาพื้นที่ประสบปัญหาอุทกภัยในปี พ.ศ. 2560 พบว่ามีพื้นที่น้ำท่วมทั้งสิ้น 299,956.71 ไร่ เมื่อมีการดำเนินการป้องกันและบรรเทาอุทกภัยตามทางเลือกต่าง ๆ จะสามารถลดพื้นที่น้ำท่วมลงได้ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทางเลือกที่มีการทำแก้มลิงพร้อมกับการขุดลอกลำน้ำ (SN.03) สามารถลดพื้นที่น้ำท่วมได้มากที่สุดโดยเฉพาะพื้นที่ชุมชนคือ ลดพื้นที่น้ำท่วมจากเดิมได้ถึง 40.92% หรือมีพื้นที่น้ำท่วมลดลงเหลือ 2,220.93 ไร่



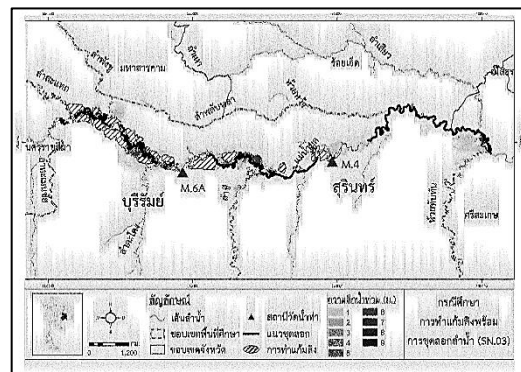
เหตุการณ์ (ปี พ.ศ. 2560)



SN.01



SN.02



SN.03

รูปที่ 5 ขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมของแต่ละกรณีศึกษา

ตารางที่ 2 พื้นที่น้ำท่วมของการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทต่าง ๆ

ประเภทของ การใช้ประโยชน์ที่ดิน		กรณีศึกษา	เหตุการณ์ (ปี 2560)*	SN.01	SN.02	SN.03
พื้นที่ชุมชน	ไร่		3,759.36	3,198.87	2,234.02	2,220.93
	ร้อยละ			14.91	40.57	40.92
พื้นที่เกษตรกรรม	ไร่		173,981.86	163,203.58	113,165.94	113,104.53
	ร้อยละ			6.20	34.96	34.99
พื้นที่ป่าไม้	ไร่		688.46	606.16	452.78	446.49
	ร้อยละ			11.96	34.23	35.15
พื้นที่น้ำ	ไร่		54,752.94	50,039.19	47,143.05	46,109.42
	ร้อยละ			8.61	13.90	15.79

ตารางที่ 2 พื้นที่น้ำท่วมของการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทต่าง ๆ (ต่อ)

ประเภทของ การใช้ประโยชน์ที่ดิน		กรณีศึกษา	เหตุการณ์ (ปี 2560)*	SN.01	SN.02	SN.03
พื้นที่อื่น ๆ	ไร่		49,876.39	46,752.61	40,091.20	36,794.31
	ร้อยละ			6.26	19.62	26.23
รวมทั้งหมด	ไร่		299,956.71	279,577.74	207,552.98	202,954.80
	ร้อยละ			6.79	30.81	32.34

หมายเหตุ: * อ้างอิงข้อมูลจากกรมพัฒนาที่ดินปีพ.ศ. 2562

3.3 การประเมินผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์

ทั้งนี้ในการศึกษาแนวทางเลือกทั้ง 3 กรณี ได้มีการประมาณราคาเบื้องต้น โดยที่การทำแก้มลิง (SN.01) พื้นที่ทั้งหมดประมาณ 78,929 ไร่ ในกรณีศึกษากำหนดให้แก้มลิงมีความลึก 3 เมตร จะมีปริมาณวัสดุขุดเท่ากับ 379 ล้าน ลบ.ม. การขุดลอกแม่น้ำ (SN.02) ระยะทางประมาณ 244 กิโลเมตร มีปริมาณวัสดุขุดเท่ากับ 2.76 ล้าน ลบ.ม. และการทำแก้มลิงพร้อมกับการขุดลอกลำน้ำ (SN.03) มีปริมาณวัสดุขุดเท่ากับ 381.6 ล้าน ลบ.ม. รวมทั้งผลกระทบสิ่งแวดล้อมเบื้องต้นที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการพัฒนาโครงการเบื้องต้นดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลกระทบเบื้องต้น

กรณี	ผลกระทบ	
	ด้านวิศวกรรม [12]	ด้านสิ่งแวดล้อม**
SN.01	1) ช่วยลดปริมาณการไหลได้เฉลี่ย 0.11% 2) ลดระดับน้ำได้เฉลี่ย 0.09% 3) ลดพื้นที่น้ำท่วมได้ 24.06% 4) ค่าก่อสร้าง 9,471 ล้านบาท	ในช่วงการก่อสร้าง เนื่องจากการขุดดินเพื่อทำเป็นแก้มลิง การกองดินจากการขุดหากกองไว้ใกล้ลำน้ำ จะทำให้เกิดการชะล้างและพัดพาตะกอนลงสู่ลำน้ำ ทำให้เกิดตะกอนแขวนลอยในลำน้ำเพิ่มขึ้นและจะมีผลกระทบโดยตรงต่อการใช้ประโยชน์ที่ดินในบริเวณที่มีการทำแก้มลิง ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่การเกษตร ดังนั้นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างคือการสูญเสียพื้นที่ทางการเกษตรและพื้นที่ใช้ประโยชน์บางส่วน

ตารางที่ 3 ผลกระทบเบื้องต้น (ต่อ)

กรณี	ผลกระทบ	
	ด้านวิศวกรรม [12]	ด้านสิ่งแวดล้อม**
SN.02	1) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการไหลได้เฉลี่ย 1.78% 2) ลดระดับน้ำได้เฉลี่ย 0.38% 3) ลดพื้นที่น้ำท่วมได้ 29.16 % 4) ค่าก่อสร้าง 68.8 ล้านบาท	เนื่องจากกิจกรรมการขุดลอกลำน้ำเป็นกิจกรรมที่กระทำในลำน้ำโดยตรง จึงมีผลกระทบต่อการศึกษาการไหลของน้ำในระยะก่อสร้าง รวมถึงทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนความขุ่นในแหล่งน้ำ ซึ่งราษฎรที่อยู่บริเวณริมแม่น้ำจะได้รับผลกระทบน้อย
SN.03	1) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการไหลได้เฉลี่ย 1.85% 2) ลดระดับน้ำได้เฉลี่ย 0.48% 3) ลดพื้นที่น้ำท่วมได้ 33.85% 4) ค่าก่อสร้าง 9,540 ล้านบาท	ในกรณีนี้ จะทำให้เกิดผลกระทบมากทั้งในลำน้ำและราษฎรที่อยู่บริเวณริมแม่น้ำ

หมายเหตุ: ** อ้างอิงจากโครงการศึกษาแผนหลักแบบบูรณาการ เพื่อการบรรเทาอุทกภัยและภัยแล้งพื้นที่เฉพาะ (Area Based) มูลตอนกลางบุรีรัมย์-สุรินทร์

4. อภิปรายผลการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อศึกษาและกำหนดแนวทางในการศึกษาไว้ 3 กรณี พบว่าแนวทางเลือกที่ 3 การทำแก้มลิงพร้อมการขุดลอกลำน้ำ (SN.03) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการไหลและช่วยลดระดับน้ำในแม่น้ำมูล เช่นเดียวกับการศึกษาของ Mingmuang and Kanasut [3] ได้กำหนดมาตรการใช้สิ่งก่อสร้างประกอบด้วย 3 มาตรการ ได้แก่ 1) การใช้ระบบผันน้ำจากเขื่อนระบายน้ำโคกแฝกไปลงบึงพุดซา โดยใช้อาคารแบ่งน้ำละลมหม้อ ต.โป่งแดง อ.ขามทะเลสอ 2) การเพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำในลำตะคองและลำบริบูรณ์โดยการปรับปรุงก่อสร้าง รื้อฝายเดิม สิ่งกีดขวางทางน้ำ และขุดลอกลำน้ำ 3) รวมกรณีที่ 1 และ 2 เข้าด้วยกัน จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า สำหรับกรณีที่ 3 สามารถลดระดับน้ำที่จะเข้าเมืองได้ดีที่สุด และ สามารถช่วยในการระบายน้ำได้เร็วขึ้นสอดคล้องกับการรายงานของ Pirom [13] ได้ศึกษาแนวทางแก้ปัญหาน้ำท่วมโดยการผันน้ำเข้าแก้มลิงในช่วงน้ำท่วมสามารถลดระดับน้ำท่วมได้และ Kaewsalubnil [14] ได้เสนอแนะแนวทางการป้องกันและบรรเทาอุทกภัยของลำน้ำชีตอนบน โดยการขุดลอกลำน้ำสายหลักสีกลองจากเดิมเฉลี่ยประมาณ 1.00 เมตร และทำคันดินสูงขึ้นประมาณ 2.00 เมตร ในบริเวณที่เกิดน้ำท่วม สามารถลดระดับน้ำท่วมได้ 2.35 เมตร (71.36%) ซึ่งมีความ

สอดคล้องกับการศึกษา เนื่องจากกรณีศึกษาดังกล่าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการไหลและช่วยลดระดับน้ำทำให้ประสิทธิภาพในการระบายน้ำของลำน้ำได้ดีขึ้น

5. สรุปผล

แม่น้ำมูลประสบปัญหาน้ำท่วมอันเนื่องมาจากปัจจัยหลายอย่าง ดังนั้นผลการศึกษาในครั้งนี้ได้นำเหตุการณ์น้ำท่วมปี พ.ศ. 2560 มาวิเคราะห์กับแผนงานของหน่วยงานในการบรรเทาอุทกภัยบริเวณพื้นที่ศึกษา โดยนำมาประยุกต์ใช้เป็นแนวทางเลือกในการบรรเทาอุทกภัย เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ด้านชลศาสตร์ พบว่าการทำแก้มลิงพร้อมการขุดลอกลำน้ำ (SN.03) มีความเหมาะสมในการบรรเทาอุทกภัย ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการไหลและลดระดับน้ำในแม่น้ำมูลมากที่สุด อีกทั้งยังสามารถลดพื้นที่น้ำท่วมทั้ง 2 จังหวัดเหลือ 202,954.80 ไร่ หรือคิดเป็น 32.34% โดยเฉพาะในพื้นที่ชุมชนสามารถลดพื้นที่น้ำท่วมได้ 40.92% แต่เมื่อพิจารณาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของกรณีที่ 3 (SN.03) นั้นจะมีผลกระทบทั้งในลำน้ำและการใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณริมแม่น้ำมากที่สุด รวมถึงใช้งบประมาณสำหรับการลงทุนที่มากกว่าการทำแก้มลิงหรือการขุดลอกลำน้ำเพียงอย่างเดียว เมื่อทำการเปรียบเทียบแนวทางเลือกทั้ง 3 กรณีจะเห็นได้ว่ากรณีที่ 2 การขุดลอกลำน้ำ (SN.02) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการไหลและลดระดับน้ำในแม่น้ำมูลรวมถึงสามารถลดพื้นที่น้ำท่วมทั้ง 2 จังหวัดได้ 30.81% ได้ใกล้เคียงกับกรณีที่ 3 ทั้งนี้ยังสามารถลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและด้านเศรษฐศาสตร์ได้มากกว่าการทำแก้มลิงพร้อมการขุดลอกลำน้ำ

References

- [1] Office of the National Water Resources. Summary report of the Mun river basin [Internet]. 2020 [cited 2024 May 19]. Available from: <https://ebook.onwr.go.th/read/140/pdf> (In Thai)
- [2] Bureau of water management and hydrology. Manual for estimating water flow using Manning's formula [Internet]. 2010 [cited 2024 Jan 24]. Available from: <https://division.dwr.go.th/bic/> (In Thai)
- [3] Mingmuang W, Kanasut J. Study of flood relief measures of upper Mun river basin in Nakhon Ratchasima by Mike11 model. Proceedings of the 9th Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus Conference: Engineering, Science Technology and Environment; 2012 Dec 6-7; Nakhon Pathom, Thailand. p. 571-78. (In Thai)

- [4] Yaibunditt T. The study of flood simulation and flood management of middle Mun river basin [Thesis]. Nakhon Pathom, Thailand: Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus; 2014. (In Thai)
- [5] Chamwan K, Kanasut J. Study on channel improvement of Chaopraya river. Proceedings of the 25th National Convention on Civil Engineering; 2020 Jul 15-17; Chonburi, Thailand. p. WRE26 1-7. (In Thai)
- [6] Sarminingshi A. Drainage system evaluation as an effort to reduce flood inundation in gedebage area, Bundung – West Java. Proceedings of International Conference on Sustainable Infrastructure; 2024 Oct 6-12; Honolulu, Hawaii. p. 1-9.
- [7] Pirah J, Roslee R. Positive changes in flood mitigation through sand dredging works at Padas river and Tributary based on HEC-RAS hydrological modelling. International Journal of Design & Nature and Ecodynamics 2021;16(4):451-58.
- [8] Nguyen DT. Risk-Based planning and optimization of flood management measures in Vietnam – a case study in the Phan-Calo river basin. Journal of Ecological Engineering 2023;24(5):166-75.
- [9] Smith B. Dredging and flood prevention: mitigating the risk of inundation [Internet]. 2023 [cited 2024 Jan 24]. Available from: <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=1753>
- [10] CIWEM. Floods and dredging – a reality check [Internet]. 2023 [cited 2024 Jan 24]. Available from: <https://www.ciwem.org/assets/pdf/Policy/Reports/Floods-and-Dredging-a-reality-check.pdf>
- [11] Taesombat W, Patsinghasanee S. Flood mitigation study in Nam Loei river basin using river basin modelling. Proceedings of the 3rd National Convention on Water Resources Engineering; 2009 Aug 6-7; Nakhon Nakhon Nayok, Thailand. p. 1-10. (In Thai)
- [12] The Comptroller General's Department. Criteria for calculating the median price for irrigation construction work [Internet]. 2017 [cited 2024 Jan 24]. Available from: <https://finance.cdd.go.th/wp-content/uploads/sites/96/2017/04/5-หลักเกณฑ์การคำนวณราคากลางงานชลประทาน.pdf> (In Thai)
- [13] Pirom S. Flood simulation based hec-ras model and geographic information system of lower chaophraya river basin using retention ponds [Thesis]. Nakhon Pathom, Thailand: Silpakorn University; 2011. (In Thai)

- [14] Kaewsalubnil S. A study flooding and protection in the upper Chi Basin by using MIKE11 [Thesis]. Bangkok, Thailand: King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2008. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



สุวารี สงฆ์พัฒนแก้ว นิสิตระดับมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน เลขที่ 1 ม.6 ต.กำแพงแสน อ.กำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140
E-mail: suvari0117@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: อุทกวิทยา แบบจำลองน้ำท่วมและการป้องกันน้ำท่วม



วิษุวัตน์ แท้สมบัติ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน เลขที่ 1 ม.6 ต.กำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140
E-mail: fengwwt@ku.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: อุทกวิทยา อุทกพลศาสตร์ และการชลประทาน



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงนภา วานิชสรณ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ นครปฐม 85 ถ.มาลัยแมน ต.เมืองนครปฐม อ.เมือง จ.นครปฐม 73000
E-mail: wanichsan@webmail.npru.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: อุทกวิทยาและอุทกพลศาสตร์

Article History:

Received: March 20, 2024

Revised: July 30, 2024

Accepted: August 1, 2024

การพัฒนากระบวนการหมักหัวมันสำปะหลังเพื่อให้ได้โปรตีน
เป็นส่วนผสมอาหารสัตว์

**DEVELOPMENT OF THE FERMENTATION PROCESS OF CASSAVA
ROOTS TO PRODUCE PROTEIN AS AN ANIMAL FEED INGREDIENT**

สากล ทองประภา¹ ศุภรัชชัย วรรัตน์^{2*} สุรศักดิ์ จันทร์ฉาย³ และ ณัฐ นาคร⁴

¹นักศึกษา บัณฑิตศึกษาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต 110/1-4 ถ.ประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210,
627191120002@dpu.ac.th

^{2*}อาจารย์ บัณฑิตศึกษาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต 110/1-4 ถ.ประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210,
vorarat@dpu.ac.th

³กรรมการผู้จัดการ, บริษัท เอ-เวสต์ พร็อพเพอร์ตี้ จำกัด 109/9 หมู่4 ตำบลห้วยกะปิ อำเภอเมือง
ชลบุรี จังหวัดชลบุรี 20130, surasak_69@yahoo.com

⁴หัวหน้างาน 8, งานบริการและควบคุมน้ำสูญเสีย 1 การประปาส่วนภูมิภาคสาขาพัตยา (ชั้นพิเศษ)
26/1 หมู่12 ตำบลหนองปรือ อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี 20150, natnakkorn@gmail.com

Sakol Thongprapa¹, Suparatchai Vorarat^{2*}, Surasak Janchai³ and Nat Nakkorn⁴

¹Ph.D. student, Graduate Program in Engineering Management, College of
Innovative Technology and Engineering, Dhurakij Pundit University, 110/1-4 Prachachuen
Road, Laksi, Bangkok 10210, Thailand, 627191120002@dpu.ac.th

^{2*}Lecturer, Graduate Program in Engineering Management, College of Innovative
Technology and Engineering, Dhurakij Pundit University, 110/1-4 Prachachuen Road,
Laksi, Bangkok 10210, Thailand, vorarat@dpu.ac.th

³Managing Director, A-West Property Co., Ltd., 109/9 Moo 4, Huai Kapi Subdistrict,
Mueang Chonburi District, Chonburi 20130, Thailand, surasak_69@yahoo.com

⁴Supervisor Level 8, Water Loss Services and Control, Provincial Waterworks Authority,
Branch Office Pattaya (Special Level), 26/1 Moo12, Nong Prue Subdistrict, Bang Lamung
District, Chonburi 20150, Thailand, natnakkorn@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการหมักหัวมันสำปะหลังให้ได้ตะกอนที่มีปริมาณโปรตีนเพียงพอเพื่อนำผลไปเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนที่ได้จากกระบวนการซึ่งนำไปใช้เป็นส่วนผสมอาหารสัตว์ โดยได้ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (factorial designed) และแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) โดยมี 2 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ ($a \times b$ factorial in CRD) ปัจจัยที่หนึ่งที่ใช้ในกระบวนการคือ หัวมันสำปะหลังสดบด (A. a_1, a_2) 300 กิโลกรัม และหัวมันสำปะหลังสับบดหมักแบบคลุมก่อน 1 เดือน 300 กิโลกรัม ร่วมกับปัจจัยที่สองคือ มอเตอร์ใบพัดความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที (B. b_1, b_2) 2 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน และติดตั้งปั้มน้ำเพื่อหมุนเวียนน้ำและตะกอนจากบริเวณก้นถังหมักให้ผสมกับอากาศจ่ายกลับไปเข้าถังหมัก โดยเติมจุลินทรีย์ที่เลี้ยงเชื้อจากจากธรรมชาติถึงละ 100 กรัม และให้อาหารเสริมอินทรีย์ถึงหมักละ 10 กิโลกรัม โดยทำซ้ำ 4 ครั้ง ($2^2 \times 4$) และบันทึกค่า อุณหภูมิ (Temp) กรด-ด่าง (pH) และออกซิเจน (DO) จนครบ 30 วัน หลังจากหยุดกระบวนการ 1 เดือน ได้ทำการกรองเพื่อเก็บรวบรวมตะกอนจากบริเวณก้นถังและที่ลอยอยู่บริเวณผิวน้ำแล้วนำไปตากแดด (Solar drying) หลังจากตะกอนที่ตากแห้งแล้วและความชื้นไม่เกิน 10% และนำไปบดให้ละเอียดและนำตัวอย่างส่งไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าร้อยละของโปรตีนหยาบที่ได้จากกระบวนการ เพื่อยืนยันและรับรองผลว่ามีองค์ประกอบของโปรตีน จากข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้แล้วนำมาวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปัจจัยแรกที่ใช้ในกระบวนการ (A ทั้ง a_1 และ a_2) เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนที่ได้จากกระบวนการ ($p = 0.025$) และในส่วนการนำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณโปรตีนที่ได้ในแต่ละกระบวนการรวมถึงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการ (Control) พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.000$) และในส่วนการนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ พบว่าปริมาณธาตุโปรตีนจากทั้ง 4 กระบวนการมีปริมาณสารอาหารอยู่ในระดับที่เหมาะสมสามารถนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์หรือเลี้ยงสัตว์ได้หลายชนิด เช่น สัตว์ใหญ่ เล็ก ปีกและสัตว์น้ำ

คำสำคัญ: กระบวนการหมัก, หัวมันสำปะหลัง, การกวน, โปรตีน

ABSTRACT

This research aims to develop a fermentation process for agricultural products to produce sludge with enough crude protein and to use the analysis results to compare the amount of crude protein obtained from the method used as an ingredient in animal feed. The experiment was carried out with a factorial design and a completely randomized design (CRD) with two factors at two levels each ($a \times b$ factorial in CRD). The factors used in the process are freshly crushed cassava roots (A. a_1, a_2), 300 kilograms, and 300 kilograms of fresh crushed and

fermented cassava roots covered for one month. Use the stirring motor at 100 rpm (B. b1, b2) with the second factor for 2 and 6 hours/day. Install a water pump to circulate water and sediment from the bottom of the fermentation tank to mix with the air sent back into the fermentation tank. Add 100 grams of naturally inoculated microorganisms to each tank and 10 kilograms of organic food supplements. Replicate four replicates ($2^2 \times 4$), and record the temperature (Temp), acid-base (pH), and oxygen (DO) every day until 30 days. After stopping the process for one month, filter to collect sediment from the bottom of the tank or float on the water's surface, then dry it under sunlight (solar drying). After the sediment has dried and the moisture is lower than 10%, grind it thoroughly, take a fine sediment sample, and send it for analysis to a certified laboratory to ascertain and certify the results of any level of protein composition. From the resulting data analyzed. It showed that the first factor used in the process (A, both a1 and a2) was the factor that affected the quantity of crude protein obtained from the process ($p = 0.025$), and in the statistical analysis to compare the average protein content obtained in each process and including those that did not go through the process (control). It was found that there were statistically significant differences ($p = 0.000$). It was found that the protein content from all four processes was at an appropriate level of nutrients and could be mixed into animal feed or fed to many types of animals including large and small animals, poultry, and aquatic animals.

KEYWORDS: Fermentation Process, Cassava Root, Stirred, Protein

1. บทนำ

ปัจจุบันเหตุการณ์ตึงเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณทะเลแดงซึ่งเป็นเส้นทางขนส่งสินค้าที่สำคัญของโลกได้ส่งผลกระทบต่อการเดินทางเรือขนส่ง รวมทั้งสถานการณ์สงคราม ในประเทศอิสราเอล ส่งผลให้การขนส่งสินค้าผ่านทะเลแดงระหว่างทวีปยุโรปแอฟริกา และทวีปเอเชีย มีความยากลำบากในการขนส่งสินค้า ซึ่งส่งผลให้สินค้ามีแนวโน้มขาดตลาด และทำให้ราคาสินค้าปรับตัวสูงขึ้น เช่น ข้าว ข้าวโพด ถั่วเหลือง และ ธัญพืชต่างๆ ซึ่งส่วนมากเป็นธัญพืชที่ใช้สำหรับผลิตอาหารสัตว์ [1] โดยราคาวัตถุดิบอาหารสัตว์ในช่วงปีที่ผ่านมาเฉลี่ย ข้าวโพด 11.91 บาท ปลายุ่น (โปรตีน 60% ขึ้นไป) 53.70 บาท ปลายุ่น (โปรตีน 65% ขึ้นไป) 64.48 บาท กากถั่วเมล็ดนอก 21.26 บาท รำสด 11.46 บาท กากรำสกัดน้ำมัน 10.28 บาท ปลายุ่นข้าว 14.00 บาท และมันเส้น 9.13 บาท/กิโลกรัม [2] และในปีที่ผ่านมา “สงครามระหว่างรัสเซียและยูเครน” เป็นอุปสรรคอย่างมากในการส่งออกธัญพืชสำคัญเพราะทั้งสองประเทศเป็นผู้ส่งออกข้าวสาลีรายใหญ่ของโลก มีการส่งออกรวมกันมากถึง

1 ใน 3 ของโลก และส่งออกข้าวโพดได้รวมกันมากถึง 1 ใน 6 ของโลก สงครามครั้งนี้จึงกระทบทั้งปริมาณผลผลิตและการส่งออก ซึ่งยังไม่มีทีท่าว่าสงครามจะยุติ ทำให้ปี 2566 ระดับราคาพืชวัตถุดิบอยู่ในเกณฑ์สูงเช่นกัน ขณะเดียวกันปัจจัยด้าน “ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ” ก็เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความแปรปรวนของฤดูกาล ทั้งภัยแล้งหรือฝนตกชุกในพื้นที่เพาะปลูกพืชสำคัญของโลก เช่น สหรัฐฯ และบราซิล ทั้งสองประเทศนี้รวมกันผลิตถั่วเหลืองได้ประมาณ 60% ของทั้งโลก และการเกิดเหตุการณ์ฝนไม่ตกตามฤดูกาล ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตของโลกก็ลดน้อยลง ซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ ราคาธัญพืชสูงขึ้น นอกจากนี้ ประเทศจีน ซึ่งเป็นประเทศผู้ผลิตอาหารสัตว์รายใหญ่อันดับต้นๆ ของโลก กำลังฟื้นตัวจากโควิด-19 มีความต้องการปริมาณอาหารสัตว์เพิ่มสูงขึ้นเพื่อใช้เลี้ยงสัตว์ เพิ่มปริมาณเนื้อสัตว์ในประเทศ ทำให้เกิดความต้องการธัญพืชจากทั่วโลกในปริมาณมหาศาลดันราคาขายพืชวัตถุดิบให้สูงขึ้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวนี้มีแนวโน้มชัดเจนว่า ต้นทุนอาหารสัตว์ ที่เกษตรกรผู้เลี้ยงต้องแบกรับภาวะที่เพิ่มขึ้น ในปี 2566 จะขยับสูงขึ้นอีก อย่างน้อย 10% [3] อีกทั้งประเทศเปรู ซึ่งเป็นผู้ผลิตและส่งออกปลาป่นที่เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์รายใหญ่ของโลก มีการประกาศห้ามจับปลาในบางพื้นที่ เนื่องจากพบว่ามีสัตว์น้ำวัยอ่อนทำให้ปริมาณการจับปลาเพื่อส่งออกวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมอาหารสัตว์ลดลง [4]

2. ทบทวนวรรณกรรม

การเกิดสงครามระหว่างยูเครนกับรัสเซียส่งผลกระทบทั้งปริมาณผลผลิตและปริมาณการส่งออกของธัญพืช ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีแนวโน้มโอกาสที่สงครามจะยุติ ส่งผลให้ปี 2566 ราคาพืชวัตถุดิบสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขณะเดียวกันปัจจัยด้าน “ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ” นั้นเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความแปรปรวนของฤดูกาล ทำให้เกิดปัญหาภัยแล้งและฝนตกชุกมากกว่าสภาพอากาศปกติที่เป็นอยู่ สหรัฐฯ และบราซิล เป็นประเทศที่การเพาะปลูกถั่วเหลืองที่สำคัญของโลก โดยทั้งสองประเทศมีความสามารถในการเพาะปลูกและมีผลผลิตถั่วเหลืองจำหน่ายออกสู่ตลาดรวมกันได้มากถึงประมาณ 60% ของทั้งโลก วัตถุดิบปลาป่นถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายและเป็นส่วนผสมของโปรตีนในอาหารสัตว์น้ำมานานหลายทศวรรษ เนื่องจากมีโปรตีนสูงและกรดอะมิโนที่สมดุลที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารอาหารสูง อย่างไรก็ตาม ปลาป่นเป็นทรัพยากรที่มีจำกัดแต่มีความต้องการนำมาใช้เป็นจำนวนมาก แต่ก่อให้เกิดข้อกังวลด้านผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน จึงมีความพยายามหันมาใช้ทางเลือกอื่น ๆ เช่น โปรตีนจากแมลง (แมลงวันลาย) ผลพลอยได้จากสัตว์ (กระดูก ปีก ขน) พืช สาหร่ายขนาดเล็ก สาหร่ายขนาดใหญ่ ชีวมวลจุลินทรีย์ และเศษอาหาร ในบรรดาทางเลือกเหล่านี้ ส่วนผสมโปรตีนจากพืช เช่น กากถั่วเหลือง โปรตีนถั่ว คาโนลาป่น เมล็ดทานตะวัน เมล็ดฝ้ายป่น แคะน้ำมันถั่วลิสง และอาหารจากใบพืช ถือเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนและคุ้มค่า ถึงแม้ว่าต้องมีการปรับเปลี่ยนในกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันเพื่อจัดการกับข้อจำกัดของวัตถุดิบเหล่านี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกากถั่วเหลืองที่

ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีองค์ประกอบทางโภชนาการและการย่อยได้ค่อนข้างดี โดยปัจจุบันเป็นโปรตีนจากพืชที่ใช้มากที่สุดในทดแทนส่วนผสมของปลาป่นในอาหารสัตว์น้ำ แต่การเพิ่มพื้นที่เพาะปลูกถั่วเหลืองมากขึ้นก็มีข้อเสียที่เพิ่มมากขึ้นตามมาด้วย คือ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการพังทลายของดินที่เกิดจากการตัดไม้ทำลายป่าเพื่อทำเป็นพื้นที่เพาะปลูกและการเพิ่มการผลิตถั่วเหลืองที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้น เพื่อวัตถุประสงค์ของความมั่นคงด้านอาหารที่ยั่งยืน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมองข้ามการใช้ถั่วเหลืองในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์น้ำ และแหล่งโปรตีนทางเลือกที่อุดมสมบูรณ์ที่ไม่ค่อยมีการนำไปใช้ คือ ไบโม่สำหรับปลา โดยไบโม่สำหรับปลานี้สามารถนำไปใช้ในการผลิตอาหารสัตว์น้ำได้ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเพาะปลูกมันสำปะหลัง มันสำปะหลังเป็นพืชที่ใช้เวลาประมาณหนึ่งปีที่จะให้ผลผลิตหัว ไบโม่สำหรับปลาสดในปริมาณที่มีนัยสำคัญซึ่งอาจมีปริมาณมากเท่ากับผลผลิตน้ำหนักหัวมันสำปะหลัง ไบโม่สำหรับปลาเหล่านี้มักจะถูกล่อยทิ้งไว้บนพื้นที่เพาะปลูกหลังการเก็บเกี่ยวหัวมันผลผลิตมันสำปะหลัง [5]

ปลาป่นถือเป็นแหล่งโปรตีนในอาหารที่มีมาตรฐานดีที่สุดในปลาหลายชนิดการผลิตขึ้นอยู่กับปลาทะเลตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม การผลิตปลาป่นในปัจจุบันนั้นถือว่ายังไม่ยั่งยืน ทั้งด้านสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ อีกทั้งยังมีแรงกดดันทางด้านสังคมและเศรษฐกิจต่ออุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ในการค้นพบโปรตีนทางเลือกอื่นนั้น ช่วยให้การใช้วัตถุดิบจากปลาป่นลดลง แต่การใช้โปรตีนจากพืชในส่วนผสมอาหารสัตว์ยังมีข้อจำกัดในการนำมาใช้สำหรับปลาที่กินเนื้อเป็นอาหารบางชนิดและสัตว์น้ำ เช่น กุ้ง กุ้ง ปู มีงานวิจัยจำนวนมากที่ยืนยันว่าโปรตีนจากพืชสามารถทดแทนโปรตีนจากปลาป่นได้ แต่จะต้องมีการใช้ส่วนผสมใหม่ที่เหมาะสมและเติมธาตุอาหารเสริมเข้าช่วย เช่น เอนไซม์จากภายนอก สารประกอบเพื่อทำปฏิกิริยาทางชีวภาพ และแร่ธาตุปริมาณน้อยที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพบางชนิด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นแนวทางในการลดปริมาณปลาป่นในส่วนผสมอาหารสัตว์ให้ลดลงหรือไม่เลยและจะต้องมีการคำนวณสูตรอย่างระมัดระวัง [6] ส่วนหัวมันสำปะหลังเป็นแหล่งเก็บแป้งที่มีคาร์โบไฮเดรตที่ดีเยี่ยม แต่มีข้อจำกัดสำหรับการบริโภคของมนุษย์หรือสัตว์ คือ ปริมาณไซยาโนเจนกลูโคไซด์สูง สารไซยาไนด์ (HCN) ส่วนใหญ่จะถูกกำจัดออกด้วยการใช้วิธีการแบบดั้งเดิม ได้แก่ การใช้ตะแกรงร่อน การหมัก การต้ม หรือทำให้แห้ง [7] องค์ประกอบส่วนใหญ่ในหัวมันสำปะหลังนอกจากน้ำแล้ว ยังมีแป้งอยู่ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 70 - 80 จึงถือว่ามันสำปะหลังเป็นพืชที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานกับคนและสัตว์ได้ดีที่สุด นอกจากนี้ การนำหัวมันสำปะหลังไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมจะต้องทำให้แห้งเพื่อลดความชื้นก่อน เช่น อุตสาหกรรมมันเส้น อุตสาหกรรมมันอัดเม็ด หรือการสกัดเฉพาะส่วนของแป้งออกจากหัวมันสำปะหลัง โดยเมื่อทำให้หัวมันสำปะหลังแห้งแล้ว ความชื้นจะมีปริมาณคงเหลือเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ คาร์โบไฮเดรต 70 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 2.63 เปอร์เซ็นต์ และไขมัน 0.51 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ หัวมันสำปะหลังมีปริมาณโปรตีนและไขมันต่ำกว่าธัญพืชชนิดอื่น หากใช้

ผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังเพื่อทดแทนธัญพืช จะต้องเพิ่มปริมาณโปรตีนในสูตรอาหาร [8] ซึ่งโดยรวมในหัวมันสำปะหลังส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตส่วนโปรตีนมีในปริมาณที่ต่ำ ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพทางโภชนาการ ด้วยการพัฒนาการใช้กลยุทธ์ทางเทคโนโลยีชีวภาพหลายอย่าง เพื่อให้ได้ปริมาณโปรตีนจากหัวมันสำปะหลังที่เพิ่มสูงขึ้น [9]

จากสถิติการนำเข้าอาหารสัตว์เข้ามาในประเทศไทยปี 2566 ประเทศไทยนำเข้าวัตถุดิบอาหารสัตว์ อาหารเสริมสำหรับ ผลิตภัณฑ์นมสำหรับสัตว์ วัตถุดิบเติม วัตถุดิบผสมแล้ว อาหารสัตว์เลี้ยง และอื่นๆ รวมทั้งสิ้น 9,583,480.36 ล้านบาท เป็นมูลค่ารวม 168,161.30 ล้านบาท การนำเข้าอาหารสัตว์ส่วนใหญ่จะเป็นประเภทวัตถุดิบผลิตอาหารสัตว์จากประเทศบราซิล ถึง 3,120,814.73 ล้านบาท คิดเป็นมูลค่า 60,003.77 ล้านบาท และสถิติการส่งออกอาหารสัตว์ในปีเดียวกันประเภทอาหารสัตว์เลี้ยง (Pet food) อาหารปศุสัตว์ ทั้งหมดรวมกัน 1,102,102.43 ล้านบาท รวมมูลค่า 97,097.47 ล้านบาท ซึ่งส่วนใหญ่ส่งไปยังประเทศสหรัฐอเมริกา ทั้งอาหารสัตว์และอาหารปศุสัตว์ ปริมาณรวมกัน 112,071.04 ล้านบาท มูลค่า 21,285.74 ล้านบาท และส่งออกไปยังประเทศญี่ปุ่น 136,793.00 ล้านบาท รวมมูลค่า 13,099.85 ล้านบาท [10]

จากปัญหาการราคาอาหารสัตว์ที่สูงขึ้นเนื่องจากมีต้นทุนมาจากวัตถุดิบที่นำมาผลิตปรับตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การผลิตไข่ไก่มีต้นทุนต่อฟองสูงถึง 3.45-3.50 บาท สูงกว่าช่วงปกติถึง 30% ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าเป็นผลพวงจากราคาธัญพืชวัตถุดิบอาหารสัตว์พุ่งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะกากถั่วเหลืองและข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญของส่วนผสมอาหารเลี้ยงไก่ไข่ โดยเกษตรกรผู้เลี้ยงไก่ไข่มีข้อเรียกร้องให้รัฐเร่งหาทางแก้ไขและให้ราคาขายผลผลิตสอดคล้องกับต้นทุนที่แท้จริง เพื่อให้เกษตรกรพอมีกำไรและอยู่ได้ เนื่องจากยังมีต้นทุนอื่นๆ ที่ล้วนขยับสูงขึ้นตาม ทั้งพลังงาน ก๊าซ น้ำมันและค่าไฟฟ้า รวมถึงค่าจ้างแรงงานที่มีความจำเป็นต้องใช้ในการประกอบอาชีพเลี้ยงไก่ไข่ [11] ปัญหาการตัดไม้ทำลายป่าเป็นการทำลายสิ่งแวดล้อมเพื่อเพาะปลูกและเพิ่มผลผลิตพืชที่ให้โปรตีนหลายประเภท เพื่อใช้ทดแทนโปรตีนจากปลาป่นที่ได้จากปลาทะเลตามธรรมชาติ อีกทั้งเพื่อความมั่นคงทางด้านอาหารและมีความยั่งยืนสูงสุด การนำวัสดุเหลือใช้หรือผลผลิตทางการเกษตรบางชนิดที่ประเทศไทยมีผลผลิตและส่งออกเป็นจำนวนหลายล้านตันในแต่ละปี อย่างเช่นมันสำปะหลังมาใช้ จึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งที่จะแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นได้ โดยทั่วไปมันสำปะหลังที่นำมาใช้เลี้ยงสัตว์ จะอยู่ในรูปของมันเส้น การทำมันเส้นจะต้องนำหัวมันสำปะหลังสดมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วผึ่งแดดให้แห้งประมาณ 3-5 วัน คุณสมบัติแห้งประมาณ 75-80 เปอร์เซ็นต์ มีพลังงานใกล้เคียงกับข้าวโพด มีโปรตีนต่ำประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ และข้อจำกัดในการใช้คือ ไม่สามารถใช้มันสำปะหลังสดไปเลี้ยงสัตว์ได้โดยตรง เนื่องจากมีสารพิษคือ กรดไฮโดรไซยานิก (ยกเว้นบางสายพันธุ์) ต้องนำไปผ่านกระบวนการลดสารพิษลงก่อน ด้วยการทำเป็นมันเส้น หรือมันหมัก [12] อย่างไรก็ตาม หัวมันสำปะหลังมีอัตราส่วนโปรตีนต่อพลังงานต่ำที่สุดในบรรดาพืชที่สำคัญหลัก ๆ ของโลก นอกจากนี้ อาหารที่มีมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบโดยทั่วไปยังให้ธาตุ

เหล็ก สังกะสี วิตามินเอ และวิตามินอี น้อยกว่า 10-20% ของปริมาณที่ต้องการ โดยรวมต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่มากขึ้น เช่น การใช้เชื้อจุลินทรีย์ที่มีระดับสารอาหารเพิ่มขึ้น [13] ดังนั้นการจะนำไปใช้จะต้องนำหัวมันสำปะหลังมาผ่านกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพที่เหมาะสมก่อนเพื่อให้ได้สารอาหารในระดับที่เพียงพอและมีประโยชน์ต่อการนำไปใช้เลี้ยงสัตว์หรือเป็นส่วนผสมอาหารสัตว์ร่วมกับวัตถุดิบอย่างอื่น

กระบวนการหมักแบบกวนช่วยให้อาหารจุลินทรีย์และอากาศคลุกเคล้ากันได้อย่างทั่วถึง ระบบการกวนที่มีประสิทธิภาพจะทำให้การละลายของออกซิเจนในอาหารเหลวมีค่าสูง และมีปริมาณเท่ากันทุกๆ จุดในถังหมัก การกวนอาศัยแกนกวนต่อกับใบพัด เรียกว่า Impeller ช่วยตีฟองอากาศให้มีขนาดเล็กกระจายไปยังส่วนต่างๆ และมี baffle ช่วยป้องกันการไหลวนกลับของน้ำในถังหมัก [14] อุปกรณ์การกวนเป็นส่วนหนึ่งของถังปฏิกรณ์หมัก มีหลายประเภทสำหรับให้ปฏิกิริยาในการหมัก สิ่งที่พบบ่อยที่สุดคือถังหมักแบบถังกวนหรือฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Reactor) ตัวกวนส่วนใหญ่จะมีลักษณะพิเศษคือการมีใบพัดกวนหนึ่งตัวหรือมากกว่าติดตั้งไว้กับเพลากลาง โดยปกติแล้วภาชนะเหล่านี้จะมีแผ่นกั้น เพื่อเพิ่มอัตราหมุนเวียนของของไหลและมีสปาร์เจอร์ที่อยู่ด้านล่างของถัง ซึ่งเครื่องกวนมีหลายประเภท ขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกลางในการหมักและงานหลักที่ระบบกวนต้องการ หากงานหลักคือการกระจายและทำลายฟองก๊าซ จะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของออกซิเจนสูง โดยการใช้เครื่องกวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก อย่างเช่นของ Ruston (กังหัน) การกวนสามารถหมุนด้วยความเร็วรอบสูงถ้าวัสดุหมักมีความหนืดค่อนข้างต่ำ แต่สำหรับวัสดุหมักที่มีความหนืดสูงและมีความเข้มข้นของเซลล์สูงกว่าจะต้องใช้เครื่องกวนขนาดใหญ่ที่มีความเร็วรอบต่ำ เช่น เครื่องกวนไฮโดรฟอยล์ ตามหลักการแล้วสามารถสันนิษฐานได้ว่าในถังหมักที่ถูกกวนจะผสมกันอย่างลงตัว กล่าวคือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น จุลินทรีย์ และผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอในทุกจุดของถังหมัก [15] ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบถังกวน (Stirred Tank Bioreactor) เป็นถังปฏิกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะกระบวนการหมักที่ให้อากาศ เพราะการดำเนินการได้สะดวก ต้นทุนต่ำ และมีประสิทธิภาพดีพอสมควร [16]

การวิเคราะห์ข้อมูล (analysis of data) เป็นการประมวลผลข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้มา ตามวัตถุประสงค์ สมมติฐาน และคำถามการวิจัยที่ตั้งไว้ เช่น การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยประชากร 2 กลุ่มโดยใช้ Z หรือ t หรือการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากรที่มากกว่า 2 กลุ่ม โดยใช้การทดสอบความแปรปรวนสถิติทดสอบคือ F ใช้ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ และใช้ X² ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล 2 ชุดที่เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ โดยใช้การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ ทดสอบอิทธิพลและพยากรณ์ โดยใช้การวิเคราะห์ความถดถอย หรืออาจจะใช้สถิติขั้นสูง เช่น MANOVA CANONICAL FACTOR-ANALYSIS DISCREMINAN การประมวลผลสามารถประมวลด้วยมือหรือเครื่อง

คอมพิวเตอร์ได้ โดยในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่สามารถนำมาวิเคราะห์ข้อมูล เช่น โปรแกรมสำเร็จ SPSS for Windows, MINITAB, และ SAS ที่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลรวมถึงการประมวลผลได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ [17]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการทดลองการหมักหัวมันสำปะหลังที่องค์ประกอบของโปรตีนที่น้อย ให้มีประสิทธิภาพส่งผลต่อปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นและเพียงพอที่จะนำผลผลิตจากกระบวนการหมักไปใช้ประโยชน์ในการเลี้ยงสัตว์

3. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการสร้างกระบวนการทดลอง เพื่อให้ได้กระบวนการในการหมักผลผลิตทางการเกษตรที่ดีและมีประสิทธิภาพ ไม่มีกลิ่นเน่าเสียจากวัสดุหมักและอาหารเสริมที่เติมลงในถังหมักที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์ และที่สำคัญคือ มีความสามารถในการย่อยสลายวัสดุที่นำมาหมัก และได้ตะกอนที่มีธาตุอาหารที่จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมอาหารสัตว์หรือใช้เลี้ยงสัตว์

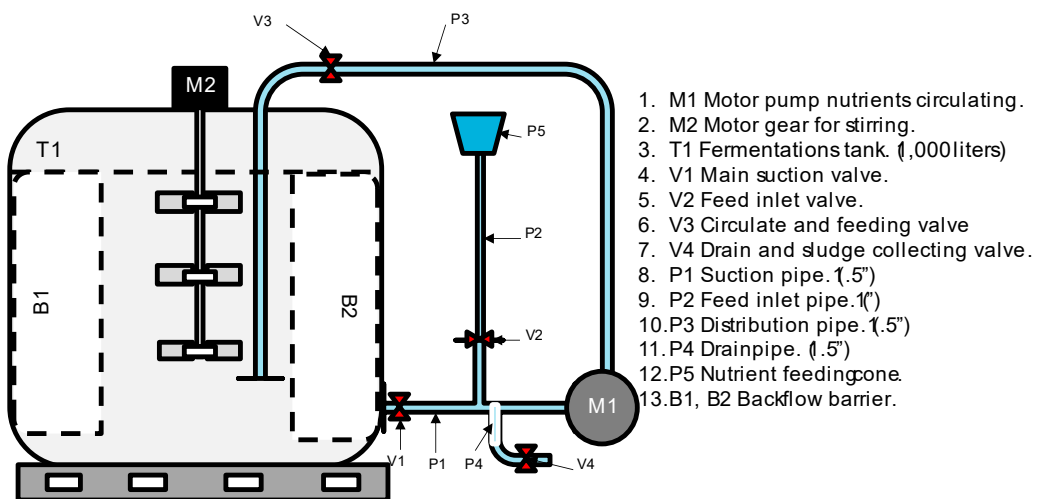
การวัดค่าพารามิเตอร์ในถังหมัก ใช้เครื่องวัด YSI Professional Plus ซึ่งเป็นแบบโมบายที่ใช้โพรบวัดด้วยการจุ่มลงในน้ำ สามารถวัดอุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณออกซิเจน ความชื้น และค่าความเค็มในน้ำได้ หลังจากทำการเริ่มการหมักโดยเติมปุ๋ยหมักเหี่ยวในถัง (ทำงานตลอดวัน) รวมถึงเติมมอเตอร์กวนตามระยะเวลาที่ตั้งไว้และเติมวัสดุหมัก น้ำ จุลินทรีย์ ปากน้ำตาล อาหารเสริม ซึ่งในกรณีบางวันที่ค่าวัดระดับออกซิเจน (DO) ต่ำกว่า 2 ml/l จะไม่มีการเติมปากน้ำตาลและอาหารเสริมต้องรอจนกว่าค่าวัดสูงกว่า 2 ml/l จึงทำการเติมลงไป (Feed) ซึ่งการเติมปากน้ำตาลและอาหารเสริมจะเฉลี่ยเติม 30 ครั้ง จากปริมาณที่ต้องใช้ทั้งหมดในแต่ละกระบวนการหมัก (หมัก 30 วัน) โดยการวัดค่าวัดต่าง ๆ ในถังหมักเริ่มตั้งแต่วันที่เริ่มกระบวนการหมักและจดบันทึกค่าวัดที่ได้ในแต่ละวันจนครบ 30 วัน เพื่อนำข้อมูลที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากแต่ละถังหมัก ส่วนถังหมักควบคุม (control) ทำการวัดค่าต่าง ๆ เช่นเดียวกับถังหมักในกระบวนการ แต่จะเติมวัสดุหมัก น้ำ จุลินทรีย์ รวมทั้งปากน้ำตาล และอาหารเสริมลงไปในถังหมักทั้งหมดในวันแรกที่เริ่มหมัก

3.1 วัตถุดิบและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วิธีการดำเนินการวิจัยในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองโดยใช้กระบวนการหมักแบบกวนผสมอากาศในน้ำหมักเพื่อให้ได้ตะกอนจากการย่อยสลายของวัสดุหมักที่ใช้ในกระบวนการและนำตะกอนไปตากแห้งแล้วนำไปบดเพื่อวิเคราะห์หาค่าปริมาณโปรตีน โดยมีปัจจัยหลักในการทดลองสองปัจจัยได้แก่ ปัจจัยที่หนึ่งใช้ในการทดลอง คือ ใช้หัวมันสำปะหลังสดสับหรือบด และหัวมันสำปะหลังบดหมักแบบคลุมก่อนนำไปหมักในถัง ใช้หัวมันสำปะหลังที่มีอายุตั้งแต่ 10-12 เดือน

ขึ้นไป จำนวน 300 กิโลกรัม และปัจจัยที่สองใช้ในการทดลอง คือ ไซมอเตอร์ไบพัดกวน กวนน้ำให้ผสมกับอากาศเป็นเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน และ ไซมอเตอร์ไบพัดกวน กวนน้ำให้ผสมกับอากาศเป็นเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ในส่วนของจุลินทรีย์ใช้เป็นจุลินทรีย์ที่ได้จากการเลี้ยงต่อเชื้อจากธรรมชาติโดยนำเศษใบไม้ที่ย่อยสลายทับถมบริเวณจอมปลวก มาเลี้ยงเชื้อด้วยแ่งจากหัวมันสำปะหลังและกากน้ำตาล (100 กรัม) เติมจุลินทรีย์เหมือนกันในทุกกระบวนการ ธาตุอาหารที่เดิมเป็นธาตุอาหารเสริมจากอินทรีย์วัตถุถึงละ 10 กิโลกรัม อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการหมักแบบกวนน้ำผสมอากาศประกอบไปด้วย 1) ถังหมักขนาด 1,000 ลิตร 4 ถัง 2) มอเตอร์กวนและมอเตอร์ปั๊มหมุนเวียนน้ำผสมกับอากาศ (DC 24 V) อย่างละ 4 ชุด และ 3) อุปกรณ์ต่อระบบท่อน้ำและระบบท่อเติมธาตุอาหาร

ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการหมักแบบกวนน้ำเพื่อผสมอากาศกับน้ำหมักสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยรายละเอียดของขั้นตอนการทำงานแสดงได้ดังต่อไปนี้ 1) เปิดมอเตอร์ (M2) เพื่อหมุนไบพัดในถังหมักให้อากาศเคล้าผสมกับน้ำให้มากขึ้นและมีความเสถียรภาพคงที่ในน้ำหมักให้นานที่สุด 2) เปิดมอเตอร์ (M1) เพื่อให้ระบบสูบน้ำทำงานและสูบน้ำเพื่อหมุนเวียนน้ำจากบริเวณส่วนล่างของถังหมัก (T1) ผ่านท่อ (P1) ขนาด 1.5 นิ้ว โดยเปิดวาล์ว (V1) ไว้ 3) ให้ปรับวาล์ว (V2) บริเวณจุดเชื่อมต่อกับท่อทางดูดของปั๊มน้ำเพื่อปรับปริมาณของอากาศที่เข้ามาผสมกับน้ำจากท่อ (P2) ขนาด 1 นิ้ว ในขั้นตอนนี้เติมอาหารเสริมเข้าไปพร้อมกัน 4) เปิดวาล์ว (V3) เพื่อเพิ่มออกซิเจนเข้าผสมกับน้ำร่วมกับอาหารเสริมที่ปั๊มผ่านท่อจ่ายอากาศลงถัง (P3) ขนาด 1.5 นิ้ว เมื่อน้ำไหลจากแรงดูดของปั๊มผ่านตรงจุดที่เชื่อมต่อ น้ำที่มีความเร็วสูงส่งผลทำให้เกิดสุญญากาศ โดยมอเตอร์กวนในแต่ละถังหมักและปั๊มน้ำจะทำงานจนกว่าจะหยุดการทำงาน ส่วนท่อ (P4) ขนาด 1.5 นิ้ว และวาล์ว (V4) ติดตั้งไว้เพื่อใช้สำหรับถ่ายเอาน้ำหมักและกรองตะกอนออกจากถังหมัก (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 การออกแบบกระบวนการหมักแบบกวน

3.2 ออกแบบการทดลองกระบวนการ

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการทดลองแบบแฟกทอเรียลที่ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) โดยใช้ 2 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ และทำซ้ำเป็นจำนวน 4 ครั้ง โดยวัตถุดิบ (ปัจจัย) ที่ใช้คือหัวมันสำปะหลังสดสับหรือบด (A) ปริมาณที่ใช้ 300 กก./ถัง (a_1) และหัวหัวมันสำปะหลังสับหรือบดแล้วนำไปหมักแบบคลุ่มก่อน 300 (a_2) กก. /ถัง ร่วมกับใช้หมอดอร์กวน (B) ระยะเวลา 2 (b_1) และ 6 (b_2) ชม. /วัน

โดยแบ่งเป็น 4 รูปแบบการทดลองได้แก่

รูปแบบการทดลองที่ 1 ใช้หัวมันสำปะหลังสดที่สับหรือบด 300 กก. กากน้ำตาล 100 ลิตร น้ำ 200 ลิตร [18] และเติมจุลินทรีย์จากธรรมชาติ 100 กรัม เติมหาตุอาหารเสริมจุลินทรีย์ 10 กิโลกรัม ร่วมกับใช้หมอดอร์กวนน้ำในถังหมัก 2 ชั่วโมง/วัน

รูปแบบการทดลองที่ 2 ใช้หัวมันสำปะหลังสดที่สับหรือบด 300 กก. กากน้ำตาล 100 ลิตร น้ำ 200 ลิตร และเติมจุลินทรีย์จากธรรมชาติ 100 กรัม เติมหาตุอาหารเสริมจุลินทรีย์ 10 กิโลกรัม ร่วมกับใช้หมอดอร์กวนน้ำในถังหมัก 6 ชั่วโมง/วัน

รูปแบบการทดลองที่ 3 ใช้หัวมันสำปะหลังสับหรือบดและหมักคลุ่มก่อน 300 กก. กากน้ำตาล 100 ลิตร น้ำ 200 ลิตร และเติมจุลินทรีย์จากธรรมชาติ 100 กรัม เติมหาตุอาหารเสริมจุลินทรีย์ 10 กิโลกรัม ร่วมกับใช้หมอดอร์กวนน้ำในถังหมัก 2 ชั่วโมง/วัน

รูปแบบการทดลองที่ 4 ใช้หัวมันสำปะหลังสับหรือบดและหมักคลุ่มก่อน 300 กก. กากน้ำตาล 100 ลิตร น้ำ 200 ลิตร และเติมจุลินทรีย์จากธรรมชาติ 100 กรัม เติมหาตุอาหารเสริมจุลินทรีย์ 10 กิโลกรัม ร่วมกับใช้หมอดอร์กวนน้ำในถังหมัก 6 ชั่วโมง/วัน และทุกกระบวนการเติมหาตุอาหารเสริม ถึงละ 10 กก. โดยมีทรีทเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment Combinations) ที่เป็นการจัดกลุ่มการทดลองที่ใช้ทั้งสองปัจจัย (2 factor) โดยแต่ละปัจจัยมีสองระดับ (2 level) การทดลองนี้เป็นแบบแฟกทอเรียลขนาด 2×2 ที่มีการรวมกันของระดับต่างๆ ของสองปัจจัย แสดงได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ทรีทเมนต์คอมบิเนชัน

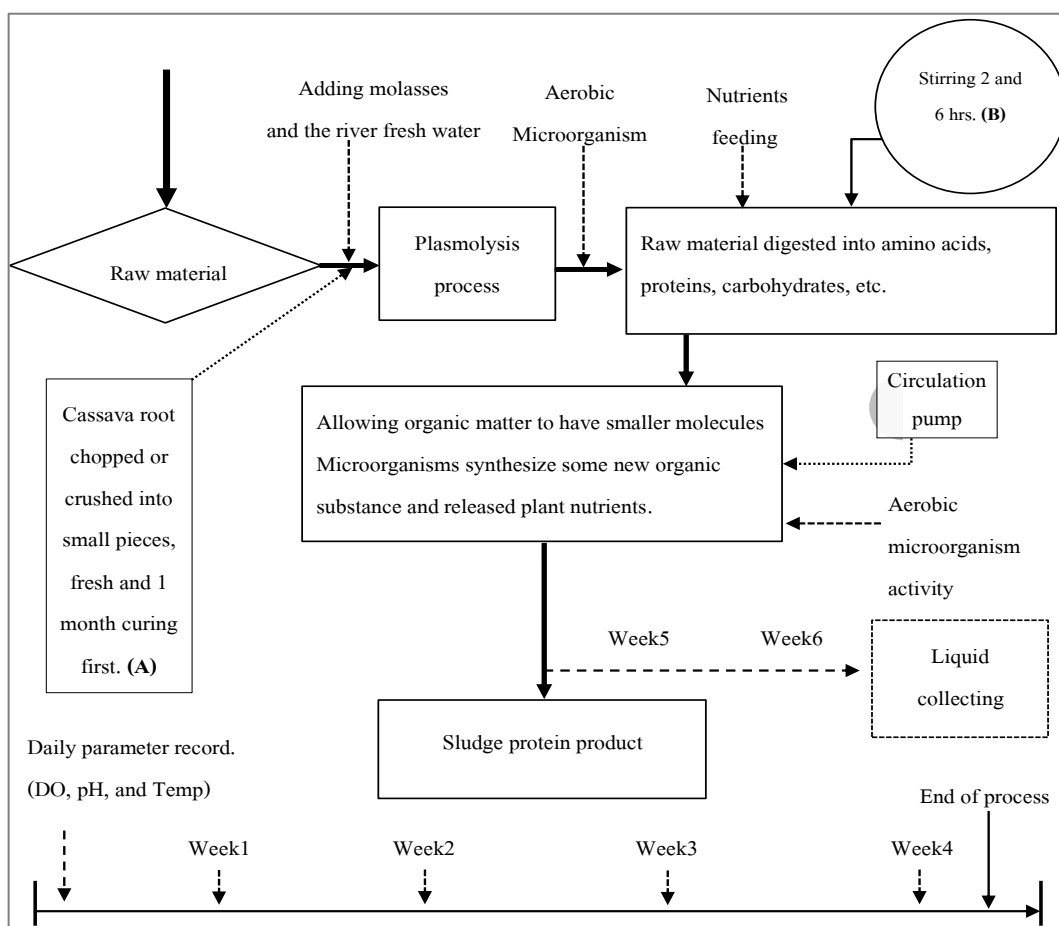
A (Cassava root)	B (Stirred)	
	b_1 (2 hrs. /day)	b_2 (6 hrs. /day)
a_1 (300 kg) fresh	a_1b_1	a_2b_1
a_2 (300 kg) pre-curing	a_1b_2	a_2b_2

จากการสุ่ม (CRD) เพื่อวางแผนการทดลองที่จะนำปัจจัยมาใช้ในการกระบวนการหมักจากทั้ง 2 ปัจจัยที่เป็นทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ คือหัวมันสำปะหลังแบบสดและแบบที่บ่มก่อนนำมาหมัก (A. a1, a2) กับระยะเวลาการกวนในถังหมักคือ 2 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน (B. b1, b2) โดยทำการทดลอง 4 กระบวนการหมัก ทำซ้ำ 4 ครั้ง รวมจำนวนการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง ($2^2 \times 4$) ซึ่งสามารถวางแผนการทดลองกระบวนการหมักได้ดังต่อไปนี้

D หัวมันบ่ม กวน 6 ชม. A หัวมันสด กวน 2 ชม. B หัวมันสด กวน 6 ชม. B หัวมันสด กวน 6 ชม. B หัวมันสด กวน 6 ชม. C หัวมันบ่ม กวน 2 ชม. A หัวมันสด กวน 2 ชม. C หัวมันบ่ม กวน 2 ชม. A หัวมันสด กวน 2 ชม. A หัวมันสด กวน 2 ชม. D หัวมันบ่ม กวน 6 ชม. C หัวมันบ่ม กวน 2 ชม. B หัวมันสด กวน 6 ชม. C หัวมันบ่ม กวน 2 ชม. D หัวมันบ่ม กวน 6 ชม. D หัวมันบ่ม กวน 6 ชม.

3.3 กระบวนการหมัก

ในกระบวนการพลาสโมไลซิส (plasmolysis) เป็นการเติมน้ำตาลเพื่อดึงน้ำเลี้ยงออกจากเซลล์ของพืชหรือสัตว์ หรืออาจใช้เกลือเพื่อช่วยในกระบวนการพลาสโมไลซิส แต่ต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสม ส่วนจุลินทรีย์จะเข้าย่อยสลายเศษพืชหรือสัตว์ ทำให้สารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ถูกย่อยออกมา มีโมเลกุลที่เล็กลง เพราะวัสดุอินทรีย์สารประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ซับซ้อน และอาจจะมีการสร้างสารอินทรีย์ชนิดใหม่ให้เกิดขึ้นด้วยจุลินทรีย์ด้วยกัน กระบวนการย่อยสลายในขั้นตอนนี้ ทำให้มีการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชออกมา ซึ่งในกระบวนการหมักนอกจะเติมกากน้ำตาลแล้วอาจต้องมีการเติมเชื้อจุลินทรีย์ลงไปเพิ่ม [19] เมื่อจุลินทรีย์ปล่อยธาตุอาหารพืชออกมา อย่างเช่น ธาตุไนโตรเจน โดยปริมาณธาตุไนโตรเจนร้อยละ 1 เมื่อเปลี่ยนเป็นปริมาณโปรตีนแล้ว จะได้เท่ากับร้อยละ 6.25 [20] จากนั้นเมื่อหยุดกระบวนการได้ 1 เดือนแล้วทำการกรองเอาตะกอนแยกออกจากน้ำแล้วนำตะกอนจากกระบวนการที่ได้ไปตากแดดให้แห้ง แล้วนำมาบดให้ละเอียด และส่งตัวอย่างไปตรวจเพื่อวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณโปรตีนในตะกอนแห้งที่ได้จากกระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กระบวนการหมัก

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีการวิเคราะห์ผลจากการออกแบบการทดลองว่าปัจจัยที่ใช้ในการทดลองปัจจัยใดเป็นปัจจัยส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ได้ (DOE analysis) โดยมี 2 ปัจจัยที่จะนำมาวิเคราะห์หาผลลัพธ์ คือ หัวมันสำปะหลังสดสับหรือบด หัวมันสำปะหลังสับหรือบดหมักแบบคลุ่มก่อน (Quality) กับการกวนในถังหมักเป็นเวลา 2 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน (Quantity) จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพและเคมีในแต่ละกระบวนการ ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ระหว่างกระบวนการที่ 1 (BP-1) กระบวนการที่ 2 (BP-2) กระบวนการที่ 3 (BP-3) และ กระบวนการที่ 4 (BP-4) กับกระบวนการควบคุม (C) โดยกำหนดให้ค่าความความเชื่อมั่นไว้ที่ระดับร้อยละ 95 และเมื่อได้ค่าความเชื่อมั่นที่ต้องการแล้วนำปริมาณร้อยละของโปรตีนที่ได้ไปทำการเปรียบเทียบว่าสามารถให้เป็นอาหารสัตว์ชนิดใดได้

4. ผลการทดลอง

จากการจดบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งค่าอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ค่ากรด-ด่าง (pH) และค่าออกซิเจนละลาย (DO) จากถังหมักของกระบวนการหมักมันสำปะหลังในถังหมักขนาด 1,000 ลิตร ทำการหมักโดยใช้วัสดุหมักทั้งสดและหมักแบบคลุ่มก่อนอย่างละ 300 kg ร่วมกับการกวนเป็นเวลา 2 และ 6 ชั่วโมงต่อวัน ใช้เวลาในการหมัก 30 วัน แสดงดังนี้ และค่าเฉลี่ยค่าพารามิเตอร์ ตามตารางที่ 2

4.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อกิจกรรมของแบคทีเรียและการไฮโดรไลซิสของสารตั้งต้น เนื่องจากการหมักจะเกิดความร้อนระหว่างการหมัก จึงต้องรักษาอุณหภูมิให้อยู่ที่ 30-35 องศาเซลเซียส ในบางครั้งมีเปิดฝาถังหมักเพื่อให้อากาศถ่ายเทได้ดีขึ้น หรือเปิดวาล์วปรับอากาศเข้าปั๊มน้ำให้หมุนเวียนลงถังหมักให้มากขึ้น และอุณหภูมิที่ได้จากการบันทึกในแต่ละวันของแต่ละถังหมักในกระบวนการหมักหั่วมันสำปะหลังอยู่ในระดับอุณหภูมิปานกลาง ($25 - 40^{\circ}\text{C}$) และค่าเฉลี่ยของแต่ละกระบวนการหมักคือ ถังหมักควบคุม (C) 32.8°C ถังกระบวนการหมักที่ 1 (BP-1) 30.0°C ถังกระบวนการหมักที่ 2 (BP-2) 29.2°C ถังกระบวนการหมักที่ 3 (BP-3) 29.1°C และถังกระบวนการหมักที่ 4 (BP-4) 28.4°C

4.2 ค่ากรด-ด่าง (pH)

จากการเริ่มกระบวนการหมักในวันแรก พบว่าถังหมักกระบวนการควบคุม (C) มีค่า pH ที่ต่ำ และมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งถือว่าเป็นกรดจัด และค่า pH ของถังกระบวนการหมักที่ 1 (BP-1) และถังกระบวนการหมักที่ 2 (BP-2) ที่ใช้วัสดุหมักเป็นหั่วมันสำปะหลังสดสับและบด มีค่า pH ที่เริ่มลดลงเรื่อย ๆ เป็นการบ่งชี้ว่าวัสดุหมักในถังมีความเป็นกรดมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ให้เป็นกรดอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้และเมื่อการหมักผ่านไป 1 อาทิตย์ ค่า pH มีค่าที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ส่วนเมื่อเริ่มหมักถังกระบวนการหมักที่ 3 และถังกระบวนการหมักที่ 4 ที่ใช้วัสดุหมักเป็นหั่วมันสำปะหลังสับและบดแล้วหมักแบบคลุ่มไว้ก่อน 1 เดือน มีค่า pH ที่เป็นกลางในระดับ 6.9 และจะสูงขึ้นอีกไม่มากนัก ชี้ให้เห็นว่าวัสดุหมักในถังมีความเป็นด่างอ่อน ๆ โดยค่า pH เฉลี่ยของแต่ละกระบวนการหมักมีดังนี้ ถังหมักควบคุม (control) เท่ากับ 4.2 ถังกระบวนการหมักที่ 1 เท่ากับ 5.3 ถังกระบวนการหมักที่ 2 เท่ากับ 5.9 ถังกระบวนการหมักที่ 3 เท่ากับ 6.4 และถังกระบวนการหมักที่ 4 เท่ากับ 6.9

4.3 ค่า DO (Dissolved Oxygen)

DO มีผลโดยตรงต่อกลุ่มจุลินทรีย์ย่อยสลายวัสดุหมักที่ใช้ออกซิเจนเป็นหลักและออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหมักมีความสำคัญต่อการดำรงชีพและการเจริญเติบโตขยายเซลล์ของกลุ่มจุลินทรีย์ ค่าของปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหมักของกระบวนการควบคุม (control) เฉลี่ย 0.7 mg/l น้ำหมักในถังหมักมีลักษณะเน่าเสียและส่งกลิ่นเน่าเหม็นเปรี้ยว รวมทั้งวัสดุที่ใช้หมักไม่ย่อยสลาย และปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหมักของกระบวนการที่ 1 เฉลี่ย 3.5 mg/l น้ำหมักในถังเป็นสีขาวขุ่นอมน้ำตาลมีกลิ่นเปรี้ยวเพียงเล็กน้อยและการย่อยสลายของวัสดุหมักดีพอสมควรและมีฟองบนพื้นผิวเล็กน้อย ค่าของปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหมักของกระบวนการที่ 2 เฉลี่ย 4.1 mg/l และมีลักษณะเหมือนกันกับน้ำหมักในถังหมักกระบวนการที่ 1 ส่วนค่าของปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหมักของกระบวนการที่ 3 เฉลี่ย 4.3 mg/l น้ำในถังหมักเป็นสีดำนน้ำตาลไม่มีกลิ่นและเกิดฟองบนผิวน้ำ และค่าของปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหมักของกระบวนการที่ 4 เฉลี่ย 4.4 mg/l มีลักษณะของน้ำหมักในถังหมักเช่นเดียวกันกับในถังหมักของกระบวนการที่ 3 โดยค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยของแต่ละกระบวนการ ดังแสดงได้ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ในแต่ละกระบวนการ

Reactor tank	Control	BP-1	BP-2	BP-3	BP-4
อุณหภูมิ (°C)	32.8 ±1	30 ±0.7	29.2 ±0.8	29.1 ±0.4	28.4 ±0.8
ค่ากรด-ด่าง (pH)	4.2 ±0.6	5.3 ±0.2	5.9 ±0.3	6.3±0.4	6.9 ±0.4
ออกซิเจนละลาย (mg/l)	0.7 ±0.2	3.5 ±0.3	4±0.1	4.2±0.2	4.3±0.2

4.4 ปริมาณของตะกอน

ได้จากการนำน้ำจากถังหมักแบบกวนมาตกตะกอนในกรวยอิมฮอฟฟ์ (Imhoff Cone) ขนาด 1,000 มิลลิลิตร เป็นระยะเวลา 30 นาที (SV30) มีค่าปริมาณที่ตกตะกอนในกรวยจากกระบวนการควบคุม (C) เท่ากับ 30 มล. กระบวนการหมักที่ 1 (BP-1) เท่ากับ 197.5 มล. กระบวนการหมักที่ 2 (BP-2) เท่ากับ 220.5 มล. กระบวนการหมักที่ 3 (BP-3) เท่ากับ 240 มล. และกระบวนการหมักที่ 4 (BP-4) เท่ากับ 280 มล. ซึ่งค่า SV30 ปกติอยู่ระหว่าง 200 – 300 มิลลิลิตร/ลิตร [21] ส่วนตะกอนแห้งที่ได้จากการกรองเอาเฉพาะตะกอน (Sludge) ไปตากแดด (Solar drying) นั้น น้ำหนักแห้ง (Dry matter) ของกระบวนการควบคุม (C, control) เท่ากับ 62.5 กก. กระบวนการหมักที่ 1 (BP-1,

bio process 1) เท่ากับ 85.5 กก. กระบวนการหมักที่ 2 (BP-2, bio process 2) เท่ากับ 83.2 กก. กระบวนการหมักที่ 3 (BP-3, bio process 3) เท่ากับ 105.7 กก. และกระบวนการหมักที่ 4 (BP-4, bio process 4) เท่ากับ 106.7 กก.

4.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุโปรตีน

นำตะกอนตัวอย่างที่แห้งและบดละเอียดบรรจุใส่ถุงพลาสติกแล้วส่งไปตรวจวิเคราะห์ธาตุโปรตีนหยาบ (CP) ที่ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เป็นหน่วยงานที่ได้รับการรับรองและมีความเชี่ยวชาญทางด้านอาหารสัตว์ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ของ AOAC 18th ed., 2010, Method 984.13 [22] ผลเมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณโปรตีนต่างจากกระบวนการควบคุม และสามารถนำไปเป็นส่วนผสมอาหารเลี้ยงสัตว์ได้ และปริมาณโปรตีนจาก BP-4 มีปริมาณมากที่สุดรองลงมาคือ BP-3, BP-2, และ BP-1 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างแต่ละกระบวนการหมักกับกระบวนการควบคุม (control) พบว่า BP-4, BP-3, BP-2 และ BP-1 ทั้ง 4 วิธีการหมักมีความแตกต่างของผลวิเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกระบวนการควบคุม ดังแสดงตามตารางที่ 3

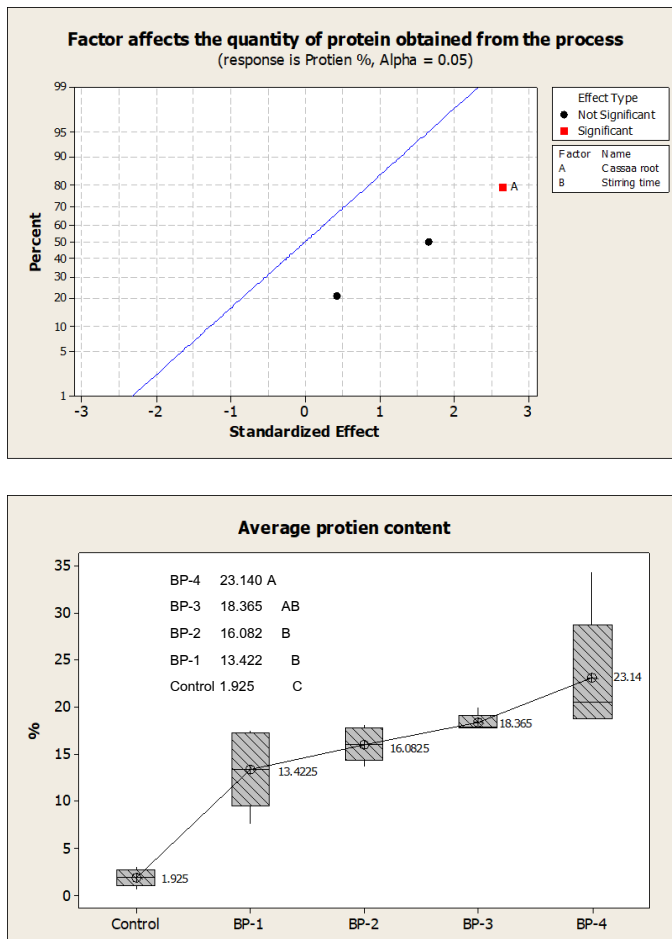
ตารางที่ 3 ปริมาณโปรตีนหยาบ

Process Characteristics\replicate	Control	BP-1	BP-2	BP-3	BP-4
Protein _{r1} (%)	1.50	7.72	15.03	17.87	34.34
Protein _{r2} (%)	2.50	11.35	13.80	17.74	18.87
Protein _{r3} (%)	0.70	17.12	18.09	19.94	20.57
Protein _{r4} (%)	3.00	17.50	17.41	17.91	18.78
Mean	1.92 ±1 ^c	13.42 ±5 ^b	16.08 ±1 ^b	18.24 ±1 ^{ab}	23.14±7 ^a
P = 0.000					

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

การทดลองการหมักหัวมันสำปะหลังเพื่อให้ได้ธาตุอาหารที่สามารถนำไปเป็นส่วนผสมอาหารสัตว์นั้นจากการทดลองพบว่าทั้ง 4 รูปแบบการทดลองที่ใช้ หัวมันสำปะหลังสดสับหรือบดแล้วนำไปหมัก (ปัจจัย a₁, a₂) และ หัวมันสำปะหลังที่สับหรือบดหมักแบบคลุมไว้ก่อน 1 เดือนแล้วนำไปหมักในถังหมัก เป็นปัจจัยที่ส่งผลดีที่สุด ต่อปริมาณธาตุโปรตีนที่ได้จากกระบวนการ (A, p = 0.025)

ส่วนอีกปัจจัยที่ใช้ในการทดลองคือ การกวนด้วยใบกวนในถังหมักเป็นเวลา 2 และ 6 ชั่วโมง/วัน (ปัจจัย b_1 , b_2) จากผลวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าไม่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณธาตุโปรตีนที่ได้จากกระบวนการ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่ได้จากทุกกระบวนการทดลองกับกระบวนการควบคุม พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.000$) ดังแสดงในรูปที่ 3

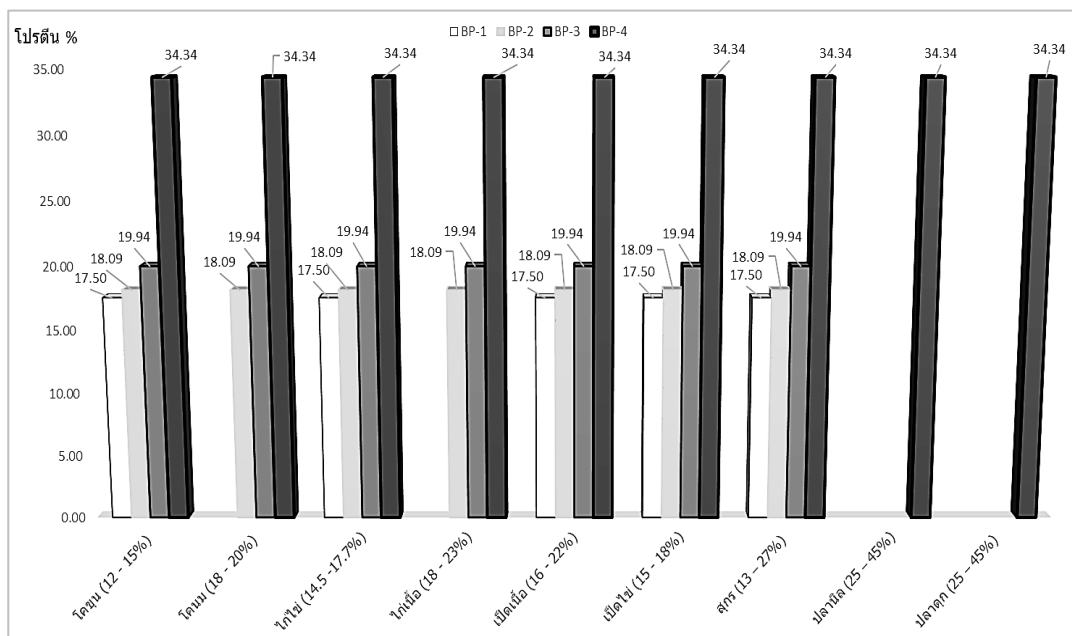


รูปที่ 3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนและค่าเฉลี่ยปริมาณโปรตีน

จากการนำมาเทียบกับค่าโภชนาการอาหารสัตว์ แสดงให้เห็นว่าสามารถนำผลผลิตจากกระบวนการไปใช้เป็นอาหารสัตว์ได้หรือใช้เป็นส่วนผสมกับวัตถุดิบอย่างอื่นเพื่อเลี้ยงสัตว์ และจากกระบวนการ BP-4 ได้ปริมาณธาตุอาหารมากที่สุดและสามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ได้หลายประเภท เช่น โคขุน โคเนื้อ ไก่ไข่ ไก่เนื้อ เป็ดเนื้อ เป็ดไข่ สุกร และปลา ซึ่งสัตว์เหล่านี้ถือว่าเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่สำคัญ ตามตารางที่ 4 และรูปที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณโปรตีนผสมอาหารสัตว์

Animal feed \ process	BP-1	BP-2	BP-3	BP-4
Crude protein %	7.72-17.50	13.80-18.09	17.74-19.94	18.78-34.34
โคขุน (12 - 15%) [23]	✓	✓	✓	✓
โคนม (18 - 20%) [24]		✓	✓	✓
ไก่ไข่สาวก่อนไข่ (14.5 -17.7%) [25]	✓	✓	✓	✓
ไก่เนื้อ (18 - 23%) [25]		✓	✓	✓
เป็ดเนื้อ (16 - 22%) [25]	✓	✓	✓	✓
เป็ดไข่ (15 - 18%) [25]	✓	✓	✓	✓
สุกร (13 - 27%) [25]	✓	✓	✓	✓
ปลานิล (25 - 45%) [26]				✓
ปลาดุก (25 - 45%) [26]				✓



รูปที่ 4 โปรตีนหายจากกระบวนการที่สามารถนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ได้

5. อภิปรายผล

ผลจากการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นแนวทางที่สอดคล้องกับงานวิจัยการปรับปรุงคุณภาพทางโภชนาการของมันสำปะหลังและผลพลอยได้ของมันสำปะหลังที่ใช้จุลินทรีย์ในการหมัก ซึ่งนำเชื้อราและจุลินทรีย์จากธรรมชาติที่เป็นสายพันธุ์จากทวีปอเมริกา แอฟริกา และเอเชียมาใช้เป็นหัวเชื้อในการทดลองหมักหัวมันสำปะหลังบดที่มีปริมาณโปรตีนเพียง 3% ให้ได้ปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นเป็น 18-42% โดยจากการสังเกตพบว่าจุลินทรีย์เลือกใช้แป้งเป็นสารตั้งต้นของเจลลิตินซึ่งสามารถนำมาใช้หมักได้ และการเติมสารตั้งต้นที่เป็นเจลลิตินซึ่งให้กับจุลินทรีย์สามารถผลิตเอ็นไซม์ที่ย่อยสลายแป้งได้ดี [27] โดยรวมจากค่าที่ได้จากผลวิเคราะห์ของห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่าตะกอนแห้งจากหัวมันสำปะหลังหมักจากทุกกระบวนการมีโปรตีนในปริมาณที่เพียงพอสามารถนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์เพื่อเลี้ยงสัตว์ได้ โดยรูปแบบวิธีการหมักที่ 4 (BP-4) ให้ปริมาณธาตุโปรตีนมากที่สุดคือ ร้อยละ 34.34 ซึ่งปริมาณโปรตีนที่ได้เป็นผลมาจากการใช้วัสดุหมักที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดีและระยะเวลาการกวนผสมทั้งวัสดุหมัก อากาศ และอาหารเสริมจุลินทรีย์ที่นานพอในถังหมักส่งผลให้เกิดจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์เป็นตะกอนที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบมากขึ้น และการใช้วัสดุหมักมีลักษณะที่เหมือนกันในรูปแบบการหมักที่ 3 (BP-3) แต่ระยะเวลาการกวนน้อยกว่า ส่งผลให้ปริมาณตะกอนโปรตีนลดลงตามไปด้วย เนื่องจากมีปริมาณอากาศในถังหมักไม่เพียงพอที่จุลินทรีย์ที่ใช้อากาศจะเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนและปลดปล่อยธาตุอาหารออกมา โดยการหมักรูปแบบที่ 3 ได้ปริมาณโปรตีนสูงสุดร้อยละ 19.54 ส่วนการใช้วัสดุหมักที่มีลักษณะสดในรูปแบบการหมักที่ 2 (BP-2) ปริมาณโปรตีนลดลงตามการใช้วัสดุในการหมักกับระยะเวลาการกวนได้ปริมาณสูงสุดร้อยละ 18.09 และรูปแบบการหมักที่ 1 (BP-1) ที่ใช้วัสดุหมักเช่นเดียวกับรูปแบบที่ 2 แต่ใช้ระยะเวลาในการกวนน้อยกว่าทำให้ได้ปริมาณโปรตีนเพียงร้อยละ 17.50 จากปริมาณโปรตีนที่ได้ในแต่ละกระบวนการหมักก็ทวีผลส่งผลหลักเป็นผลมาจากการใช้หัวมันสำปะหลังที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบมาเป็นวัสดุหมักเพื่อเป็นแหล่งอาหารที่ดีสำหรับจุลินทรีย์ รวมทั้งการกวนในกระบวนการหมักจะต้องใช้ระยะเวลาการกวนที่เพียงพอในถังหมักเพื่อทำให้เกิดการกระจายตัวของอากาศและอาหารจุลินทรีย์ไปทั่วทุกพื้นที่ของถังหมักช่วยส่งเสริมให้จุลินทรีย์ที่ใช้อากาศสามารถเจริญเติบโตแบ่งเซลล์ได้ดีและเพิ่มจำนวนได้มากขึ้น ส่งผลทำให้มีการปลดปล่อยสารอาหารออกมาในรูปของโปรตีนในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น

ปริมาณโปรตีนที่ได้จากกระบวนการทดลองนี้ มีปริมาณธาตุอาหารในปริมาณที่สามารถนำไปใช้ในใช้ประโยชน์ได้ แม้ว่าจะมีปริมาณโปรตีนไม่เท่ากับแหล่งโปรตีนอย่างอื่นก็ตามก็สามารถนำมาเป็นส่วนผสมกับโปรตีนจากแหล่งอื่น เช่น ปลาป่น ปากถั่วเหลืองในอัตราที่ลดลง เพื่อนำไปใช้ในการเลี้ยงสัตว์ และผลที่ได้จากกระบวนการทดลองอาจจะมีผลคลาดเคลื่อนบ้างเนื่องจากมีปัจจัยภายนอกหลายอย่างที่ไม่สามารถควบคุมได้เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดลองและอาจจะส่งผลให้ปริมาณธาตุอาหารที่ได้จากกระบวนการต่ำเกินไปหรือสูงมากเกินไป ซึ่งจะต้องมีการพัฒนา

ศึกษาแนวทาง (response surface methodology) ในการควบคุมปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ให้ดีขึ้น ทั้งปัจจัยที่ส่งผลในเชิงที่เป็นผลดีและเป็นผลเสียที่เกิดขึ้นกับกระบวนการ

6. สรุปผล

ผลผลิตตะกอนโปรตีนที่ได้ โดยผ่านกระบวนการหมักที่ใช้วัตถุดิบจากหัวมันสำปะหลังสดและหัวมันสำปะหลังที่บ่มก่อนนำมาหมักมีสารอาหารที่เป็นประโยชน์และเพียงพอที่สามารถนำไปเป็นส่วนผสมอาหารสัตว์หรือเลี้ยงสัตว์ได้ เป็นแนวทางการนำผลผลิตทางการเกษตรที่ประเทศไทยมีผลผลิตเป็นจำนวนมากมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อทดแทนอาหารสัตว์ที่ใช้ส่วนผสมจากกากถั่วเหลืองและปลาป่น

สรุปได้ว่าตะกอนโปรตีนที่ได้จากกระบวนการในงานวิจัยนี้ สามารถที่จะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบผสมอาหารสัตว์แทนปลาป่น กากถั่วเหลืองและวัตถุดิบผสมอาหารสัตว์อย่างอื่นได้ หรือใช้ร่วมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม ลดการทำลายสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติและเป็นแนวทางในการพัฒนาการใช้ผลิตผลทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางด้านอาหารได้อย่างยั่งยืน

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ในการทำการทำวิจัยครั้งต่อไปได้มีการวางแผนที่พัฒนากระบวนการหมักพืชด้วยการคอมเพรสเซอร์ในโตรเจนจากอากาศเข้าไปผสมในกระบวนการหมัก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและได้สารอาหารที่มีประโยชน์ให้มากขึ้น (Air plant protein: APP)

7.2 ใช้ตะกอนโปรตีนและฮอร์โมนพืชที่ได้จากกระบวนการหมักมาทดลองเลี้ยงสัตว์ที่มีอายุมาก เพื่อเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตและผลผลิต โดยทำการออกแบบการทดลองแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ว่ามีอิทธิพลต่อผลผลิตมากน้อยเพียงใด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้คงไม่สำเร็จหากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากทุกฝ่าย คุณนิภารัตน์ โคตะนนท์ นักวิทยาศาสตร์ ผู้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ และท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ธร มั่นคง หัวหน้าห้องปฏิบัติการ ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ท่านอาจารย์วินิจ ต้นสกุล นักวิชาการอิสระและผู้เชี่ยวชาญทางด้านโปรตีนอาหารสัตว์ และท่านอาจารย์ที่ปรึกษาทุกท่านที่ให้ความรู้ ชี้แนะ และแนะนำแนวทางในการทำงานวิจัยครั้งนี้

References

- [1] Online business news. The Red Sea crisis is likely to escalate, fearing it will affect the Thai economy and trade [Internet]. 2024 [Cited 2024 Mar 18]. Available from: <https://www.kaohoon.com/news/651555> (In Thai)
- [2] CPF (Thailand). Raw material prices [Internet]. 2024 [Cited 2024 Mar 15]. Available from: <https://www.cpffeed.com/price-update/> (In Thai)
- [3] Livestock News. Summary of agricultural product conditions for the weeks 11-15, 2024 [Internet]. 2024 [Cited 2024 Mar 15]. Available from: <https://pasusart.com/category/> (In Thai)
- [4] Department of Fisheries. Product situation of duck fish and fishmeal [Internet]. 2024 [Cited 2024 Mar 15]. Available from: <https://www4.fisheries.go.th/dof/main> (In Thai)
- [5] Olude OO, Sahu NP, Sardar P, Nuzaiiba PM. Utilization of valorized cassava leaf meal as an alternative feedstuff to defatted soybean meal in feed for rohu, Labeo rohita fingerlings. Bioresource Technology Reports 2023;22:101400.
- [6] Egerton S, et al. Replacing fishmeal with plant protein in Atlantic salmon (*Salmo salar*) diets by supplementation with fish protein hydrolysate. Scientific Reports 2020;10:4194. doi: 10.1038/s41598-020-60325-7.
- [7] Ceballos H, Sánchez T, Chávez AL, Iglesias C, Debouck D, Mafla G, et al. Variation in crude protein content in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) roots. Journal of Food Composition and Analysis 2006;19(6-7):589-93.
- [8] Department of Science Services. Cassava and products [Internet]. 2024 [Cited 2024 Mar 15]. Available from: <http://otop.dss.go.th/index.php/en/knowledge/informationrepack/> (In Thai)
- [9] Stupak M, Vanderschuren H, Gruissem W, Zhang P. Biotechnological approaches to cassava protein improvement. Trends in Food Science & Technology 2006;17(12):634-41.
- [10] Department of Livestock Development, statistics on import and export of animal feed, year 2023, January 1, 2024 [Internet]. 2024 [Cited 2024 Jan 10]. Available from: <http://eservice.afvc.dld.go.th/dld-portal/doLogin.do> (In Thai)
- [11] Livestock News. Animal feed prices continue to rise, January 25, 2024 [Internet]. 2024 [Cited 2024 Feb 1]. Available from: <https://pasusart.com/category/> (In Thai)

- [12] Cassava and Products Research Center, Suranaree University of Technology. Using cassava as animal feed [Internet]. 2008 [Cited 2024 Mar 18]. Available from: <http://web.sut.ac.th/cassava/> (In Thai)
- [13] Leyva-Guerrero E, Narayanan NN, Ihemere U, Sayre RT. Iron and protein biofortification of cassava: lessons learned. *Current Opinion in Biotechnology* 2012;23(2):257–64.
- [14] GIBTHAI. Fermenter & Control System [Internet]. 2024 [Cited 2024 March 20]. Available from: https://www.gibthai.com/service/note_detail/36/FermenterControl-System (In Thai)
- [15] Dionisi D. *Theory and Design of Fermentation Processes*. Boca Raton, USA: CRC Press; 2021.
- [16] Moon-amart S. Stirred reactor tank. *KKU Engineering Journal* 1998;25(1):47-56. (In Thai)
- [17] Department of Agriculture. *Using statistics in agricultural research: volume 1*. Bangkok, Thailand: Department of Agriculture; 2010. (In Thai)
- [18] Thongkeawyuan A, Chairin T. Selection of carbon and nitrogen sources for protease production by *Metarhizium anisopliae* PSUM02 under solid state cultivation. *Khon Kaen Agriculture Journal* 2016;44(Suppl 1):924-29.
- [19] Sudmai P. Study on total phosphorus in bio-extract liquid [Internet]. 2003 [Cited 2024 March 20]. Available from: <http://lib.doa.go.th/multim/BB00635.pdf>. (In Thai)
- [20] Boulos S, Tännler A, Nyström L. Nitrogen-to-Protein Conversion Factors for Edible Insects on the Swiss Market: *T. molitor*, *A. domesticus*, and *L. migratoria*. *Front Nutr.* 2020 Jul 10;7.
- [21] Pollution Control Department. Wastewater treatment system [Internet]. 2020 [Cited 2024 Mar 20]. Available from: <https://www.pcd.go.th/waters/> (In Thai)
- [22] Association of Official Analytical Chemists (AOAC). *Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists*. 18th ed. Rockville, USA: AOAC international; 2010.
- [23] Sumaman W. Beef cattle feed management to produce high quality meat [Internet]. Department of Livestock Development; 2022 [Cited 2024 Mar 25]. Available from: https://nutrition.dld.go.th/nutrition/images/pdf/beef_vitaya44.pdf (In Thai)
- [24] Netwichai W. Management of dairy cattle feed at different stages [Internet]. Lampang Animal Feed Research and Development Center Animal Feed Development Office, Department of Livestock Development; 2023 [Cited 2024 Jan 22]. Available from: https://region5.dld.go.th/webnew/images/stories/2560/idp2_60/12%20m%2023.pdf (In Thai)

- [25] Bulanarome K. Nutrient requirements of poultry and the use of feedstuffs replacement [Internet]. 2023 [Cited 2024 Feb 25]. Available from: <https://certify.dld.go.th/certify/images/newblsc/meeting/2561/610109/3.pdf> (In Thai)
- [26] Plaipetch P. Nutritional Management for Culturing Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*). Thai Science and Technology Journal 2016;24(1):12-39. (In Thai)
- [27] Aro S. Improvement in the nutritive quality of cassava and its by-products through microbial fermentation. African Journal of Biotechnology 2008(7):4789-97.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายสากล ทองประภา นักศึกษาระดับปริญญาเอก วิทยาลัยนวัตกรรมการเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ สาขาการจัดการด้านวิศวกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ที่อยู่ 110/1-4 ถ.ประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210 E-mail: 627191120002@dpu.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ การพัฒนากระบวนการผลิตโปรตีนจากพืชและปลดปล่อยคาร์บอน



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์ ผู้อำนวยการหลักสูตรปริญญา ดุษฎีบัณฑิต สาขาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยนวัตกรรมการเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ที่อยู่ 110/1-4 ถ.ประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210 E-mail: vorarat@dpu.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ การจัดการทางวิศวกรรม การออกแบบการทดลอง และการบำรุงรักษาทางวิศวกรรม



นายสุรศักดิ์ จันทน์ฉาย กรรมการผู้จัดการ บริษัท เอ-เวสต์ พร็อพเพอร์ตี้ จำกัด ที่อยู่ 109/9 หมู่ 4 ตำบลห้วยกะปิ อำเภอเมืองชลบุรี จังหวัดชลบุรี 20130 E-mail: surasak_69@yahoo.com
งานวิจัยที่สนใจ การวิเคราะห์และการสร้างแบบจำลองระบบพลังงาน การปลดปล่อยคาร์บอนและเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม



นายณัฐ หาคกร หัวหน้างาน 8 งานบริการและควบคุมน้ำสูญเสีย 1 การ
ประปาส่วนภูมิภาคสาขาพัตยา(ชั้นพิเศษ) ที่อยู่ 26/1 หมู่12 ตำบลหนองปรือ
อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี 20150 E-mail: natnakkorn@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ การวิเคราะห์การสร้างแบบจำลองระบบพลังงาน การ
วิเคราะห์การปลดปล่อยคาร์บอน การวิเคราะห์โครงข่ายท่อประปา และ
เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

Article History:

Received: February 10, 2024

Revised: August 8, 2024

Accepted: August 9, 2024

การจำลองสถานการณ์กระบวนการผลิตอาหารสัตว์ด้วยโปรแกรมเฟลกซิม
กรณีศึกษาโรงงานผลิตอาหารสัตว์จังหวัดสุโขทัย

**SIMULATION MODELLING OF SILAGE PRODUCTION PROCESS WITH
FLEXSIM SOFTWARE: A CASE STUDY OF THE SILAGE FACTORY IN
SUKHOTHAI PROVINCE**

ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ¹ ไกลรุ่ง พรอนันต์² กัญญาณัฐ น่วมอิม³ และ สายสัมพันธ์ ชื่นเจริญ⁴

^{1,2}อาจารย์, คณะโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยนเรศวร ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง

จ.พิษณุโลก 65000, ¹sirikarnc@nu.ac.th, ²klairungp@nu.ac.th

³นักวิจัย, คณะโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยนเรศวร ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง

จ.พิษณุโลก 65000, gunyanatn63@nu.ac.th

⁴อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000,

saisumpans@nu.ac.th

Sirikarn Chansombat¹, Klairung Ponanan², Gunyanat Noamim³ and

Saisuman Sooncharoen⁴

^{1,2}Lecturer, Faculty of Logistics and Digital Supply Chain, Naresuan University,

Thapo Sub-district, Muang District, Phitsanulok, 65000, Thailand,

¹sirikarnc@nu.ac.th, ²klairungp@nu.ac.th

³Researcher, Faculty of Logistics and Digital Supply Chain, Naresuan University,

Thapo Sub-district, Muang District, Phitsanulok, 65000, Thailand, gunyanatn63@nu.ac.th

⁴Lecturer, Faculty of Engineering, Naresuan University, Thapo Sub-district, Muang District,

Phitsanulok, 65000, Thailand, saisumpans@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอการศึกษาและแนวทางการปรับปรุงผลิตภาพของกระบวนการผลิตอาหารสัตว์ที่ทำจากต้นข้าวโพดสดของโรงงานผลิตอาหารสัตว์แห่งหนึ่งในจังหวัดสุโขทัย ด้วยการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ โปรแกรมจำลองสถานการณ์ที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ เรียกว่า โปรแกรมเฟลกซิม ซึ่งนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลองต้นแบบ โดยแบบจำลองต้นแบบถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางเลือกทั้งสิ้น 5 สถานการณ์เพื่อเพิ่มผลิตภาพ จากการวิเคราะห์

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง แบบจำลองต้นแบบที่ถูกออกแบบมาเพื่อจำลองสถานการณ์กระบวนการผลิตในปัจจุบันของโรงงาน พบว่า อัตราประโยชน์การใช้งานเครื่องจักรค่อนข้างต่ำในเครื่องอัดขนาดใหญ่ ซึ่งมีอัตราการใช้งานของเครื่องจักร 75% และมีอัตราการทำงานของเครื่องจักรอยู่เพียง 25% หลังจากเพิ่มปริมาณการรับซื้อวัตถุดิบเป็น 25,000 กิโลกรัม เข้าสู่การจำลองสถานการณ์ พบว่า สถานการณ์ที่ 2 สามารถช่วยลดเวลาว่างงานของเครื่องจักรลงได้ 17.5% และสามารถเพิ่มผลผลิตได้จากเดิม 10 ชิ้นเป็น 17 ชิ้นต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 70% เมื่อเปรียบเทียบกับสถานการณ์ปัจจุบันของโรงงาน จากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า โรงงานกรณีศึกษาไม่จำเป็นต้องเพิ่มผลผลิตภาพด้วยการซื้อเครื่องจักรใหม่

คำสำคัญ: อาหารสัตว์, กระบวนการผลิต, การจำลอง, เฟล็กซิม

ABSTRACT

This research presents a study and an approach to improving the productivity of the fresh corn silage production process at a silage factory in Sukhothai province through computer simulation modelling. The proposed simulation program is called flexsim, which generated a prototype model. This prototype was compared with five alternative models to enhance productivity. Based on the analysis of the experimental results, the prototype model, designed to simulate the current production process of the factory, revealed poor machine utilization for large machine, with an idle time percentage of 75% and a processing percentage of 25%. After adding a raw material amount of 25,000 kilograms into the simulation model, it was found that the second scenario could reduce the machine idle time by 17.5% and increase output from 10 units per day to 17 units per day compared to the present operation. From the results, it can be concluded that the case study factory does not need to invest the money to improve the productivity by purchasing new machines.

KEYWORDS: silage, production process, simulation, flexsim

1. บทนำ

อุตสาหกรรมโคเนื้อของประเทศไทย ถือได้ว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมาก มีมูลค่าการส่งออกโคเนื้อถึง 5,250 ล้านบาท มีกำลังการผลิต 180,000 ตัวต่อปี อีกทั้งประเทศไทยมีโรงฆ่าสัตว์ที่ได้รับมาตรฐาน (Good Manufacturing Practice: GMP) ถึง 25 แห่ง [1] ทำให้หลายประเทศมีความเชื่อมั่นต่อสินค้าปศุสัตว์ของไทยเป็นอย่างมาก ส่งผลให้อุตสาหกรรมการผลิตอาหารสัตว์มีอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

สำหรับโรงงานกรณีศึกษา ตั้งอยู่อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย เป็นโรงงานผลิตอาหารสัตว์แบบข้าวโพดอัดก้อนที่มีวัตถุดิบหลัก คือ ต้นข้าวโพดสด ด้วยความนิยมอย่างแพร่หลายในการใช้อาหารสัตว์ที่ทำจากข้าวโพดเพื่อการเลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้องนั้น ทำให้โรงงานกรณีศึกษามีคำสั่งซื้อจากลูกค้าในปริมาณมากขึ้น แต่การดำเนินงานปัจจุบันของทางโรงงานกรณีศึกษาไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการที่เพิ่มมากขึ้นของลูกค้าได้ เนื่องจากการจัดซื้อจัดหาต้นข้าวโพดสดของทางโรงงานจะมีการจัดซื้อจัดหาในพื้นที่ละแวกใกล้เคียงกับทางโรงงานเท่านั้น ทำให้ประสบปัญหาขาดแคลนวัตถุดิบเพื่อทำการผลิต ทำให้ขาดความสมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทาน อีกทั้งผู้วางแผนการผลิตดำเนินการวางแผนการผลิตโดยมิได้คำนึงถึงอรรถประโยชน์การใช้งานเครื่องจักร (Machine Utilization)

จากข้อมูลด้านเนื้อที่เพาะปลูก เนื้อที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 3 ปีย้อนหลัง ตั้งแต่ปีเพาะปลูก 2562/63 2563/64 และ 2564/65 ของจังหวัดสุโขทัย ดังตารางที่ 1 พบว่า มีเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และจากข้อมูลแบบรายอำเภอ ประจำปีเพาะปลูก 2562/63 ดังตารางที่ 2 พบว่า ทำเลที่ตั้งของโรงงาน ซึ่งตั้งอยู่ที่อำเภอศรีสำโรง มีการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ค่อนข้างน้อย [2] อาจเป็นสาเหตุให้การใช้นโยบายการจัดซื้อจัดหาในพื้นที่ละแวกใกล้เคียงกับทางโรงงานเท่านั้น ก่อให้เกิดปัญหาด้านวัตถุดิบไม่เพียงพอต่อการผลิตในแต่ละวันได้

จากที่มาและความสำคัญดังกล่าวข้างต้น คณะนักวิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษากระบวนการผลิตข้าวโพดอัดก้อน เพื่อวิเคราะห์ศักยภาพของเครื่องจักรที่มีอยู่ในปัจจุบันและช่วยหาแนวทางหรือทางเลือก (Scenario) ที่เหมาะสมให้กับโรงงานกรณีศึกษา เพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตด้วยการจัดซื้อจัดหาต้นข้าวโพดในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าที่มีเพิ่มขึ้น โดยการประยุกต์ใช้โปรแกรมเฟล็กซ์ซิม (Flexsim) ซึ่งเป็นโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ (Simulation Modeling) ขึ้นมา ก่อนที่จะนำไปใช้กับสถานการณ์หรือการปฏิบัติงานจริง ซึ่งสามารถช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดความผิดพลาด หรือความล้มเหลวได้ อีกทั้งยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาด้วย

ตารางที่ 1 รายละเอียดการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดสุโขทัย

ปีเพาะปลูก	เนื้อที่เพาะปลูก (ไร่)	เนื้อที่เก็บเกี่ยว (ไร่)	ผลผลิต (ตัน)	ผลผลิตต่อไร่ (กิโลกรัม)	
				เพาะปลูก	เก็บเกี่ยว
2564/65	89,466	87,740	60,820	680	693
2563/64	88,296	86,079	58,049	657	674
2562/63	71,059	61,777	40,088	564	649

ตารางที่ 2 รายละเอียดการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดสุโขทัยแบบรายอำเภอ

อำเภอ	เนื้อที่เพาะปลูก (ไร่)	เนื้อที่เก็บเกี่ยว (ไร่)	ผลผลิต (ตัน)	ผลผลิตต่อไร่ (กิโลกรัม)	
				เพาะปลูก	เก็บเกี่ยว
เมืองสุโขทัย	940	940	648	689	689
กงไกรลาศ	6,959	6,959	5,341	767	767
คีรีมาศ	16,310	7,263	4,975	305	685
ทุ่งเสลี่ยม	3,991	3,991	2,769	694	694
บ้านด่านลานหอย	13,797	13,732	8,199	594	597
ศรีสัชนาลัย	19,818	19,753	12,213	616	618
ศรีสำโรง	5,044	4,939	3,026	600	613
สวรรคโลก	831	831	583	702	702
ศรีนคร	3,369	3,369	2,334	693	693

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

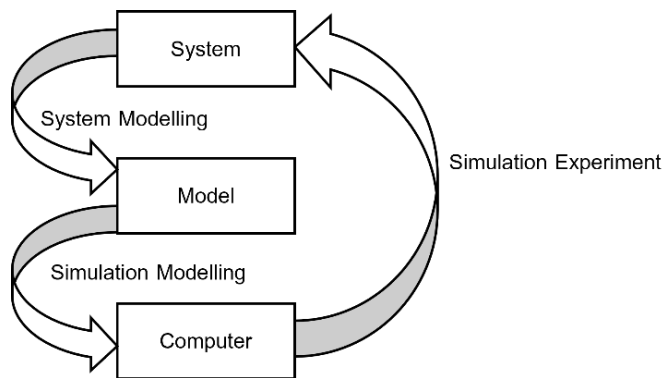
เพื่อพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์กระบวนการผลิตอาหารสัตว์ด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมเฟล็กซิมเพื่อวิเคราะห์ศักยภาพของเครื่องจักรที่มีอยู่ในปัจจุบันและเพื่อหาแนวทางหรือทางเลือก (Scenario) ที่เหมาะสมให้กับโรงงานกรณีศึกษา

3. ทบทวนวรรณกรรม

3.1 การจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์ (Simulation Modelling) คือ การรวบรวมพฤติกรรมของระบบต่าง ๆ เพื่อทำการศึกษากาไหลของกิจกรรมหรือพฤติกรรมของระบบมาไว้บนคอมพิวเตอร์ด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Software) เข้ามาช่วย โดยมีการเก็บรวบรวมข้อมูล และทำการวิเคราะห์หารูปแบบที่ถูกต้องจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงในอนาคต [3, 4]

องค์ประกอบที่สำคัญของการจำลอง ประกอบด้วย 1) การจำลองระบบ (System Modelling) 2) การจำลองสถานการณ์ (Simulation Modelling) และ 3) การทดลองสถานการณ์ (Simulation Experiment) [5] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 องค์ประกอบสำคัญของการจำลอง

การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ คือ การสำรวจและการวิเคราะห์พฤติกรรมของกระบวนการผลิตเพื่อให้สามารถดำเนินการตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการใช้คอมพิวเตอร์ในการสร้างคำตอบขึ้นมา ซึ่งสามารถส่งผลกระทบในเชิงบวกต่อการวางแผนการผลิตของโรงงานทั้งในระยะสั้นและระยะยาวได้ อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการดำเนินงานจริงได้ [6]

การวิเคราะห์ระบบการผลิต สามารถนำการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์มาประยุกต์เพื่อช่วยแก้ปัญหาได้อย่างหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการจัดสรรทรัพยากรการผลิต (Resource Allocation) การจัดตารางการทำงาน (Scheduling) การขนถ่ายวัสดุ (Material Handling) การจัดเก็บสินค้า (Storage) และการผลิต (Manufacturing) ซึ่งในปัจจุบันหลายองค์กรได้นำไปประยุกต์ใช้เพื่อช่วยการตัดสินใจและสามารถประหยัดต้นทุนการดำเนินการลงได้ [7]

3.2 โปรแกรมเฟล็กซิม

โปรแกรมเฟล็กซิม (Flexsim) เป็นโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows System) ซึ่งถูกพัฒนาโดยบริษัท American FlexSim Company [5] เพื่อจำลองสถานการณ์ในลักษณะเป็นภาพเคลื่อนไหวทั้งในรูปแบบ 2 มิติ 3 มิติ และภาพเสมือนจริง เพื่อจำลองและตรวจสอบติดตามการไหลของกระบวนการและระบบ สามารถจำลองกระบวนการผลิตทั้งหมด ทั้งในส่วนของวัตถุดิบหรือทรัพยากรการผลิต พนักงาน รถโฟล์คคลิฟต์ รวมถึงสินค้าคงเหลือได้ และสามารถแสดงผลลัพธ์ได้หลากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็น Word Excel html หรือรูปแบบอื่น ๆ สามารถนำเข้าแบบจำลอง 3 มิติ หรือแบบที่มีคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer-Aided Design: CAD) ได้ เพื่อให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นมีความน่าเชื่อถือและมีขนาดที่สมจริงมากขึ้น ซึ่งทำให้โปรแกรมเฟล็กซิมนี้ไม่เป็นเพียงโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อสร้างแบบจำลองเท่านั้น แต่ยังสามารถสร้างแบบจำลองที่เสมือนจริงและสมจริงได้ [8-10]

การนำโปรแกรมเฟลกซิมไปใช้เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการสนับสนุนการตัดสินใจ ผู้ใช้งานสามารถปรับเปลี่ยนกระบวนการได้ตามความต้องการ และยังสามารถลดต้นทุนที่ไม่จำเป็นลงได้ หากการนำไปใช้นั้นไม่ประสบผลสำเร็จ ช่วยประหยัดเวลา ประหยัดต้นทุน รวมถึงความเสี่ยงที่เกิดจากการดำเนินงานที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าได้ [11]

งานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้โปรแกรมเฟลกซิมเพื่อการแก้ปัญหาต่าง ๆ ได้แก่ การพัฒนารูปแบบการจัดวางผังสินค้าอย่างมีระบบและเพื่อลดเวลาในการขนย้ายบล็อกแก้วออกจากคลังสินค้า ผลงานวิจัย พบว่า เวลาที่ใช้ในการขนถ่ายบล็อกแก้วลดลง คิดเป็นร้อยละ 27.27 [12] การปรับปรุงแผนผังโรงงานผลิตโอ่งมังกร เพื่อลดระยะทางในการขนถ่ายวัสดุระหว่างสถานีการผลิตและเพื่อใช้พื้นที่ภายในโรงงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด พบว่า แผนผังทางเลือกที่เสนอขึ้นสามารถลดระยะทางลงได้ คิดเป็นร้อยละ 20.44 จากแผนผังเดิม [13] การหาทางเลือกในการเพิ่มผลผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน พบว่า ทางเลือกที่ถูกเสนอขึ้นสามารถช่วยเพิ่มกำลังการผลิตขึ้นได้จากเดิม 1,637 ชิ้นต่อวัน เป็น 1,660 ชิ้นต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 1.41 [14] การปรับปรุงประสิทธิภาพแถวคอยในการรอรับบริการแผนกเวชระเบียนศูนย์การแพทย์ มหาวิทยาลัยสุรนารี โดยทางเลือกที่ดีที่สุดจากการจำลอง คือ การเพิ่มบุคลากร 1 คน และคอมพิวเตอร์จำนวน 1 เครื่อง จะสามารถช่วยลดระยะเวลารอคอยและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานได้ร้อยละ 66.02 [15]

4. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์กระบวนการผลิตอาหารสัตว์ด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมเฟลกซิม เพื่อวิเคราะห์ศักยภาพของเครื่องจักรที่มีอยู่ในปัจจุบันและช่วยหาแนวทางหรือทางเลือก (Scenario) ที่เหมาะสมให้กับโรงงานกรณีศึกษา มีรายละเอียดวิธีดำเนินการวิจัย ดังนี้

4.1 ศึกษาสภาพปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา

คณะนักวิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลจากการลงพื้นที่สำรวจ (Survey) และการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-Depth Interview) กับวิศวกรด้านการวางแผนการผลิต พบว่า โดยปกติจะมีต้นข้าวโพดสดป้อนเข้าสู่โรงงานเพื่อทำการผลิต โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 15,000 กิโลกรัมต่อวัน แต่กำลังการผลิตสูงสุด (Max Production Capacity) ของโรงงานสามารถรองรับปริมาณต้นข้าวโพดสดเพื่อมาทำการผลิตได้สูงสุดถึง 25,000 กิโลกรัมต่อวัน ซึ่งโรงงานกรณีศึกษา ตั้งอยู่อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย เป็นโรงงานผลิตอาหารสัตว์ที่มีผลิตภัณฑ์ คือ ข้าวโพดอัดก้อน 2 ขนาด ได้แก่ ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ซึ่งมีวัตถุดิบหลัก คือ ต้นข้าวโพดสด มีวันทำงาน คือ วันจันทร์ถึงวันเสาร์ และมีเวลาปฏิบัติงาน คือ 8 ชั่วโมงต่อวัน ตั้งแต่เวลา 08.00 น. จนถึง 16.00 น. การผลิตของโรงงานเป็นการผลิตแบบตาม

คำสั่งซื้อ (Make-to-Order) และการผลิตเพื่อรอจำหน่าย (Make-to-Stock) โดยรูปแบบการผลิตข้าวโพดอัดก้อนทั้ง 2 ขนาดมีกระบวนการผลิตแบบเดียวกัน เครื่องจักรเพื่อใช้ในการผลิตข้าวโพดอัดก้อน มีจำนวน 2 เครื่อง ประกอบด้วย เครื่องอัดขนาดเล็ก และ เครื่องอัดขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2 โดยรายละเอียดของเครื่องจักรแต่ละเครื่อง ดังตารางที่ 3 โดยลำดับขั้นตอนการผลิตข้าวโพดอัดก้อนทั้งสองขนาดมีกระบวนการผลิตแบบเดียวกัน เริ่มต้นจากการรับเข้าต้นข้าวโพดสด เพื่อทำการบดให้ละเอียด และอัดเป็นก้อน หลังจากนั้นจะดำเนินการบรรจุหีบห่อพร้อมกับรีดเอาอากาศออก เพื่อหมักต้นข้าวโพด ซึ่งถือเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการผลิตข้าวโพดอัดก้อน ดังรูปที่ 3



เครื่องอัดขนาดเล็ก

เครื่องอัดขนาดใหญ่

รูปที่ 2 เครื่องจักรเพื่อใช้ในการผลิตข้าวโพดอัดก้อน

ตารางที่ 3 รายละเอียดของเครื่องจักรแต่ละเครื่องที่มีอยู่ของโรงงาน

เครื่องจักร	จำนวน (เครื่อง)	ปริมาณข้าวโพดสด ที่ใช้ในการผลิต (กิโลกรัมต่อก้อน)	ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิต (นาทีต่อก้อน)
เครื่องอัดขนาดเล็ก	1	80	25
เครื่องอัดขนาดใหญ่	1	700	15



รูปที่ 3 กระบวนการผลิตข้าวโพดอัดก้อน

4.2 การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์

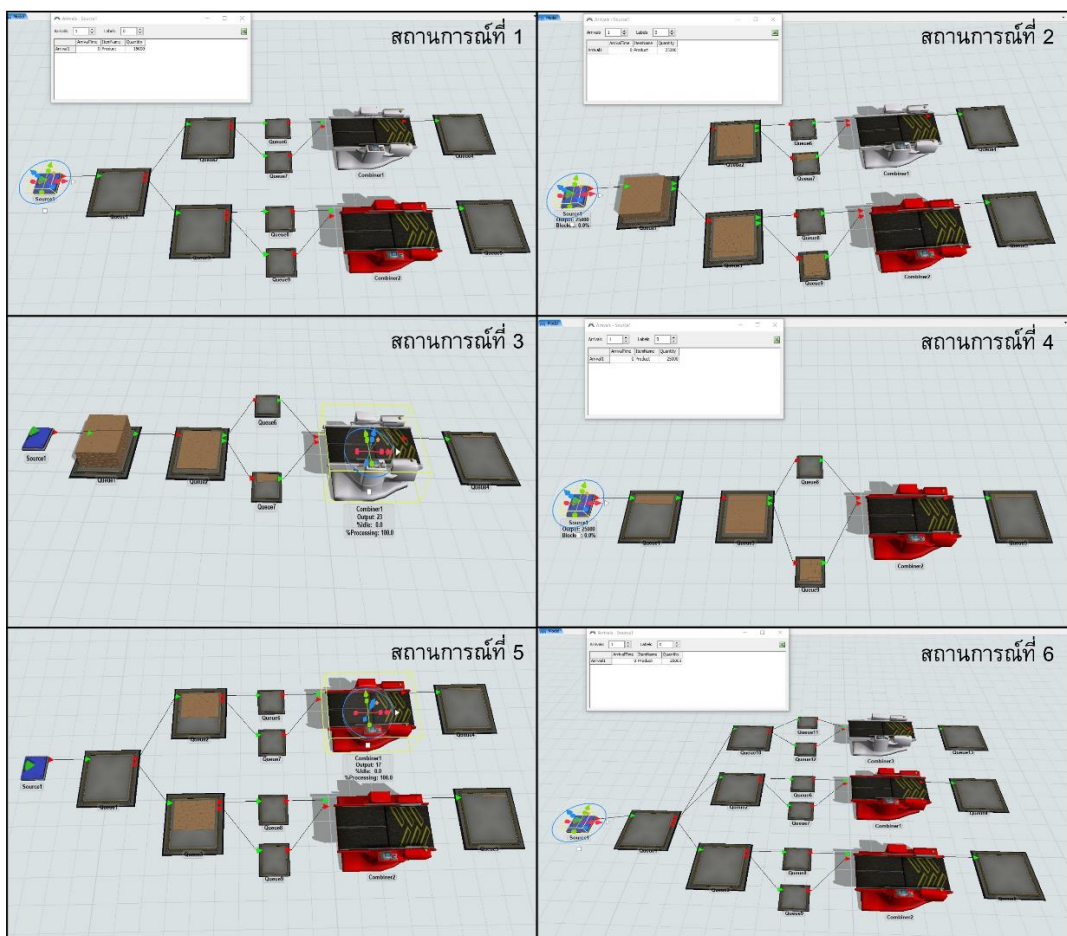
เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยนี้ คือ โปรแกรมเฟลกซิม รุ่น Flexsim Educational 24.2 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองและใช้ในการทดลองมีรายละเอียดของเครื่อง ดังนี้ คอมพิวเตอร์แบบพกพาที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) แบบ Intel(R) Core(TM) i5-8250U ด้วยความถี่ 1.80 GHz และมีหน่วยความจำ (RAM) 8.00 GB บนระบบปฏิบัติการ Windows 10

สถานการณ์ที่ 1 เป็นการจำลองสถานการณ์การผลิตปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา เป็นข้อมูลที่ได้รับจากการสัมภาษณ์เชิงลึกวิศวกรด้านการวางแผนการผลิต มีเครื่องอัดขนาดเล็ก 1 เครื่อง และ เครื่องอัดขนาดใหญ่ 1 เครื่อง และมีปริมาณต้นข้าวโพดสดเพื่อใช้ในการผลิตโดยเฉลี่ยคือ 15,000 กิโลกรัมต่อวัน แต่กำลังการผลิตสูงสุด (Max Production Capacity) ของโรงงานสามารถรองรับปริมาณต้นข้าวโพดสดเพื่อมาทำการผลิตได้ถึง 25,000 กิโลกรัมต่อวัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้จำลองสถานการณ์เพื่อศึกษาอรรถประโยชน์การใช้งานเครื่องจักร (Machine Utilization) และจำลองสถานการณ์การจัดซื้อจัดหาต้นข้าวโพดสดจากพื้นที่อื่น ๆ เพิ่มเติม เพื่อเป็นแนวทางหรือทางเลือกในการตัดสินใจเพิ่มขึ้นอีก 5 สถานการณ์ที่เป็นไปได้ โดยสถานการณ์ที่ 2 ถึง 6 เป็นการจำลองสถานการณ์ที่โรงงานสามารถจัดซื้อจัดหาต้นข้าวโพดสดได้ 25,000 กิโลกรัมต่อวัน โดยสถานการณ์ที่ 2 จำลองให้มีจำนวนเครื่องจักรเท่ากับสถานการณ์การผลิตปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา เพื่อต้องการทดสอบว่าหากโรงงานสามารถจัดซื้อจัดหาต้นข้าวโพดสดเพิ่มเติมได้ เครื่องจักรที่มีอยู่จะสามารถรองรับต่อการผลิตได้หรือไม่ สถานการณ์ที่ 3 และ 4 เป็นการปรับลดจำนวนเครื่องจักรลง เพื่อต้องการทดสอบว่า ความสามารถในการผลิตของเครื่องจักรแต่ละเครื่องเป็นอย่างไร และสามารถรองรับต่อปริมาณต้นข้าวโพดสดที่เพิ่มขึ้นได้หรือไม่ สถานการณ์ที่ 5 เป็นการปรับเพิ่มเครื่องอัดขนาดใหญ่ขึ้นจากเดิมเป็น 2 เครื่อง และไม่พิจารณาเครื่องอัดขนาดเล็ก เพื่อต้องการทดสอบว่า หากพิจารณาเพียงแต่เครื่องอัดขนาดใหญ่เท่านั้นจะสามารถรองรับต่อปริมาณต้นข้าวโพดสดที่เพิ่มขึ้นได้หรือไม่ และสถานการณ์ที่ 6 เป็นการจำลองให้มีเครื่องอัดขนาดเล็ก 1 เครื่อง และปรับเพิ่มเครื่องอัดขนาดใหญ่ขึ้นจากเดิมเป็น 2 เครื่อง เพื่อต้องการทดสอบว่าทางโรงงานมีความจำเป็นหรือมีความคุ้มค่ามากน้อยอย่างไรในการลงทุนซื้อเครื่องจักรเพิ่มเติมนายละเอียดของการจำลองแต่ละสถานการณ์ ดังตารางที่ 4 และภาพรวมของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองในแต่ละสถานการณ์ด้วยโปรแกรมเฟลกซิม ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 4 รายละเอียดของการจำลองสถานการณ์แต่ละแบบ

สถานการณ์ที่ (Scenarios)	จำนวนเครื่องจักร		ปริมาณต้นข้าวโพดที่ใช้ เพื่อการผลิต (กิโลกรัม)
	เครื่องอัดขนาดเล็ก	เครื่องอัดขนาดใหญ่	
1	1	1	15,000
2	1	1	25,000
3	1	X	25,000
4	X	1	25,000
5	X	2	25,000
6	1	2	25,000

หมายเหตุ: X หมายถึง ไม่พิจารณาเครื่องจักรดังกล่าวในการจำลองสถานการณ์



รูปที่ 4 การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมเฟล็กซิม

4.3 การตรวจสอบความถูกต้องและความสมเหตุสมผลของแบบจำลอง

การจำลองสถานการณ์ของโรงงานผลิตอาหารสัตว์กรณีศึกษา มีการกำหนดค่าเริ่มต้นของแบบจำลองสถานการณ์ (Run Setup) และมีการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการพิสูจน์ยืนยัน (Verification) และการทดสอบความถูกต้อง (Validation) รายละเอียดดังนี้

การพิสูจน์ยืนยัน (Verification) ได้ทำการทดสอบผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลที่คาดว่าจะได้รับจากแบบจำลองระหว่างกระบวนการสร้างแบบจำลองแต่ละขั้นตอนตามลำดับของการผลิตจริง พบว่า แบบจำลองสถานการณ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมานั้นสามารถทำงานได้โดยไม่มีการแจ้งเตือนความผิดพลาดจากโปรแกรม พร้อมทั้งมีการตรวจสอบพฤติกรรมในแบบจำลองว่าสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตรงตามสภาพแวดล้อมการทำงานจริงของโรงงานกรณีศึกษา

การทดสอบความถูกต้อง (Validation) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับระบบการผลิตจริง ได้นำผลลัพธ์ (Output) ที่ได้จากการผลิตในสถานการณ์จริงและจากแบบจำลองสถานการณ์ที่ 1 มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel พบว่า ค่า P (P-value) เท่ากับ 0.155 นั่นคือ ค่า P มากกว่า 0.05 จึงถือว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์ที่ 1 ไม่แตกต่างกันกับระบบการผลิตจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ว่า แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นนั้นมีความถูกต้อง และสามารถเป็นตัวแทนของกระบวนการผลิตข้าวโพดอัดก้อนจริงได้ เพื่อจะได้สามารถนำเอาแบบจำลองนี้ไปใช้ทดลองในสถานการณ์การผลิตที่เป็นไปได้เพื่อเป็นแนวทางหรือทางเลือกในการตัดสินใจได้

4.4 สรุปผล

ขั้นตอนของการสรุปผล เป็นการนำเอาผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในแต่ละสถานการณ์มาแปรผล เพื่อให้สามารถเป็นข้อมูลป้อนกลับไปยังโรงงานกรณีศึกษาสู่การนำไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์จริงต่อไป

5. ผลการวิจัย

จากการประยุกต์ใช้โปรแกรมเฟล็กซ์ซิมเพื่อจำลองสถานการณ์กระบวนการผลิตข้าวโพดอัดก้อนที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน ด้วยปริมาณการรับซื้อต้นข้าวโพดสดอยู่ที่ 15,000 กิโลกรัมต่อวัน และจำลองสถานการณ์เพื่อเป็นแนวทางหรือทางเลือกในการตัดสินใจเพิ่มขึ้นอีก 5 สถานการณ์ที่เป็นไปได้ ด้วยปริมาณการรับซื้อต้นข้าวโพดเป้าหมายที่ 25,000 กิโลกรัมต่อวัน ผลการวิเคราะห์สถานการณ์แต่ละสถานการณ์ตามบริบทต่าง ๆ ประกอบด้วย ผลลัพธ์ที่เป็น

ข้าวโพดอัดก้อนที่สามารถผลิตได้ต่อวัน อัตราการว่างงานของเครื่องจักร (% Idle) และอัตราการใช้งานของเครื่องจักร (% Process) ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองการจำลองสถานการณ์

สถานการณ์ที่ (Scenarios)	ผลลัพธ์ที่ได้			
	บริบท	เครื่องอัด ขนาดเล็ก	เครื่องอัด ขนาดใหญ่ เครื่องที่ 1	เครื่องอัด ขนาดใหญ่ เครื่องที่ 2
1	จำนวนข้าวโพดอัดก้อน (ก้อน)	23	10	
	% Idle	0%	75%	
	% Processing	100%	25%	
2	จำนวนข้าวโพดอัดก้อน (ก้อน)	23	17	
	% Idle	0%	57.5%	
	% Processing	100%	42.5%	
3	จำนวนข้าวโพดอัดก้อน (ก้อน)	23		
	% Idle	0%		
	% Processing	100%		
4	จำนวนข้าวโพดอัดก้อน (ก้อน)		35	
	% Idle		0%	
	% Processing		100%	
5	จำนวนข้าวโพดอัดก้อน (ก้อน)		17	17
	% Idle		0%	0%
	% Processing		100%	100%
6	จำนวนข้าวโพดอัดก้อน (ก้อน)	23	11	11
	% Idle	0%	72.5%	72.5%
	% Processing	100%	27.5%	27.5%

สถานการณ์ที่ 1 เป็นการจำลองสถานการณ์กระบวนการผลิตข้าวโพดอัดก้อนที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน พบว่า เครื่องอัดขนาดเล็ก สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ คือ มีอัตราการใช้งานของเครื่องจักรร้อยละ 100 และผลิตข้าวโพดอัดก้อนขนาดเล็กได้จำนวน 23 ก้อน และเครื่องอัด

ขนาดใหญ่ สามารถผลิตข้าวโพดอัดก้อนได้ 10 ก้อน มีอัตราประโยชน์การใช้งานเครื่องจักรค่อนข้างต่ำ มีอัตรการว่างงานสูงถึง 75% และมีอัตรการทำงานอยู่เพียง 25% เท่านั้น

สำหรับสถานการณ์ที่ 2 ถึง 6 เป็นการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่มีการจัดซื้อจัดหาต้นข้าวโพดสดจากพื้นที่อื่น ๆ เพิ่มเติม ด้วยปริมาณการรับซื้อต้นข้าวโพดเป้าหมายที่ 25,000 กิโลกรัมต่อวัน ผลลัพธ์ที่ได้จากสถานการณ์ที่ 2 พบว่า เครื่องอัดขนาดเล็ก ยังคงสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ นั่นคือ มีอัตรการใช้งานของเครื่องจักรร้อยละ 100 และผลิตข้าวโพดอัดก้อนขนาดเล็กได้จำนวน 23 ก้อน แต่สำหรับเครื่องอัดขนาดใหญ่ สามารถผลิตข้าวโพดอัดก้อนเพิ่มขึ้นจาก 10 ก้อนเป็น 17 ก้อนต่อวัน และมีอัตรการว่างงานและการทำงานที่ดีขึ้น อยู่ที่ 57.5% และ 42.5% ตามลำดับ ผลลัพธ์ที่ได้จากสถานการณ์ที่ 3 เป็นการจำลองการใช้เครื่องอัดขนาดเล็กเพียงเครื่องเดียว ทำให้เกิดปัญหาวัตถุดิบเหลือใช้จากการผลิตค่อนข้างมาก ผลลัพธ์ที่ได้จากสถานการณ์ที่ 4 เป็นการจำลองการใช้เครื่องอัดขนาดใหญ่เพียงเครื่องเดียว สามารถใช้เครื่องจักรได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ มีวัตถุดิบเหลือใช้เพียงเล็กน้อย ผลลัพธ์ที่ได้จากสถานการณ์ที่ 5 ที่มีการเพิ่มจำนวนเครื่องอัดขนาดใหญ่จากเดิม 1 เครื่อง เป็น 2 เครื่อง พบว่า เครื่องจักรทั้ง 2 เครื่องได้ดำเนินการผลิตอย่างเต็มประสิทธิภาพตามวัตถุดิบป้อนเข้าที่มี โดยมีวัตถุดิบเหลือใช้เพียงเล็กน้อย และสำหรับสถานการณ์สุดท้าย เป็นการจำลองสถานการณ์ที่มีเครื่องอัดขนาดเล็ก จำนวน 1 เครื่อง และเครื่องอัดขนาดใหญ่ จำนวน 2 เครื่อง พบว่า เครื่องอัดขนาดใหญ่ทั้ง 2 เครื่องนั้นมีอัตรการว่างงานสูงถึง 72.5% มีอัตรการทำงานอยู่เพียง 27.5% เท่านั้น

6. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากการศึกษาสภาพปัญหาของโรงงานกรณีศึกษา พบว่า ประสพปัญหาด้านวัตถุดิบ นั่นคือ ต้นข้าวโพดสด เพื่อใช้ในการผลิตไม่เพียงพอ ด้วยสาเหตุที่การจัดซื้อจัดหาต้นข้าวโพดสดนั้นจะดำเนินการในพื้นที่ละแวกใกล้เคียงกับทางโรงงานเท่านั้น โดยการวางแผนการผลิตไม่ได้นำปัจจัยเรื่องอรรถประโยชน์การใช้งานของเครื่องจักร (Machine Utilization) มาพิจารณาด้วย ทำให้เกิดปัญหาการใช้งานเครื่องจักรไม่เต็มประสิทธิภาพ และส่งผลให้ไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าที่มีเพิ่มมากขึ้นได้ จากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษากระบวนการผลิตข้าวโพดอัดก้อน เพื่อวิเคราะห์ศักยภาพของเครื่องจักรที่มีอยู่ในปัจจุบันและช่วยหาแนวทางที่เหมาะสมให้กับโรงงานกรณีศึกษา ด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมเฟล็กซิม เพื่อสร้างแบบจำลองสถานการณ์การผลิตในรูปแบบที่เป็นไปได้ขึ้นมา เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่ได้รวมถึงอัตรการว่างงาน (Idle Time) และอัตรการทำงาน (Processing) ของเครื่องจักรจากการจำลองสถานการณ์ในแต่ละรูปแบบ

จากผลลัพธ์ที่ได้ ทำให้ทราบว่าปัจจุบันกระบวนการผลิตข้าวโพดอัดก้อนของโรงงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องอัดขนาดใหญ่ มีอัตรการว่างงานสูงถึง 75% และมีอัตรการทำงานอยู่

เพียง 25% เท่านั้น มีเพียงเครื่องอัดขนาดเล็กที่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นจากผลลัพธ์ที่ได้จากสถานการณ์ที่ 2 ที่มีการจัดซื้อจัดหาต้นข้าวโพดสดจากพื้นที่อื่น ๆ เพิ่มเติม ด้วยปริมาณการรับซื้อต้นข้าวโพดเป้าหมายที่ 25,000 กิโลกรัมต่อวัน จะช่วยให้ลดเวลาว่างงานของเครื่องอัดขนาดใหญ่ลงได้ 17.5% จากเดิมที่มีอัตราการว่างงาน 75% ลดลงเหลือ 57.5% และสามารถเพิ่มผลผลิตได้จากเดิม 10 ชันเป็น 17 ชันต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 70 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า โรงงานกรณีศึกษาไม่จำเป็นต้องเพิ่มผลผลิตภาพด้วยการซื้อเครื่องจักรใหม่ ซึ่งปัจจุบันนี้เครื่องจักรที่มีอยู่ทั้ง 2 เครื่อง สามารถรองรับต่อนโยบายการจัดซื้อจัดหาต้นข้าวโพดสดที่เพิ่มขึ้นได้ และสามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าที่มีมากขึ้นได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการศึกษาการวิจัยจากคณะโลจิสติกส์และดิจิทัลฯ พหลายเซนมหาวิทยาลัยนเรศวร และหน่วยวิจัย ASEAN Logistics Academic Network (ALA) และขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการเก็บรวบรวมข้อมูล

References

- [1] Lata P, Thongchai C, Srisawangwong P, Klangpraphan R. The operational sustainability of Pon Yang Kham livestock cooperatives. King Mongkut's Agricultural Journal 2020;38:82-92. (In Thai)
- [2] Oae.go.th [Internet]. Thailand: Office of Agricultural Economics Online Resources; [cited 2024 Mar 10]. Available from: <https://www.oae.go.th> (In Thai)
- [3] Kelton D, Sadowski R, Sturrock D. Simulation with Arena. 4th ed. New York, USA: McGraw -Hill; 2007.
- [4] Mhoraksa T, Samattapapong N, Yunyao S, Wongsakul P. Simulation-based application for improving drinking water production process: a case study of the drinking water factory in Chanthaburi. RMUTL Engineering Journal 2020;5:36-42. (In Thai)
- [5] Shan H, Yuan Y, Zhang Y, Li L, Wang C. Lean, simulation and optimization: the case of steering knuckle arm production line. 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM); 2018 Dec 16-19; Bangkok, Thailand.
- [6] Hassan NA, Arogundade AI, Iyenagbe UB, Musa DI. Simulation and analyses of shea nuts (Vitallaria Paradoxa) processing plant using FlexSim. Journal of Future Sustainability 2023;3:67-74.

- [7] Chawla S, Singari RM. Modelling and simulation of crankcase cover manufacturing in the automobile industry. *Journal of Scientific and Industrial Research* 2023;82:597-602.
- [8] Wu G, Yao L, Yu S. Simulation and optimization of production line based on FlexSim. 2018 Chinese Control and Decision Conference; 2018 June 9-11; Shenyang, China.
- [9] Rostkowska M. Simulation of production lines in the education of engineers: how to choose the right software?. *Management and Production Engineering Review* 2014;5: 53-65.
- [10] Nurudeen AH, Muhammad ID, Dagwa I. Simulation and optimization of a process layout for dehydrated fruit and vegetables processing plant. *Bayero Journal of Engineering Technology* 2020;15(1):99-106.
- [11] Mackow J. Simulation as a tool supporting business decisions. *Procedia Computer Science* 2023;225:108-17.
- [12] Bunternngchit C. Simulation-based application in warehouse layout design for reducing material handling time. *Kasem Bundit Engineering Journal* 2018;8(3):1-14. (In Thai)
- [13] Prayatwong T, Thurapaeng C, Tonglim T, Pornsing C. Improvement of process layout using simulation: case study of dragon jar (Ong Mangkorn). *Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University* 2021;12(2):69-81. (In Thai)
- [14] Panasri J, Sresodapol S, Koiloy W, Samattapapong N. Application of simulation program to increase efficiency melamine dish production process. *Journal of Manufacturing and Management Technology (JMMT)* 2022;1(1):30-8. (In Thai)
- [15] Sittipong P, Samattapapong N. An improvement of service queue by using simulation in the medical records department of the medical center at Suranaree university of technology. *Thai Industrial Engineering Network Journal* 2018;4(1):10-6. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ศิริกาญจน์ จันทร์สมบัติ อาจารย์ประจำ คณะโลจิสติกส์และดิจิทัล
 ซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยนเรศวร ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000
 E-mail: sirikarn@nu.ac.th
 งานวิจัยที่สนใจ: Production planning and scheduling, Optimization,
 Mathematical modelling, Simulation modelling, Metaheuristics



ไกลรุ่ง พรอนันต์ อาจารย์ประจำ คณะโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน
มหาวิทยาลัยนเรศวร ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000 E-mail:
klairungp@nu.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: Economic Analysis for Transportation Engineering,
Transportation Modeling and Planning, Information Flow Modeling,
Logistics Informatics



กัญญาณัฐ น่วมอิม นักวิจัย คณะโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน
มหาวิทยาลัยนเรศวร ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000 E-mail:
gunyanatn63@nu.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: Mathematical modelling, Simulation modelling,
Production Planning



สายสัมพันธ์ ชุ่นเจริญ อาจารย์ประจำ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก
65000 E-mail: saisumpans@nu.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: Optimization, Metaheuristics, Artificial Intelligence,
Visual Basic for Application (VBA)

Article History:

Received: March 12, 2024

Revised: August 4, 2024

Accepted: August 9, 2024

การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการไม่สับย่อยมันสำปะหลัง
โรงงานผลิตแป้งมัน จังหวัดกำแพงเพชร

**IMPROVEMENT BLADE CHOPPED FOR REDUCE LOSSES IN
CHOPPING CASSAVA PROCESS KAMPHAENG PHET STARCH
FACTORY**

ชยันต์ คำบรรลือ¹ ปรียานุช เมฆฉาย^{2*} อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี³ ธงชัย เบ็ญจลักษ์⁴ และ
ธันย์นรี พรไพโรเพชร⁵

^{1,2*,3,4}อาจารย์, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ล้านนา ตาก, 41/1 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมืองตาก จังหวัดตาก 63000,

¹Chayai1976@gmail.com, ^{2*}Priyanuch.me50@gmail.com, ³t.ukrit@edu.rmutl.ac.th,
⁴Benjurlux@rmutl.ac.th

⁵อาจารย์, สาขาสังคมศาสตร์ คณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ล้านนา ตาก, 41/1 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมืองตาก จังหวัดตาก 63000,
Pordee28@windowslive.com

Chayan Khambunlue¹, Priyanuch Mekchay^{2*}, Ukrit Thanasuptawee³, Thongchai Benjurlux⁴
and Thannari Pronpriech⁵

^{1,2*,3,4}Lecturer, Department of Industrial Engineering, Rajamangala University of Technology
Lanna Tak, 41/1 Moo 7 Paholayothin Road, Tambon Mai Ngam, Amphur Muang, Tak,
Thailand 63000

¹Chayai1976@gmail.com, ^{2*}Priyanuch.me50@gmail.com, ³t.ukrit@edu.rmutl.ac.th,
⁴Benjurlux@rmutl.ac.th

⁵Lecturer, Department of Society and Humanities, Rajamangala University of Technology
Lanna Tak, 41/1 Moo 7 Paholayothin Road, Tambon Mai Ngam, Amphur Muang, Tak,
Thailand 63000, Pordee28@windowslive.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงรูปแบบใบไม่มันสำปะหลัง เพื่อลดการสูญเสีย ยึดอายุการ
ใช้งานของใบไม่ ในกระบวนการสับย่อยมันสำปะหลัง โรงงานแป้งมันกำแพงเพชร โดยประยุกต์ใช้

เครื่องมือคุณภาพ QC 7tools ในการหาสาเหตุของอายุการใช้งานของใบมีดที่สั้น โดย การดำเนินงานทำการศึกษารูปแบบใบมีดมันสำปะหลัง ที่ระยะห่างระหว่างฟันของใบมีดต่างกัน คือ 8 16 24 และ 32 มม. ทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 เพื่อยืดอายุการใช้งานของใบมีด มันสำปะหลัง ผลจากการดำเนินงานวิจัยพบว่า รูปแบบใบมีดที่มีระยะห่างระหว่างฟันมีดที่ 32 มม. มีอายุการใช้งานสูงสุด 77.5 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบใบมีดแบบเดิม 48 ชั่วโมง เพิ่มขึ้น 29.5 ชั่วโมง หรือคิดเป็น 61.46% และสามารถลดต้นทุนการสูญเสียของใบมีดลงจากเดิม 60,000 บาทต่อเดือน ลดลงเหลือ 43,107 บาทต่อเดือน สามารถลดต้นทุนการสูญเสียใบมีดลง 16,893 บาทต่อเดือนต่อเครื่อง

คำสำคัญ: แป้งมัน, การลดการสูญเสีย, เครื่องมือคุณภาพ 7 ประการ

ABSTRACT

The purpose of this research was improvement shape blade chopping cassava to reduce losses and increase life time of blade chopped in production process chopping cassava of Kamphaeng Phet starch factory by apply QC 7 tools for find respond of short life time of blade chopped. There are difference distance between of teeth blade and there are equal 8 16 24 and 32 mm made from stainless steel SUS430 for increase life time of blade chopped. The result of the study distance between teeth of blade chopped at 32 mm is life time more than 77.5 hours by compare original shape blade is 48 hours increase 29.5 hours or representing 61.46 percent and that is reduce costs of bland chopped from 60,000 baht per month reduce to 43,107 baht per month that can be reduce costs of bland chopped 16,893 baht per month per 1 machine.

KEYWORDS: Starch, Reducing losses, QC 7tools

1. บทนำ

ประเทศไทยถือได้ว่าเป็นประเทศอุตสาหกรรมเกษตร มีการเพาะปลูกมันสำปะหลังอย่างมาก ซึ่งในปี 2565 ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังมากถึง 10,861,975 ไร่ [1] และยังมี การนำไปผลิตเป็นแป้งมัน มีมูลค่าการส่งออกมากถึง 71,870.68 ล้านบาท (ช่วงเดือน ม.ค.-พ.ค.) [2] โรงงานผลิตแป้งมันกำแพงเพชร เป็นโรงงานหนึ่งซึ่งรับซื้อผลผลิตมันสำปะหลังจากเกษตรกรกร นำมาแปรรูปผลิตเป็นแป้งมัน มีกำลังการผลิต 200 ตันต่อวัน วัตถุดิบที่รับซื้อจากเกษตรกรผู้ปลูกมัน มักจะมีสิ่งเจือปน เช่น หิน ทราาย หรือเหง้ามัน ซึ่งในกระบวนการผลิตมีขั้นตอนกระบวนการแยก สิ่งเจือปน โดยใช้ระบบลูกกลิ้งแยกและระบบล้างทำความสะอาด แต่ในส่วนการแยกเหง้ามันออก

จากวัตถุดิบนั้นใช้คนในการคัดแยกจากสายพานการผลิต ส่งผลให้มีเหง้ามันปะปนเข้าไปในกระบวนการผลิต ซึ่งเหง้ามันนี้ส่งผลต่ออายุการใช้งานของไบโอมัลบอยมันส์สำหรับปะหลังสั้นลง ก่อให้เกิดต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น

จากปัญหาดังกล่าว คณะวิจัยจึงมีแนวคิดในการลดการสูญเสียในกระบวนการผลิตแป้งมันสำหรับปะหลังโดยการศึกษารูปแบบไบโอมัลบอยมันส์สำหรับปะหลังที่เหมาะสม เพื่อยืดอายุการใช้งานในกระบวนการผลิตแป้งมัน

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อลดการสูญเสียในกระบวนการผลิตแป้งมันสำหรับปะหลัง
- 2.2 เพื่อปรับปรุงรูปแบบพื้นไบโอมัลบอยมันส์สำหรับปะหลังให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
- 2.3 เพื่อลดต้นทุนกระบวนการผลิตแป้งมันสำหรับปะหลัง

3. ขอบเขตการวิจัย

- 3.1 ศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างพื้นของไบโอมันสำหรับปะหลัง ที่ 8 12 24 และ 32 มม.
- 3.2 วัสดุไบโอมัลบอยมันส์ทำจากวัสดุ สแตนเลส SUS 304
- 3.3 เก็บข้อมูลและทดลอง ณ โรงงานผลิตแป้งมัน จังหวัดกำแพงเพชร

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

4.1 ศึกษาสภาพทั่วไป

จากการศึกษาสภาพทั่วไปของ โรงงานผลิตแป้งมันกำแพงเพชร มีกำลังการผลิต 200 ตันต่อวัน รับซื้อผลผลิตจากเกษตรกร โดยให้ราคาตามค่าเปอร์เซ็นต์แป้งที่วัดได้ แต่ผลผลิตที่รับซื้อมายังมีคุณภาพไม่สูงมากนัก เกษตรกรมีการนำมันสำหรับปะหลังที่ปลูกข้ามปีซึ่งมีเปอร์เซ็นต์แป้งต่ำแต่น้ำหนักมากมาขายให้กับโรงงาน หรือมันสำหรับปะหลังสายพันธุ์อื่นที่มี เปอร์เซ็นต์แป้งน้อยแต่น้ำหนักมากเข้ามาปะปน ส่งขายให้กับโรงงาน (เช่น พันธุ์เกร็ดมังกร) อีกทั้งมีเศษหิน เศษดิน เหง้ามันสำหรับปะหลังจำนวนมาก ส่งผลต่อการควบคุมกระบวนการผลิตทำได้ยากและก่อให้เกิดการสูญเสียในกระบวนการผลิตแป้งมัน

4.2 ศึกษาเก็บข้อมูลกระบวนการผลิตแป้งมันสำหรับปะหลัง

ในการศึกษาเก็บข้อมูลกระบวนการผลิตแป้งมันสำหรับปะหลัง สามารถสรุปขั้นตอนกระบวนการผลิตแป้งมัน ดังรายละเอียดต่อไปนี้ [3]

- 1) พนักงานบังคับรถตักป้อนวัตถุดิบเข้าสายการผลิตการส่งผ่านสายพานลำเลียงไปยัง

เครื่องร่อน ระหว่างลำเลียงมันสำปะหลังบนสายพานลำเลียง พนักงานจะทำการแยกเหง้ามันและหินออกจากสายพาน ลำเลียงด้วยสายพานส่งผ่านไปยังเครื่องร่อน

2) เครื่องร่อน (Peeler) ทำการแยกสิ่งสกปรกต่างๆ เศษดิน หินออกและลำเลียงส่งไปยังระบบล้างทำความสะอาด

3) ระบบทำความสะอาดมันสำปะหลัง ล้างเศษดินหิน และลำเลียงส่งไปยังเครื่องโม

4) เครื่องโม (Rasper) ทำการสับย่อยมันสำปะหลังให้ละเอียด และลำเลียงส่งผ่านท่อไปยังพัก

5) บั้มทำการดูดมันสำปะหลังที่ผ่านการบดสับย่อยและผสมกับน้ำจากถังพัก ลำเลียงส่งผ่านท่อไปยังเครื่องแยกกากแนวตั้ง (Extractor Vertical) และแนวนอน (Extractor Horizontal) และลำเลียงส่งผ่านท่อไปยังถังพักต่อไป

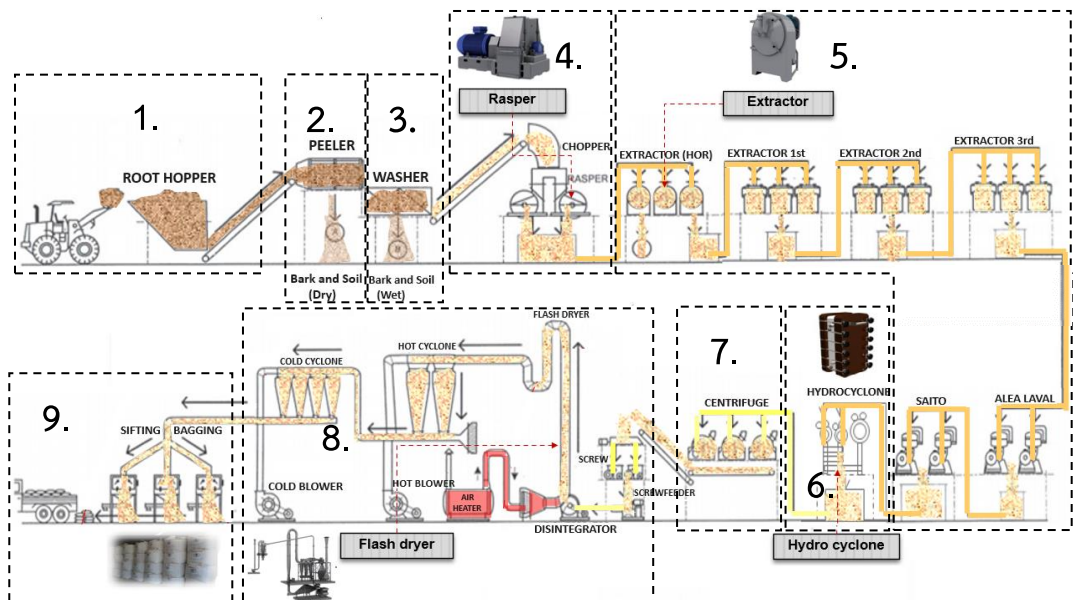
6) น้ำแป้งลำเลียงส่งผ่านท่อไปที่ เครื่อง Hydrocyclone ทำการแยกโปรตีนออกจากน้ำแป้ง และลำเลียงน้ำแป้งส่งต่อไปยังเครื่องสลัดแห้ง

7) เครื่องสลัดแห้ง (Centrifuge) ทำการแยกน้ำออกจากน้ำแป้ง และลำเลียงส่งแป้งหมดไปยังชุดท่อลมร้อนด้วยสายพานลำเลียง

8) แป้งหมดลำเลียงส่งผ่านชุดท่อลมร้อน (Hot cyclone) ท่อลมเย็น (Cold cyclone) และลำเลียงส่งต่อไปยังแผนกบรรจุ

9) แผนกบรรจุทำการบรรจุแป้งและนำไปจัดเก็บ

จากขั้นตอนกระบวนการผลิตแป้งมัน โรงงานแป้งมันจังหวัดกำแพงเพชร แสดงดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2



รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตแป้งมัน



รูปที่ 2 แผนภูมิกระบวนการผลิตแยมมัน

4.3 ปัญหาที่พบในกระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตแป้งมันมีประเด็นปัญหาที่เกิดขึ้นมากมายหลากหลายสาเหตุ ดังเช่น ใน การศึกษาวิจัยของ Banjaprayoonsak [4] ได้ศึกษาแนวทางการลดต้นทุนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ของบริษัท สยามโปรดักส์ (1994) จำกัด สาขาภาพสินธุ์ ด้วยการฝึกอบรมให้พนักงานตระหนักถึง การปฏิบัติงานอย่างมีประสิทธิภาพและการเพิ่มค่าแรง สามารถประหยัดต้นทุนได้วันละ 658.77 บาท/วัน และจากการศึกษาวิจัยของ Moolla [5] ได้ทำการศึกษา การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการ ผลิตแป้งมันสำปะหลัง ด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนใบไม้ จากเดิม 5 ครั้งต่อเดือน เปลี่ยนเป็น 8 ครั้งต่อเดือน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตได้ ร้อยละ 7.35 และ Khambunlue and Klaikein [6] ได้ทำการศึกษา การลดการสูญเสียในกระบวนการผลิตแป้งมัน โรงงาน เอ โดยใช้ แผนภูมิควบคุม (Control chart) ในการควบคุมคุณภาพ มาตรฐานค่าความชื้นแป้ง และใช้ ใบตรวจสอบ (Check sheet) ในการลดการสูญเสียกระบวนการบรรจุแป้งเกิน ซึ่งสามารถลด การสูญเสียจากค่าความชื้นแป้งเกินมาตรฐาน จากเดิม 520 กระสอบ (46 วัน) ลดลงเหลือ 50 กระสอบ (42 วัน) คิดเป็นการสูญเสียที่ลดลง 83.33% และปรับปรุงกระบวนการบรรจุแป้ง สามารถ ลดการสูญเสียจากการบรรจุแป้งน้ำหนักเกิน จากเดิม 496 กิโลกรัมต่อวัน ลดลงเหลือ 299 กิโลกรัม ต่อวัน คิดเป็นการสูญเสียที่ลดลง 39.71% ซึ่งจากการศึกษาเก็บข้อมูลกระบวนการผลิตแป้งมัน สำปะหลัง โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังจังหวัดกำแพงเพชร พบว่าใบไม้ที่ใช้ในการสับย่อยมัน สำปะหลัง มีอายุการใช้งานสั้น เกิดการสึกหรอ ดังรูปที่ 3 คณะวิจัยจึงมีแนวคิดในการเพิ่ม ประสิทธิภาพยืดอายุการใช้งานใบไม้มันสำปะหลัง

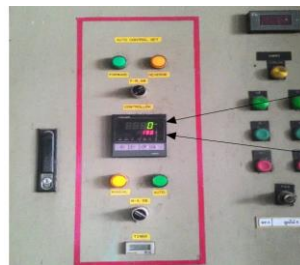


รูปที่ 3 ใบไม้มันสำปะหลังที่เกิดการสึกหรอ

จากกระบวนการผลิตแป้งมัน ในรูปที่ 1 และ 2 ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการโม่มันสำปะหลัง โดยใช้เครื่องมือสับย่อย (Rasper) ซึ่งมีเครื่องมือ จำนวน 5 เครื่อง ใช้สำหรับการโม่สับย่อยมันสำปะหลัง จำนวน 4 เครื่องและเป็นเครื่องสำรอง 1 เครื่อง สำหรับกรณีหยุดเครื่องเมื่อมีเปลี่ยนใบไม้ที่มี การสึกหรอ โดยในการเปลี่ยนใบไม้สับย่อยมันสำปะหลังนี้ พนักงานควบคุมเครื่องจะทำการเปลี่ยน ใบไม้ เมื่อเครื่องมือสับย่อยมีการะไหลตสูงถึง 190 แอมป์ ดังรูปที่ 4 เนื่องจากในกรณีที่มีการะไหล เกินที่กำหนด (190 แอมป์) จะส่งผลต่อคุณภาพของแป้งในกระบวนการผลิต ซึ่งในปัจจุบันใบไม้ สับย่อยมันสำปะหลังมีอายุการใช้งานประมาณ 48 ชั่วโมง และในการเปลี่ยนใบไม้จะดำเนินการ เปลี่ยนทั้งหมดจำนวน 100 ใบต่อครั้งต่อเครื่อง



เครื่องไม่สับย่อย (Rasper)



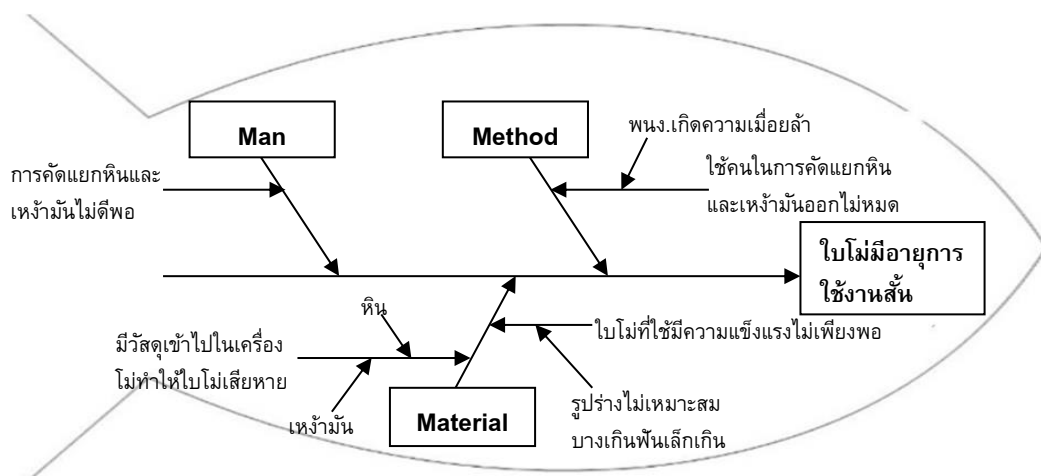
มอนิเตอร์แสดงผลภาระโหลด

มอนิเตอร์แสดงโหลดขณะ
เครื่องทำงานค่าโหลดสูงสุดที่กำหนด
190 แอมป์

รูปที่ 4 เครื่องไม่สับย่อย (Rasper) และมอนิเตอร์แสดงผลภาระโหลด

4.4 วิเคราะห์หาสาเหตุ

จากประเด็นปัญหาที่พบ คณะวิจัยนำเครื่องมือคุณภาพ QC 7tools ดังเช่น การศึกษาวิจัยของ Sunseang [7] การลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติก และ Woarawichai et al [8] ได้ทำการปรับปรุงวิธีการทำงานในการตอกก่อนอินเสิร์ตสำหรับชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์: กรณีศึกษาในบริษัทฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียม โดยประยุกต์ใช้แผนผังก้างปลาในการวิเคราะห์ปัญหา ซึ่งคณะวิจัยประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพ QC 7tools คือ แผนผังก้างปลาในการวิเคราะห์สาเหตุและหาแนวทางการแก้ปัญหาอายุการใช้งานของใบไม้ที่สั้น



รูปที่ 5 แผนผังก้างปลา การวิเคราะห์หาสาเหตุของ ใบไม้มีอายุการใช้งานสั้น

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์หาสาเหตุและแนวทางการแก้ปัญหา

ปัญหา	สาเหตุ	วิธีการแก้ไข
1. คน (Man)	1. พนักงานคัดแยกสิ่งเจือปน บนสายพานลำเลียงมีความเมื่อยล้าส่งผลให้เหง้ามันหลุดเข้าสู่กระบวนการผลิต	1. จัดเวลาพักเบรกให้พนักงาน
2. วัตถุดิบ (Material)	1. วัตถุดิบในการผลิตมีเหง้ามันปะปนเข้ามา ซึ่ง เหง้ามันมีความแข็งมากทำให้ใบโม่เสียหาย 2. วัสดุที่ใช้ทำใบโม่มีความแข็งแรงต่ำ	1. เพิ่มพนักงานในการคัดแยกเหง้ามัน 2. ออกแบบใบโม่ให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น
3. วิธีการ (Method)	1. ใช้คนในการคัดแยกเหง้ามันและสิ่งเจือปน 2. เครื่องโม่ใช้ใบโม่ในการบดมันซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ (บาง)	1. เพิ่มจำนวนคนในการคัดแยกเหง้ามัน 2. ออกแบบใบโม่ให้มีความแข็งแรงมากขึ้น สำหรับย่อยบดเหง้ามัน

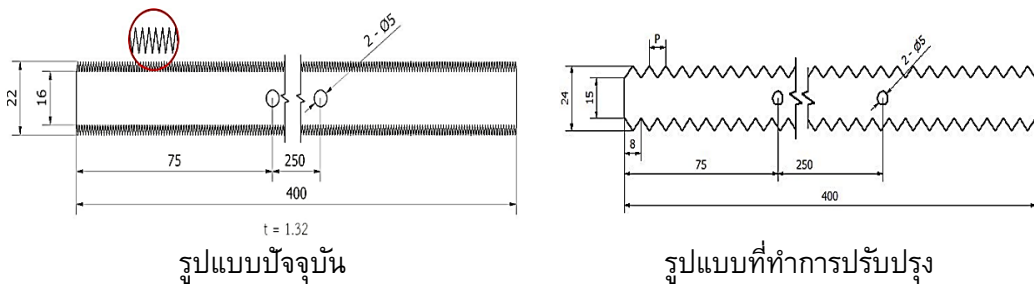
จากปัญหาการวิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนผังก้างปลา พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของใบโม่มีสาเหตุหลัก คือ คน (Man) พนักงานคัดแยกเหง้ามันเกิดความเมื่อยล้า ส่งผลให้มีเหง้ามันบางส่วนหลุดรอดเข้าสู่กระบวนการผลิต วัตถุดิบ (Material) เหง้ามันสำหรับที่หลุดเข้ามาในกระบวนการผลิต การคัดแยกออกได้ยาก วัสดุที่ใช้ทำใบโม่ และปัจจัยที่มีผลอีกตัว คือ วิธีการ (Method) การคัดแยกใช้คนในการคัดแยก จำนวนคนในการคัดแยกไม่เพียงพอ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้อายุการใช้งานของใบโม่มีสาเหตุหลักสั้นลง อีกทั้งส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการเปลี่ยนใบโม่มีสาเหตุหลัก จากข้อมูลปัจจุบัน โรงงานมีเครื่องโม่จำนวน 5 เครื่อง ใช้งาน 4 เครื่อง สำรอง 1 เครื่อง (ในกรณีเปลี่ยนใบโม่) และเครื่องโม่สับย่อยมันสำหรับ 1 เครื่องใช้ใบโม่มีสาเหตุหลักจำนวน 100 ใบ (ราคาใบละ 40 บาท) โดยอายุการใช้งานของใบโม่มีสาเหตุหลัก มีอายุการใช้งาน 48 ชั่วโมง (ใบโม่มีการใช้งาน 2 ด้าน ด้านละ 24 ชม.) เปลี่ยน 1 ครั้ง คิดเป็นต้นทุนค่าใบโม่ 4,000 บาท หรือ 60,000 บาทต่อเดือนต่อหนึ่งเครื่องโม่

คณะวิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาปรับปรุงรูปแบบใบโม่มีสาเหตุหลัก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของใบโม่เดิมมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น

4.5 การปรับปรุงกระบวนการผลิต

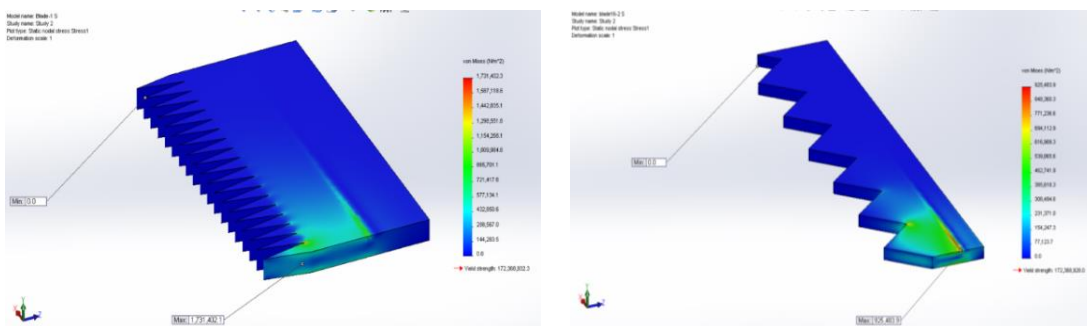
จากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยแผนผังก้างปลา อายุการใช้งานใบโม่สั้น มีสาเหตุมาจากใบโม่มีความแข็งแรงต่ำ ประกอบกับในกระบวนการผลิตไม่สามารถกำจัดเหง้ามันได้ทั้งหมด ส่งผลให้เหง้ามันที่หลุดเข้าสู่เครื่องโม่ ทำให้ใบโม่เกิดความเสียหาย คณะวิจัยทำการปรับปรุง

รูปแบบใบไม้มันสำปะหลัง โดยออกแบบรูปแบบใบไม้ให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ติดตั้งเพื่อใช้สำหรับ สับย่อยเหง้ามันที่หลุดรอดเข้ามาในเครื่องโม่สับย่อย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ใบไม้เกิดการสึกหรอ อายุการใช้งานสั้น โดยทำการปรับปรุงรูปร่างของฟันของใบไม้ ให้มีระยะห่างของฟันเพิ่มขึ้นหนึ่งเท่า คือ จากใบไม้รูปแบบเดิม 4 มม. เป็น 8 มม. และความหนาของใบไม้เพิ่มขึ้นจากเดิม 1.32 มม. เป็น 2 มม. ดังรูปที่ 6 โดยศึกษาจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับใบไม้ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 ลักษณะใบไม้ที่ใช้อยู่ปัจจุบัน และใบไม้ที่ทำการปรับปรุง

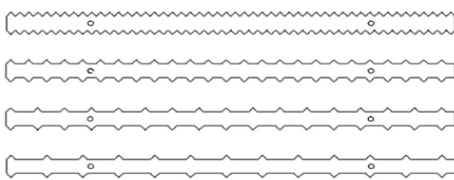
ในการศึกษาความแข็งแรงของใบไม้ด้วยการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น จากงานวิจัยของ Lomchangkum et al [9] ได้ทำการศึกษาคุนสมบัติทางกลของหัวมันสำปะหลัง ซึ่งผลการศึกษาคุนสมบัติทางกลของเหง้ามันสำปะหลังมีค่าความต้านทานความเค้นเฉือนสูงสุดคือ $1,860 \text{ N/m}^2$ ซึ่งนำมากำหนดค่าความเค้นเฉือนที่กระทำกับฟันของใบไม้ และกำหนดค่าวัสดุใบไม้ คือ SUS304 มีความเค้นคราก (Yield Strength) $172,368,932 \text{ N/m}^2$ ซึ่งผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของใบไม้แบบเดิมและใบไม้ที่ทำการปรับปรุง ดังรูปที่ 7



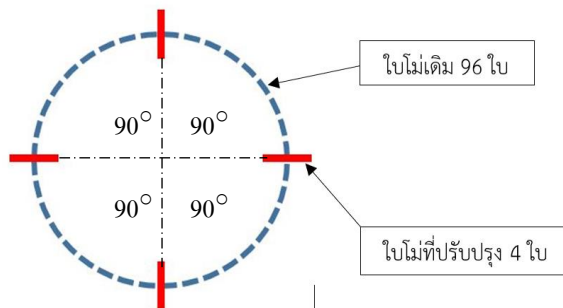
รูปที่ 7 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของใบไม้ ก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของใบไม้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใบไม้รูปแบบเดิมโดยกำหนดค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่กระทำกับใบไม้ คือ $1,860 \text{ N/m}^2$ ส่งผลให้เกิดค่าความเค้นที่ใบไม้ $1,731,402 \text{ N/m}^2$ ซึ่งจากการออกแบบปรับปรุงรูปแบบพื้นของใบไม้มันสำปะหลัง สามารถลดความเค้นที่เกิดขึ้นลดลงเหลือ $925,463 \text{ N/m}^2$ ลดลง $805,939 \text{ N/m}^2$ หรือคิดเป็นความเค้นที่เกิดขึ้นกับพื้นของใบไม้ที่ลดลง 46.54%

จากการระดมสมองร่วมกับสถานประกอบการนั้น ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่มีผลต่ออายุการใช้งานของใบไม้ คือ ช่องว่างระหว่างพื้นของใบไม้ ซึ่งจากการที่เหง้ามันหลุดรอดเข้าไปในเครื่องสับย่อยและเหง้ามันเกิดการติดอยู่ที่ใบไม้ ทำให้ใบไม้รับภาระโหดโดยตรง ส่งผลต่ออายุการใช้งาน คณะวิจัยมีแนวคิดในการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างพื้นของใบไม้ เพื่อให้เหง้ามันที่ถูกสับย่อยสามารถหลุดไหลผ่านช่องว่างระหว่างพื้นของใบไม้ ลดภาระโหดที่เกิดกับใบไม้ โดยทำการปรับปรุงรูปแบบพื้นของใบไม้ให้มีระยะห่างเพิ่มขึ้น ซึ่งพื้นของใบไม้รูปแบบเดิมมีขนาด 4 มม. โดยคณะวิจัยทำการเพิ่มระยะห่างของพื้นขึ้นครั้งละหนึ่งเท่า คือ 8 16 24 และ 32 มม. ดังรูปที่ 8 แทรกเข้ากับใบไม้มันสำปะหลังเดิม เพื่อศึกษาหาระยะห่างระหว่างพื้นไม้ที่ดีที่สุด และในการติดตั้งใบไม้ทั้งหมดจำนวน 100 ใบ ทำการติดตั้งใบไม้ใบไม้รูปแบบเดิม จำนวน 96 ใบ และติดตั้งใบไม้รูปแบบที่ปรับปรุง จำนวน 4 ใบ ดังรูปที่ 9 เพื่อให้เครื่องสับย่อยขณะทำงานหมุนสับย่อยอยู่ในสภาวะสมดุลไม่เกิดการเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ซึ่งอาจส่งผลให้เครื่องสับย่อยเกิดการเสียหาย อีกทั้งเพื่อให้ส่งผลต่อผลกระทบต่อนคุณภาพมันสำปะหลังที่ถูกสับย่อย



รูปที่ 8 ใบไม้ที่ทำการออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างพื้นไม้ที่ 8 16 24 และ 32 มม.



รูปที่ 9 การติดตั้งใบไม้จำนวนทั้งหมด 100 ใบ

4.6 สถิติในการศึกษาวิจัย

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way) โดยทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลักและผลกระทบจากความสัมพันธ์ร่วมของปัจจัยว่ามีอิทธิพลต่อค่าผลตอบแทนหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยกำหนดสมมติฐานระยะห่างระหว่างฟันของใบไม้ที่แตกต่างกัน จะมีผลกระทบต่อดำเนินการการใช้งานหรือไม่ จากข้อมูลผลการทดลองเปรียบเทียบค่าระยะห่างระหว่างฟันของใบไม้ที่ส่งผลอายุการใช้งาน จากใบไม้ทั้งหมด 4 รูปแบบ มีความแตกต่างกันหรือไม่ ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้ One-way ANOVA [10] ในการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของใบไม้

สมมติฐานงานวิจัย

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

H_1 : มีอย่างน้อย 1 μ ที่แตกต่างจากค่าอื่น

การวิเคราะห์ผลทางสถิติของระยะห่างระหว่างฟันใบไม้ที่ใช้งาน 4 รูปแบบ จะมีผลกระทบต่อดำเนินการการใช้งาน ได้ตั้งสมมติฐานไว้ดังนี้

H_0 : ระยะห่างระหว่างฟันใบไม้ 4 รูปแบบ ไม่มีผลต่อดำเนินการการใช้งานของใบไม้

H_1 : ระยะห่างระหว่างฟันใบไม้ 4 รูปแบบ มีผลต่อดำเนินการการใช้งานของใบไม้

5. ผลการดำเนินงาน

5.1 ผลการทดลองปรับปรุงลักษณะรูปร่างของใบไม้

ผลการดำเนินงานปรับปรุงลักษณะรูปร่างของใบไม้ที่มีระยะห่างของฟัน 8 16 24 และ 32 มม. เพื่อยืดอายุการใช้งานใบไม้ ซึ่งผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะห่างของใบไม้เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อายุการใช้งานใบไม้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลทดลองแสดงดังตารางที่ 2

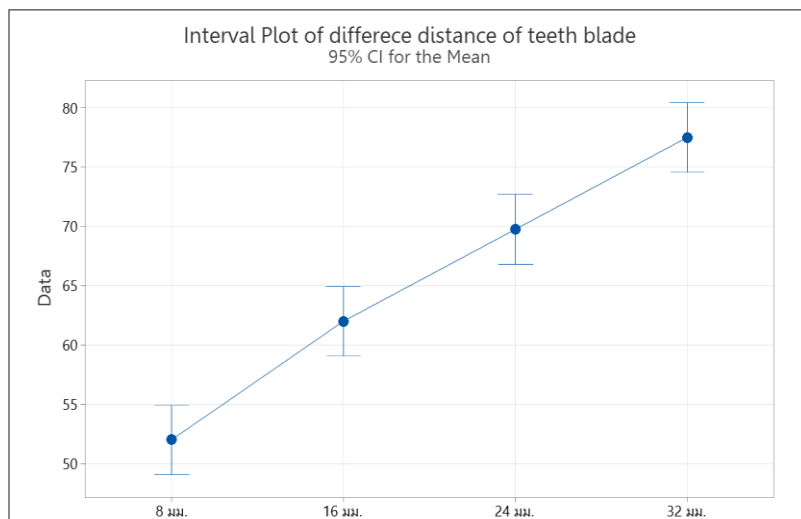
ตารางที่ 2 ผลการทดลองใช้งานใบไม้ที่ระยะห่างของใบไม้ที่แตกต่างกัน [หน่วย : ชั่วโมง]

ครั้งที่	อายุการใช้งานใบไม้ (ชม.)			
	8 มม.	16 มม.	24 มม.	32 มม.
1	50	60	69	78
2	56	67	71	75
3	53	60	72	78
4	49	61	67	79
Average	52	62	69.75	77.5
SD	3.16	3.37	2.22	1.73
Pooled StDev = 2.70416				

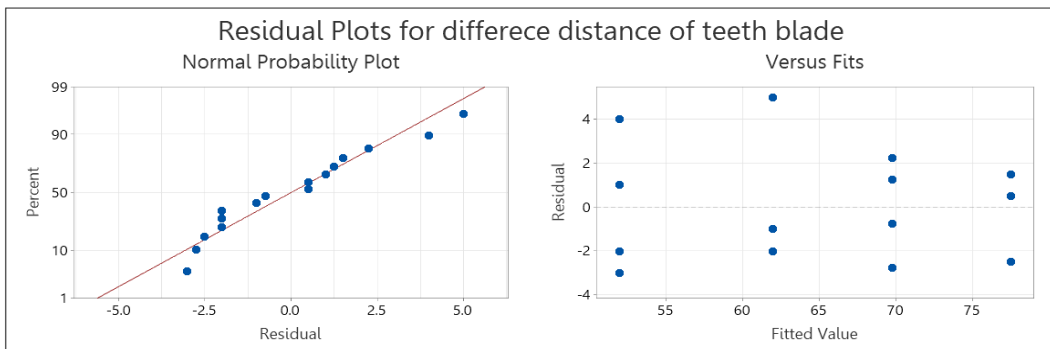
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอายุการใช้งานใบมี

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	3	1425.69	475.229	64.99	0.00
Error	12	87.75	7.313		
Total	15	1513.44			
R-sq = 94.20% R-sq(adj) = 92.75% R-sq(pred) = 89.69%					

จากผลการทดลองดังตารางที่ 2 อายุการใช้งานใบมีจากการใช้ใบมีที่มีระยะห่างของฟันที่แตกต่างกันถูกวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนซึ่งได้ผลดังตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าค่า P-value ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) แสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างฟันของใบมีส่งผลต่ออายุการใช้งานของใบมีอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจาก รูปที่ 10 พบว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างฟันระหว่างช่วง 8 มม. ถึง 32 มม. จะส่งผลให้อายุการใช้งานใบมีสูงขึ้นตามลำดับ โดยที่ใบมีที่มีระยะห่างระหว่างฟันที่ 32 มม. มีอายุการใช้งานนานที่สุด



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานของใบมีและระยะห่างระหว่างฟันของใบมี



รูปที่ 11 ส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลสำหรับอายุการใช้งานไบโม

จากรูปที่ 11 การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างจากผลการทดลองค่าอายุการใช้งานไบโม ไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น ซึ่งเห็นว่าข้อมูลส่วนตกค้างของผลตอบมีการกระจายตัวแบบปกติ จุดของส่วนตกค้างบนกราฟเรียงตัวกันมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ปกติ ในขณะที่ Versus Fits จุดกระจายตัวเท่า ๆ กันรอบค่า 0 และ Versus Order มีการกระจายตัวโดยไม่มีรูปแบบใด ๆ แสดงว่าข้อมูลเป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้นทางสถิติ

5.2 มูลค่าการสูญเสียที่ลดลง

มูลค่าการสูญเสียในกระบวนการโมสับย่อยมันสำปะหลัง จากเดิม การใช้ไบโมรูปแบบเดิมในกระบวนการโมสับย่อยมันสำปะหลัง ใช้ไบโมทั้งหมด 100 ใบ (ราคาใบละ 40 บาท) หลังปรับปรุงกระบวนการโมสับย่อยมันสำปะหลัง โดยการเปลี่ยนไบโม จำนวน 4 ใบ (ราคาใบละ 200 บาท) เป็นรูปแบบที่ทำการปรับปรุง (ระยะห่างระหว่างฟัน 32 มม.) ใ้ร่วมกับไบโมแบบเดิม จำนวน 96 ใบ สามารถลดต้นทุนการสูญเสีย คิดเป็นมูลค่า 16,863 บาทต่อเดือน ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบอายุการใช้งานไบโมเดิมกับอายุการใช้งานไบโมที่ทำการออกแบบ (32 มม.)

อายุการใช้งานไบโม (ชม.)		
ไบโมแบบเดิม	ไบโมแบบใหม่ (32 มม.)	อายุการใช้งานเพิ่มขึ้น
48	77.50	29.5 (61.46%)

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบต้นทุนใบไม้ก่อนและหลังปรับปรุง

รายละเอียด	ต้นทุนใบไม้ต่อครั้ง (100 ใบ)	อายุการใช้งาน	ต้นทุน/เดือน (24 ชม. x 30 วัน)
ก่อนปรับปรุง	100 ใบ x 40 บาท = 4,000 บาท	48 ชม.	60,000 บาท
หลังปรับปรุง	(96 ใบ x 40 บาท)+(4 ใบ x 200 บาท) = 4,640 บาท	77.5 ชม.	43,107 บาท
ต้นทุนที่ลดลง			16,863 บาท

6. สรุปผลการวิจัย

ผลการดำเนินงานวิจัยสามารถลดการสูญเสียในกระบวนการผลิตแป้งมัน โดยใบไม้ที่มีระยะห่างระหว่างฟันไม้ที่ 32 มม. มีอายุการใช้งานสูงสุด 77.5 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบใบไม้แบบเดิม 48 ชั่วโมง สามารถเพิ่มขึ้นอายุการใช้งาน 29.5 ชั่วโมง หรือคิดเป็นอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น 61.46% และสามารถลดต้นทุนการสูญเสียของใบไม้ลงจากเดิม 60,000 บาทต่อเดือน ลดลงเหลือ 43,107 บาทต่อเดือน สามารถลดต้นทุนการสูญเสียใบไม้ลง 16,893 บาทต่อเดือนต่อเครื่อง

7. ข้อเสนอแนะ

แนวทางการวิจัยในอนาคต ควรมีการศึกษาจำนวนของใบไม้สำหรับสับย่อยแห้งมัน ติดตั้งจำนวนเพิ่มขึ้นเป็น จำนวน 6 ใบ 8 ใบ และ 16 ใบ ที่มีผลต่ออายุการใช้งานใบไม้ทั้งหมด และควรนำหลักการ Image Processing เข้ามาประยุกต์ใช้ในการคัดแยกแห้งมันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดแยกแห้งมัน

References

- [1] Office of agricultural economics. Cassava cultivation information [Internet]. 2022 [cited 2022 Jul 18]. Available from: <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B1%E0%B8%A7%E0%B9%80%E0%B8%A3%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%99%2065.pdf>. (In Thai)
- [2] Thai cassava products factory association. Export value tapioca starch 2022 [Internet]. 2022 [cited 2022 Jul 18]. Available from: https://www.ditp.go.th /contents_attach/789552 /789552.pdf. (In Thai)
- [3] Cassava starch production process [Internet]. 2022 [cited 2022 Jul 18]. Available from: <http://www.thailandtapiocastarch.net /technology-detail/4/3/> (In Thai)

- [4] Banjaprayoonsak L. The cost reduction in tapioca starch processing of Siam produce (1994) Co., Ltd: case study in Kalasin branch. [Master of business administration college of graduate study in management]. Khon Kaen, Thailand: Khon Kaen University; 2018. (In Thai)
- [5] Moolla P. Increasing efficiency of the tapioca starch production process using clean technology concept: a case study of J. Charoen Marketing Company Limited. Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal 2019;12(1):40-53. (In Thai)
- [6] Khambunlue C, Klaiklain N. Loss reduction in the tapioca starch production process: a case study of a factory. The 6th Rajamangala Manufacturing and Management Technology Conference; 2021 Sep 1-3; Prachuap Khiri Khan, Thailand. p. 82-8. (In Thai)
- [7] Sunseang T. Waste reduction in injection process case study: black dot [Master of Engineering Management]. Bangkok, Thailand: Dhurakij Pundit University; 2014. (In Thai)
- [8] Woarawichai C, Wirotrattanaphaphisan K, Thanasuptawee U, Wongkhao A. Method improvement in punch insert for part case gear: a case study in an aluminium die casting company. Kasem Bundit Engineering Journal 2024;14(1):31-47. (In Thai)
- [9] Lomchangkum C, Junsiri C, Kudajan S, Laloon K. A study on the mechanical characteristics of cassava tuber cutter. International Journal of Agricultural Technology 2020;16(1):63-76. (In Thai)
- [10] Jairtalawanich S. Design and development a sliced bamboo-shoots cutter. Kasem Bundit Engineering Journal 2021;11(3):38-55. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ชยันต์ คำบรรลือ อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา
วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
โทรศัพท์ 055-515900 Email: Chayaii1976@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: Productivity Improvement and Tool and Die Design



ปริยานุช เมมฉาย อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
โทรศัพท์ 055-515900 Email: priyanuch.me50@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: Productivity Improvement and Safety Engineering



อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
โทรศัพท์ 055-515900 Email: t.ukrit@edu.rmutl.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: Productivity Improvement and Design of Experiments



ธงชัย เบ็ญจลักษณ์ อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
โทรศัพท์ 055-515900 Email: Benjurlux@rmutl.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: Productivity Improvement and Preventive Maintenance



ธัญญ์นรี พรไพโรเพชร อาจารย์ประจำหลักสูตรบริหารธุรกิจและ
ศิลปศาสตร์ สาขาสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ตาก โทรศัพท์ 055-515900 Email: Pordee28@windowslive.com
งานวิจัยที่สนใจ: Cost Budget and Products Designed

Article History:

Received: May 31, 2024

Revised: August 12, 2024

Accepted: August 15, 2024

การวิเคราะห์แนวทางการพัฒนาการตรวจสอบและแจ้งเตือน
การรักษาความมั่นคงปลอดภัยของระบบปฏิบัติการด้วยการประยุกต์ใช้
โมเดลอโตมาตา

**ANALYZING AUDIT DEVELOPMENT GUIDELINES AND NOTIFYING THE
OPERATING SYSTEM OF SECURITY MAINTENANCE BY APPLYING
THE AUTOMATA MODEL**

ทิภาพร ศุภมิตร¹ สุวิทย์ วงศ์คุ้มสิน² ชนะธิป ชำรงวิทยภาคย์³ และ อิตติศักดิ์ เมืองสง⁴
^{1,2,3,4}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
60 ถนนร่มเกล้า แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510,
¹tipaporn.sup@kbu.ac.th, ²suwit@kbu.ac.th, ³chanatip.vv@gmail.com, ⁴ittisak.ms@gmail.com

Tipaporn Supamid¹, Suwit Wongkumsin², Chanatip Tumrongwittayapak³
and Ittisak Muangsong⁴

^{1,2,3,4}Lecturer, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering,
Kasem Bundit University, 60 Romklao Rd, Minburi, Bangkok 10510, Thailand,
¹tipaporn.sup@kbu.ac.th, ²suwit@kbu.ac.th, ³chanatip.vv@gmail.com, ⁴ittisak.ms@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาบริบท ปัญหาและสถานการณ์ความมั่นคงปลอดภัยของระบบปฏิบัติการเพื่อพัฒนาวิธีการตรวจสอบ เฝ้าระวัง และแจ้งเตือนระดับความมั่นคงปลอดภัยของระบบปฏิบัติการ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยคือ การวิเคราะห์ข้อมูล ค่าความถี่ คำร้อยละ คำเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลลัพธ์การวิจัยคือ ส่วนที่ 1 การทดสอบและการตรวจสอบของระบบปฏิบัติการ พบว่าการจัดการข้อมูลการทดสอบ 4.98 เปอร์เซนต์ ส่วนที่ 2 การวิเคราะห์และการรายงาน 4.93 เปอร์เซนต์ ส่วนที่ 3 วิธีการแจ้งเตือน 4.98 เปอร์เซนต์ และส่วนที่ 4 การวิเคราะห์แนวทางการพัฒนาการตรวจสอบ และแจ้งเตือนการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของระบบปฏิบัติการด้วยการประยุกต์ใช้โมเดลอโตมาตา พบว่าอยู่ในระดับที่ดีอย่างมีนัยสำคัญ
คำสำคัญ: การตรวจสอบ, การรักษาความมั่นคงปลอดภัย, ระบบปฏิบัติการ, โมเดลอโตมาตา

ABSTRACT

This study aims to examine the challenges and state of operating system security to develop methods for monitoring, surveillance, and alerting. It uses data analysis techniques, including frequency, percentage, mean, and standard deviation. The findings are as follows: Part 1 shows data management testing at 4.98%. Part 2's analysis and reporting stand at 4.93%. Part 3's alerting methods account for 4.98%. Part 4 discusses developing inspection and alerting methods using automata models, which were found to be at a significantly high level.

KEYWORDS: Inspection, Security, Operating System, Automata Model.

1. บทนำ

การนำเทคโนโลยีทันสมัยมาใช้เพื่อเพิ่มความปลอดภัยของระบบปฏิบัติการเป็นสิ่งสำคัญในยุคดิจิทัล การวิจัยมุ่งเน้นแก้ปัญหาหลักในด้านความปลอดภัย เช่น การปรับปรุงระบบตรวจจับกิจกรรมเสี่ยงให้แม่นยำ เพิ่มความเร็วและประสิทธิภาพโดยไม่กระทบการทำงาน และพัฒนาความแม่นยำในการตรวจสอบเพื่อลดข้อผิดพลาด นอกจากนี้ การออกแบบระบบให้สามารถขยายตามความต้องการ (Scalable) และการใช้เทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึกในการจัดการข้อมูลเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อสร้างระบบปฏิบัติการที่มีความปลอดภัยและประสิทธิภาพสูง การทดสอบและตรวจสอบอย่างเหมาะสมช่วยรับรองความถูกต้องและประสิทธิภาพของระบบในการตรวจสอบความเสี่ยงและการละเมิดความปลอดภัยอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการแก้ไขปัญหาเหล่านี้จะนำไปสู่การพัฒนา ระบบปฏิบัติการที่มีความปลอดภัยและประสิทธิภาพสูงขึ้น การทดสอบและการตรวจสอบระบบปฏิบัติการอย่างเหมาะสมเป็นขั้นตอนสำคัญที่ช่วยให้สามารถรับรองความถูกต้องและประสิทธิภาพของระบบในการตรวจสอบและเฝ้าระวังความเสี่ยงและการละเมิดความปลอดภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นระบบอัตโนมัติมากยิ่งขึ้น

2. ทบทวนวรรณกรรม**2.1 ความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ หรือ Cybersecurity**

ความปลอดภัยทางไซเบอร์เป็นกรอบและโครงสร้างพื้นฐานทางเทคโนโลยีที่สร้างขึ้น เพื่อปกป้องข้อมูล เครือข่าย และอุปกรณ์การป้องกันคอมพิวเตอร์ขององค์กรส่วนใหญ่เกิดจากการใช้ระบบข้อมูลส่วนบุคคลและทรัพยากรภายในรวมถึงการปรับใช้ซอฟต์แวร์เพื่อป้องกันการเข้าถึงและการโจมตีโดยไม่ได้รับอนุญาต [1] โดยมุ่งเน้นไปที่การรักษาความปลอดภัยของสภาพแวดล้อมออนไลน์ ความสามารถด้านความปลอดภัยทางไซเบอร์ของพนักงานได้รับการปรับปรุงโดยครอบคลุมการตรวจสอบความเสียหายและอุปสรรคปัจจุบัน ความสามารถด้านความปลอดภัย

ทางไซเบอร์ของพนักงานได้รับการปรับปรุง ควบคู่ไปกับการตรวจสอบประเด็นและอุปสรรคนอกเหนือจากการแสวงหาแก้ไขปัญหาหรืออุปสรรคดังกล่าว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้คำแนะนำในการปรับปรุงความสามารถด้านความปลอดภัยทางไซเบอร์ของพนักงานการศึกษานี้ดำเนินการภายในสำนักงานคณะกรรมการการความปลอดภัยทางไซเบอร์แห่งชาติ (SCR.) การสอบสวนนี้ใช้วิธีการรวบรวมข้อมูลผ่านเอกสารและการสำรวจที่เกี่ยวข้องกับบุคลากรที่สำคัญ 7 คน แม้ว่าจะมีแนวทางในการเพิ่มทักษะความปลอดภัยทางไซเบอร์ แต่สิ่งสำคัญคือต้องมุ่งเน้นไปที่การศึกษาเพื่อปรับปรุงความเข้าใจและความรู้ในสาขานี้ควรจัดโปรแกรมการฝึกอบรมเพื่อกำหนดเป้าหมายการพัฒนาทักษะความปลอดภัยทางไซเบอร์สำหรับบุคลากรโดยเฉพาะการสนับสนุนและส่งเสริมการพัฒนาทักษะความปลอดภัยทางไซเบอร์ผ่านกิจกรรมต่าง ๆ เป็นสิ่งสำคัญในการจัดหาโอกาสและทรัพยากรที่จำเป็น ความท้าทายและอุปสรรคในการเพิ่มทักษะบุคลากรเป็นหลักรมาจากรายการข้อจำกัดทางการเงิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเด็นเกี่ยวกับต้นทุนที่เกินกว่าที่หน่วยงานไม่เพียงพอสำหรับบุคคลที่กระตือรือร้นที่จะพัฒนาความเชี่ยวชาญด้านความปลอดภัยทางไซเบอร์ ดังนั้นความพร้อมใช้งานของโปรแกรมการศึกษาที่ จำกัด ส่งผลให้ผู้เชี่ยวชาญขาดแคลนเช่นเดียวกับบุคลากรทางปัญญาภาคส่วนนี้โดดเด่นด้วยความขาดแคลนทรัพยากรและความเชี่ยวชาญที่จำเป็นสำหรับการบำรุงความสามารถด้านความปลอดภัยทางไซเบอร์ของบุคลากรที่สนใจ [2] นอกจากนี้การใช้เทคโนโลยีนี้ยังได้รับการยอมรับในขอบเขตของการวิจัยด้านความปลอดภัยของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ และสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมสารสนเทศอิเล็กทรอนิกส์ยังประสบความสำเร็จในการจัดการกับความท้าทายด้านความปลอดภัยโดยการใช้แนวคิดของพัลส์ที่เหมาะสมบนเวิร์กสเตชัน [3]

2.2 ความปลอดภัยของระบบปฏิบัติการ

การรักษาความปลอดภัยของระบบปฏิบัติการมีบทบาทสำคัญในการปกป้องข้อมูลและทรัพย์สินภายในระบบคอมพิวเตอร์ ดังนั้นความปลอดภัยโดยรวมของระบบข้อมูลองค์กรจึงขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของนโยบายความปลอดภัยที่นำไปใช้ภายในระบบปฏิบัติการเดียว เป็นข้อเท็จจริงที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่าระบบปฏิบัติการ Linux (OS) ไม่เพียงพอในฐานะอุปกรณ์รักษาความปลอดภัยที่ครอบคลุมโดยเน้นหลักคือการเสริมสร้างระบบปฏิบัติการจากการละเมิดโดยไม่ได้รับอนุญาต การโจมตีทางไซเบอร์ และการจัดการข้อมูลระบบปฏิบัติการทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในการทำงานของคอมพิวเตอร์ [4] รวมถึงการป้องกันระบบคอมพิวเตอร์เป็นหัวใจสำคัญของความน่าเชื่อถือในยุคดิจิทัล ซึ่งครอบคลุมการกำกับดูแลการเข้าถึงและการใช้งานทรัพยากรอย่างเหมาะสม เพื่อปกป้องข้อมูลจากการเข้าถึงหรือการแก้ไขโดยไม่ได้รับอนุญาต [5] มีหลักการสำคัญ 4 ประการในการรักษาความปลอดภัยข้อมูลดังต่อไปนี้ 1) การรักษาความลับ เป็นข้อมูลสามารถเข้าถึงได้เฉพาะบุคคลที่ได้รับอนุญาต 2) การรักษาความสมบูรณ์ เป็นการรับรองว่า

ข้อมูลไม่ถูกเปลี่ยนแปลงโดยไม่ได้รับอนุญาต 3) ความพร้อมใช้ เป็นข้อมูลและบริการพร้อมใช้งานเมื่อมีความต้องการ 4) การห้ามปฏิเสธความรับผิดชอบ ทั้งผู้ส่งและผู้รับไม่สามารถปฏิเสธการกระทำที่เกี่ยวข้องกับข้อมูล ดังนั้นการควบคุมความปลอดภัยในระบบคอมพิวเตอร์มี 5 ระดับหลักดังต่อไปนี้ 1) Audit เป็นการตรวจสอบว่าใครเป็นผู้ดำเนินการ 2) Integrity เป็นการกำหนดผู้ที่สามารถแก้ไขข้อมูล 3) Encryption เป็นการกำหนดผู้ที่สามารถดูข้อมูล 4) Authorization เป็นการกำหนดผู้ที่ได้รับอนุญาตเข้าถึงข้อมูล 5) Authentication เป็นการยืนยันตัวตนของผู้ใช้ ซึ่งการรวมกันของหลักการเหล่านี้สร้างระบบคอมพิวเตอร์ที่ปลอดภัยและเชื่อถือได้ โดยป้องกันการเข้าถึงและการแก้ไขข้อมูลโดยไม่ได้รับอนุญาต และรักษาความลับข้อมูลให้สูงสุด รวมถึงการปรับใช้และการบำรุงรักษามาตรการความปลอดภัยเหล่านี้ต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่องเพื่อรับมือกับภัยคุกคามในโลกดิจิทัลที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว [6]

2.3 ระบบปฏิบัติการ

ระบบปฏิบัติการ เป็นระบบซอฟต์แวร์ที่ทำหน้าที่จัดการอุปกรณ์ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์และเป็นแหล่งซอฟต์แวร์ และบริการทางด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แม้ว่าฟังก์ชันหลักที่ระบบปฏิบัติการถือว่าจำเป็นเกี่ยวข้องกับการกระจายทรัพยากรทั่วคอมพิวเตอร์เพื่อวัตถุประสงค์ในการให้บริการที่เกี่ยวข้องกับแอปพลิเคชันซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับการส่งข้อมูลและการจัดเก็บข้อมูลควบคู่ไปกับฮาร์ดแวร์ภาพประกอบของสิ่งนี้คือการส่งข้อมูลจากไฟล์ภาพเพื่อแสดงบนหน้าจอการถ่ายโอนข้อมูลไปยังและจากฮาร์ดดิสก์และการถ่ายถอดข้อมูลทั่วระบบตลอดจนกิจกรรมเครือข่ายเอาต์พุตเสียงไปยังลำโพงและการจัดสรรพื้นที่หน่วยความจำเพื่อตอบสนองต่อคำขอซอฟต์แวร์ ซึ่งการจัดสรรเวลาสำหรับการใช้โปรเซสเซอร์และการดำเนินการพร้อมกันของซอฟต์แวร์แอปพลิเคชันหลายโปรแกรมปัจจัยต่าง ๆ มีอิทธิพลต่อการรับรู้และการใช้ระบบรักษาความปลอดภัยคอมพิวเตอร์ของพนักงานภายในองค์กรผลการวิจัยถูกนำมาใช้เพื่อให้ความรู้แก่พนักงานเกี่ยวกับการใช้ระบบคอมพิวเตอร์ที่ปลอดภัยและเพื่อกำหนดมาตรการป้องกันภัยคุกคามตัวอย่างการศึกษาประกอบด้วยผู้ปฏิบัติงานคอมพิวเตอร์ 327 คนจากกลุ่มไทยราษฎร์ โดยใช้วิธีการสุ่มแบบแบ่งชั้น ซึ่งข้อมูลที่ได้รับการตรวจสอบผ่านการประยุกต์ใช้สถิติเชิงพรรณนาครอบคลุมความถี่ เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ย และความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตลอดจนสถิติเชิงอนุมาน ซึ่งรวมถึงการทดสอบ t-test, One-way ANOVA, LSD, และ Pearson's Correlation ตามเกณฑ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติอยู่ที่ 0.05 โดยการวิจัยระบุว่าผู้เข้าร่วมส่วนใหญ่ระบุว่าการทำงานในกองบรรณาธิการข่าวแม้จะได้รับการยอมรับอย่างเห็นได้ชัดในความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบคอมพิวเตอร์ [7] อย่างไรก็ตามนวัตกรรมด้านความปลอดภัยของระบบปฏิบัติการเป็นการมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มขีดความสามารถในด้านต่างๆ เช่น สภาพแวดล้อมการดำเนินการที่เชื่อถือได้ (TEE) ความปลอดภัยการจำลองเสมือน การออกแบบไมโครเคอร์เนล

สำหรับความปลอดภัยของเคอร์เนล และความปลอดภัยของแอปพลิเคชันแบบกระจาย นวัตกรรมเหล่านี้ รวมถึง Penglai, CloudVisor, ChCore และ PiXiu ใช้ประโยชน์จากการออกแบบร่วมกันของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ เพื่อให้การป้องกันที่แข็งแกร่งต่อภัยคุกคามความปลอดภัยที่หลากหลาย บทความนี้ยังทบทวนผลงานทางวิชาการที่สำคัญในแต่ละด้าน โดยนำเสนอภาพรวมที่ครอบคลุมเกี่ยวกับความก้าวหน้าในเทคโนโลยีความปลอดภัยของระบบปฏิบัติการ [8]

2.4 ออโตมาตา

ออโตมาตา (Automata) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักร มีการแบ่งออโตมาตาออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ ออโตมาตาจำกัดเชิงกำหนด (Deterministic Finite Automata) และ ออโตมาตาจำกัดเชิงไม่กำหนด (Non-Deterministic Finite Automata) [9] โดยมีลักษณะการทำงานดังนี้ 1) ออโตมาตาจำกัดเชิงกำหนด (DFA): สามารถรับสัญลักษณ์ตัวหนึ่งและเปลี่ยนสถานะไปยังสถานะที่กำหนดไว้ล่วงหน้าได้ 2) ออโตมาตาจำกัดเชิงไม่กำหนด (NFA): สามารถมีทางเลือกในการเปลี่ยนสถานะ และมีสถานะมากกว่าหนึ่งตัวเลือกความสามารถในการตัดสินใจถึงทางเลือกที่จะทำให้เครื่องทำงานจนจบและเลือกเปลี่ยนสถานะไปยังทางนั้น ดังนั้นการตัดสินใจแบบนี้ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสถานะเชิงไม่กำหนด (Nondeterministic State Transition) ทำให้ NFA สามารถทำงานได้ตลอดจนจบโดยที่สามารถตัดสินใจในการเปลี่ยนสถานะได้หลายทางเลือก ซึ่งมีความยืดหยุ่นที่แตกต่างจาก DFA ที่มีการกำหนดทางเดียวในการเปลี่ยนสถานะ เพื่อการใช้งานออโตมาตาเชิงชนิดตัวเลขในรูปแบบต่าง ๆ สามารถช่วยในการแก้ปัญหาและวิเคราะห์การทำงานของระบบที่มีลักษณะการเคลื่อนไหวตามขั้นตอนที่แน่นอนหรือไม่แน่นอนตามลำดับขั้นตอนที่กำหนด [10] อย่างไรก็ตามการปฏิบัติงานทางด้านองค์กรและเทคโนโลยีมีความเกี่ยวข้องกับการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการจัดการและปฏิบัติการปฏิบัติงานทั้งหมดขององค์กร ขั้นตอนทางด้านซอฟต์แวร์มีความสำคัญในการให้บริการและผลิตภัณฑ์ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการและความพึงพอใจของผู้ใช้งาน การนำเครื่องมือทางซอฟต์แวร์มาใช้ในการกระบวนการพัฒนาและทดสอบซอฟต์แวร์เป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพและความเสถียรของระบบที่สร้างขึ้น ดังนั้นการศึกษาที่ใช้การทดสอบอัตโนมัติบนซอฟต์แวร์เว็บแอปพลิเคชันได้เป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากมีผลกระทบที่มีนัยสำคัญต่อกระบวนการพัฒนา การใช้การทดสอบอัตโนมัติช่วยลดระยะเวลาทดสอบ ลดทรัพยากรที่ใช้ (เช่น แรงงานคน) และลดความผิดพลาดที่เกิดจากการทดสอบด้วยมือ ผลลัพธ์ยังพบว่าเวลาที่ใช้ในการทดสอบอัตโนมัติน้อยกว่าเวลาที่ใช้ในการทดสอบด้วยมือ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการทดสอบ ซึ่งการใช้การทดสอบอัตโนมัติมีประโยชน์มากยิ่งขึ้นในกรณีที่ต้องทำซ้ำการทดสอบหลายครั้ง นอกจากนี้ การรายงานผลการทดสอบที่ได้รับผลลัพธ์ถูกต้องและรวดเร็ว

ช่วยให้ทีมพัฒนามีข้อมูลที่น่าเชื่อถือในการติดตามว่าซอฟต์แวร์ทำงานถูกต้องและครบถ้วนตามข้อกำหนดหรือไม่

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Research) โดยผู้วิจัยศึกษา และรวบรวมข้อมูลจาก 2 แหล่งหลัก [11, 12] โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมข้อมูล

1) การเตรียมข้อมูล เป็นรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของระบบปฏิบัติการของชนิดของข้อมูลที่บันทึก (เวลาและวันที่เกิดเหตุการณ์, ประเภทของกิจกรรม (เช่น เข้าสู่ระบบ, เปลี่ยนแปลงไฟล์, การเชื่อมต่อเครือข่าย) ผู้ใช้หรือแอปพลิเคชันที่ทำกิจกรรม, ที่มาของกิจกรรม (IP address, ชื่อเครื่องคอมพิวเตอร์) เช่น บันทึกการเข้าถึงระบบ (บันทึกเป็นไฟล์ log ที่สามารถอ่านได้ง่าย และเป็นไฟล์ที่มีโครงสร้างที่ชัดเจน, ใช้รูปแบบที่สามารถนำเข้าสู่ระบบการจัดการ log อัตโนมัติได้ เป็นต้น) การกำหนดการใช้งานที่ผิดปกติ (anomalies) หรือการโจมตีที่เป็นไปได้ และทำการจัดรูปแบบข้อมูลและทำความสะอาดข้อมูลเพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับการนำเข้าเข้าสู่โมเดล รวมถึงการรวบรวมข้อมูลการใช้งานที่ผิดปกติ (Anomaly Detection) วัตถุประสงค์เพื่อการตรวจจับและรายงานเหตุการณ์ที่อาจเป็นสัญญาณของการโจมตีหรือกิจกรรมที่ไม่ปกติ

2) การเลือกและสร้างโมเดล เป็นการเลือกและออกแบบโมเดลที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบและเฝ้าระวังความปลอดภัย โดยการใช้วิธีการตรวจจับการบุกรุก (Intrusion Detection Systems - IDS) ในรูปแบบ Deep Neural Networks (DNNs) เพื่อเป็นการใช้ในการสร้างระบบตรวจจับการบุกรุกที่มีความสามารถในการตรวจจับภัยคุกคามที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น การโจมตีด้วยการทำซ้ำๆ (replay attacks) หรือการโจมตีแบบไม่ทราบชื่อ (zero-day attacks) โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีความลึกมากเพื่อจดจำและตรวจจับลักษณะการโจมตีที่ไม่เคยเห็นมาก่อนได้

3) การฝึกโมเดล เป็นการนำข้อมูลที่เตรียมไว้เพื่อฝึกโมเดลออกมา โดยการใช้เทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึก โดยผู้วิจัยใช้ข้อมูลทั้งหมด 5 ชุด โดยผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลดังต่อไปนี้

- ชุดฝึกข้อมูลการสร้างโมเดลที่เรียนรู้จากข้อมูล (Supervised Learning) 5 ชุด จากชุดข้อมูลทั้งหมด (เช่น 100% ของข้อมูล)

- ชุดฝึกโมเดลเป็นลำดับเวลา (Time Series Training) 2 ชุด แบ่งข้อมูลชุดทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อย 2 ใน 3 ของแต่ละชุดฝึก

```

from sklearn.model_selection import train_test_split

# ข้อมูลที่จะแบ่งเป็นชุดทดสอบและชุดฝึก
X_all = your_data
y_all = your_targets

# แบ่งชุดทั้งหมดเป็น 5 ชุด
X_train_all, X_test_all, y_train_all, y_test_all = train_test_split(X_all, y_all, test_size=0.2)

# วนลูปเพื่อแบ่งแต่ละชุดทดสอบเป็น 3 ใน 2
for X_test, y_test in zip(X_test_all, y_test_all):
    X_test_split1, X_test_split2, y_test_split1, y_test_split2 = train_test_split(X_test, y_test, test_size=0.2)

# X_test_split2, y_test_split2 คือชุดทดสอบ
# X_test_split1, y_test_split1 คือชุดฝึก

```

รูปที่ 1 โปรแกรมแสดงการแบ่งชุดฝึกข้อมูล

จากรูปที่ 1 โปรแกรมแสดงการแบ่งชุดฝึกข้อมูล กล่าวคือ เมื่อ train_test_split ใช้ในการแบ่งชุดข้อมูลทั้งหมด (X_all, y_all) เป็น X_train_all, X_test_all, y_train_all, y_test_all ซึ่งจะได้ชุดที่แบ่งไว้สำหรับทดสอบและฝึกทั้งหมด (5 ชุด) และรวมถึงการวนลูป for จะทำการแบ่งแต่ละชุดทดสอบ (X_test, y_test) เป็น 2 ใน 3 ของชุดทดสอบ (X_test_split2, y_test_split2) และส่วนที่เหลือเป็นชุดฝึก (X_test_split1, y_test_split1)

4) การประเมินและปรับปรุง เป็นทดสอบโมเดลที่ได้ฝึกแล้วโดยใช้ชุดข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อน (Test Data) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของโมเดล และปรับปรุงโมเดลตามผลการประเมินเพื่อให้มีประสิทธิภาพและความแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยใช้โปรแกรมแจกแจงรายละเอียดดังต่อไปนี้

<pre> # แปลงข้อมูลเป็น DataFrame df = pd.DataFrame(data) # คำนวณค่าความถี่ (Frequency) frequency = df['value'].value_counts() # คำนวณค่าร้อยละ (Percentage) percentage = df['value'].value_counts(normalize=True) * 100 # คำนวณค่าเฉลี่ย (Mean) mean_value = np.mean(df['value']) </pre>	<pre> # คำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) std_deviation = np.std(df['value']) # แสดงผลลัพธ์ print("ค่าความถี่:") print(frequency) print("\nค่าร้อยละ:") print(fpercentage) print("\nค่าเฉลี่ย:") print(fmean_value) print("\nค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน:") </pre>
---	---

รูปที่ 2 โปรแกรมแสดงการการประเมินและปรับปรุง

จากรูปที่ 2 โปรแกรมแสดงการการประเมินและปรับปรุงสามารถแยกชั้นส่วนได้ดังนี้
 (1) value_counts() ใช้สำหรับคำนวณค่าความถี่ของข้อมูลในคอลัมน์ของค่า value ใน DataFrame 'df'
 (2) normalize=True ใน value_counts() จะทำให้ได้ค่าร้อยละ (3) np.mean() ใช้ในการคำนวณ

ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในคอลัมน์ของ value (4) np.std() ใช้ในการคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลในคอลัมน์ของ value

5) การทดสอบและการนำไปใช้งาน เป็นการทดสอบโมเดลที่ปรับปรุงแล้วในระบบจริง เพื่อตรวจสอบว่ามันสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการหรือไม่ และการตรวจสอบความเรียบร้อยของการตรวจสอบและการแจ้งเตือน

6) การบำรุงรักษาและการอัปเดต เป็นการปรับปรุงและอัปเดตโมเดลอัตโนมัติอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้สามารถรับมือกับความเปลี่ยนแปลงในสภาพแวดล้อมและการโจมตีที่เปลี่ยนไปได้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือ การวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยในครั้งนี้ เพื่อเป็นการตอบวัตถุประสงค์และทดสอบสมมุติฐานการวิจัยคือ การวิเคราะห์ระดับความพร้อมด้านความมั่นคงปลอดภัยของระบบปฏิบัติการ และด้านความมั่นคงปลอดภัยทางด้านสารสนเทศในศูนย์ไซเบอร์ซีคิวริตี้ ดังนั้นสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะประกอบด้วยสมการดังต่อไปนี้

ค่าความถี่ (Frequency) โดยใช้สูตร

$$f = \frac{n}{T} \quad (1)$$

โดยที่ f คือ ค่าความถี่ (frequency) n คือ จำนวนครั้งที่เหตุการณ์เกิดขึ้น และ T คือ ช่วงเวลาหรือจำนวนทั้งหมดของเหตุการณ์ที่ถูกลบ

ค่าร้อยละ (Percentage) โดยใช้สูตร

$$\text{Percentage} = \frac{\text{ส่วนหนึ่ง}}{\text{จำนวนทั้งหมด}} \times 100 \quad (2)$$

ค่าเฉลี่ย (Mean) โดยใช้สูตร

$$\text{Mean} = \frac{\sum \text{data}}{n} \quad (3)$$

โดยที่ $\sum \text{data}$ หมายถึง ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด และ n หมายถึง จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) โดยใช้สูตร

$$\text{Variance} = \frac{\sum (x_i - \text{Mean})^2}{N} \quad (4)$$

โดยที่ x_i คือ ค่าข้อมูลแต่ละตัวในชุดข้อมูล และ Mean คือ ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูล และ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

3.3 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้มีการดำเนินการโดยใช้เครื่องมือดังต่อไปนี้ SPSS, MATLAB, และ WE-KA เพื่อวิเคราะห์ค่าทางสถิติและความสัมพันธ์ทางสถิติด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% และความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ 0.05% สำหรับการตัดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานของการศึกษาดังนั้นกระบวนการวิจัยประกอบด้วย การออกแบบการวิจัย, ขั้นตอนการวิจัย, เครื่องมือและอุปกรณ์, กลุ่มตัวอย่าง, การเก็บข้อมูล, การวิเคราะห์ข้อมูล, และการกำหนดเกณฑ์การประเมิน พร้อมนำเสนอวิธีการประเมินข้อมูล [13-15]

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลทางการพัฒนาการตรวจสอบ และแจ้งเตือนการรักษาความมั่นคงปลอดภัย มีขั้นตอนที่สำคัญ คือ การรวบรวมข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ เช่น logs และ reports, การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเนื้อหาเพื่อค้นหาแนวโน้มและปัญหาที่เกิดขึ้น, และการสร้างรายงานเพื่อการแจ้งเตือนและตัดสินใจทางธุรกิจอย่างมีประสิทธิภาพ. ขั้นตอนนี้ช่วยเพิ่มความมั่นใจในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของระบบสารสนเทศและเทคโนโลยีขององค์กรได้ดีขึ้น

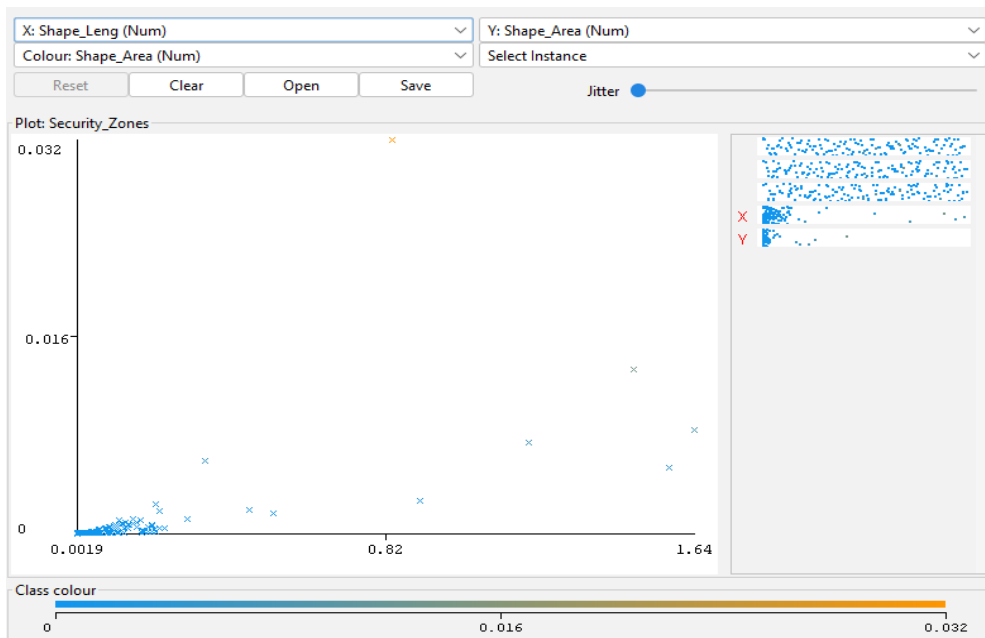
4. ผลการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการทดสอบและการตรวจสอบระบบปฏิบัติการ เพื่อการรับรองการทำงานได้ตามที่กำหนดไว้ และการตรวจสอบความเรียบร้อยของการตรวจสอบ และการแจ้งเตือนของระบบปฏิบัติการได้อย่างถูกต้อง โดยสามารถสรุปผลการวิจัยออกเป็น 4 ส่วนดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1: การทดสอบและการตรวจสอบของระบบปฏิบัติการ

กระบวนการที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพของระบบปฏิบัติการ โดยใช้โปรแกรม WE-KA เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูล [15] เพื่อมุ่งเน้นเกี่ยวกับการทดสอบฟังก์ชันต่าง ๆ

ตามรายละเอียดของการทดสอบระบบปฏิบัติการ ดังต่อไปนี้ การวางแผนและการออกแบบ การทดสอบ, การเลือกเครื่องมือและเทคโนโลยีที่เหมาะสม,การจัดการข้อมูลการทดสอบ, การทำงานและการประเมินผล, การจัดการการแจ้งเตือนและการแก้ไขข้อผิดพลาดและการเรียนรู้และการพัฒนา สามารถสรุปผลการทดสอบได้ตามรูปที่ 3



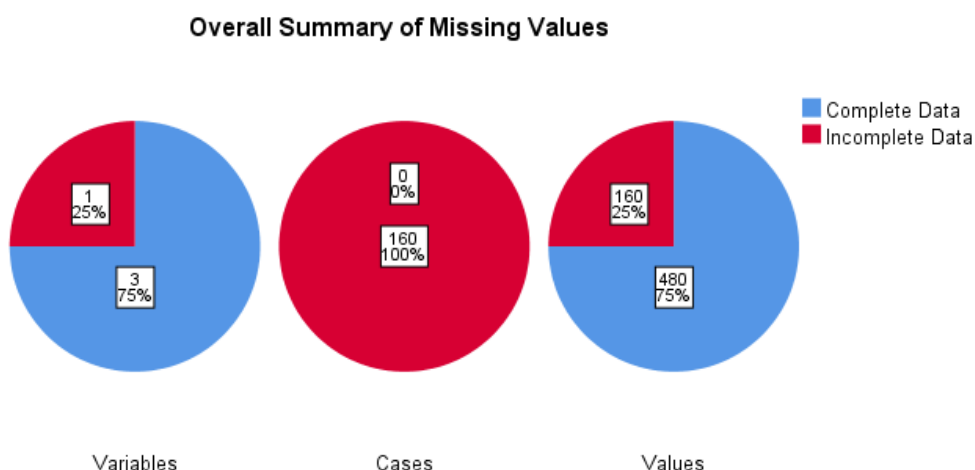
รูปที่ 3 การทดสอบและการตรวจสอบของระบบปฏิบัติการ เพื่อการรับรองการทำงานได้ตามที่กำหนดไว้

จากรูปที่ 3 การทดสอบและการตรวจสอบของระบบปฏิบัติการ เพื่อการรับรองการทำงานได้ตามที่กำหนดไว้ พบว่า การวางแผนและการออกแบบการทดสอบ 4.54 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการวางแผนการทดสอบอย่างรอบคอบและมีระเบียบ รวมถึงการกำหนดวัตถุประสงค์ของการทดสอบ เช่น การทดสอบฟังก์ชันเฉพาะหรือการทดสอบอินทิเกรตแบบทั่วไป การวางแผนที่เหมาะสมจะช่วยให้การทดสอบเป็นไปอย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ขณะที่ การเลือกเครื่องมือและเทคโนโลยีที่เหมาะสม 4.85 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการเลือกเครื่องมือและเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบเป็นสิ่งสำคัญ เช่น เครื่องมือที่ช่วยในการสร้างการทดสอบอัตโนมัติหรือเทคโนโลยีที่ช่วยในการจำลองสภาพแวดล้อมที่ต่างจากการใช้งานได้อย่างปกติมากยิ่งขึ้น ในขณะที่ การจัดการข้อมูลการทดสอบ 4.98 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการจัดการข้อมูลการทดสอบอย่างเหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้สามารถเก็บรวบรวมผลลัพธ์การทดสอบได้อย่างเรียบร้อยและ

สามารถใช้ข้อมูลเหล่านั้นในการประเมินและปรับปรุงระบบต่อไป ในขณะที่การทำงานและการประเมินผล 4.77 เปอร์เซนต์ เนื่องจาก การทำงานร่วมกับทีมพัฒนาและทีมทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่ากระบวนการทดสอบถูกต้องและเป็นไปตามแผน เรียกใช้ข้อมูลที่ได้รับจากการทดสอบเพื่อประเมินความสมบูรณ์และความพร้อมใช้งานของระบบได้ดีมากยิ่งขึ้น และการจัดการการแจ้งเตือนและการแก้ไขข้อผิดพลาด 4.85 เปอร์เซนต์ เนื่องจากการจัดการการแจ้งเตือนและการจัดการข้อผิดพลาดในระหว่างการทดสอบและการดำเนินการเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้สามารถแก้ไขปัญหาที่พบอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการเรียนรู้และการพัฒนา 4.56 เปอร์เซนต์ เนื่องจากการใช้ประสบการณ์จากการทดลองและการประเมินผลเพื่อปรับปรุงกระบวนการทดสอบในอนาคต โดยการปรับปรุงเทคนิคการทดสอบและการใช้เครื่องมือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน

ส่วนที่ 2: การตรวจสอบความเรียบร้อยของการตรวจสอบ

การตรวจสอบความเรียบร้อยของการตรวจสอบ เป็นกระบวนการที่มุ่งเน้นการตรวจสอบและยืนยันว่ากระบวนการตรวจสอบเองถูกดำเนินการอย่างถูกต้องและเป็นประสิทธิภาพตามที่กำหนดไว้หรือไม่ เช่นเดียวกับกระบวนการทดสอบและการตรวจสอบระบบปฏิบัติการที่ได้กล่าวไว้ตามส่วนที่ 1 ซึ่งการตรวจสอบมีดังต่อไปนี้ การเปรียบเทียบผลลัพธ์, การตรวจสอบเงื่อนไขการทดสอบ, การตรวจสอบข้อมูลเข้าระบบ, การวิเคราะห์และการรายงาน และการตรวจสอบข้อกำหนดและมาตรฐาน โดยสามารถสรุปผลการทดสอบได้ตามรูปที่ 4

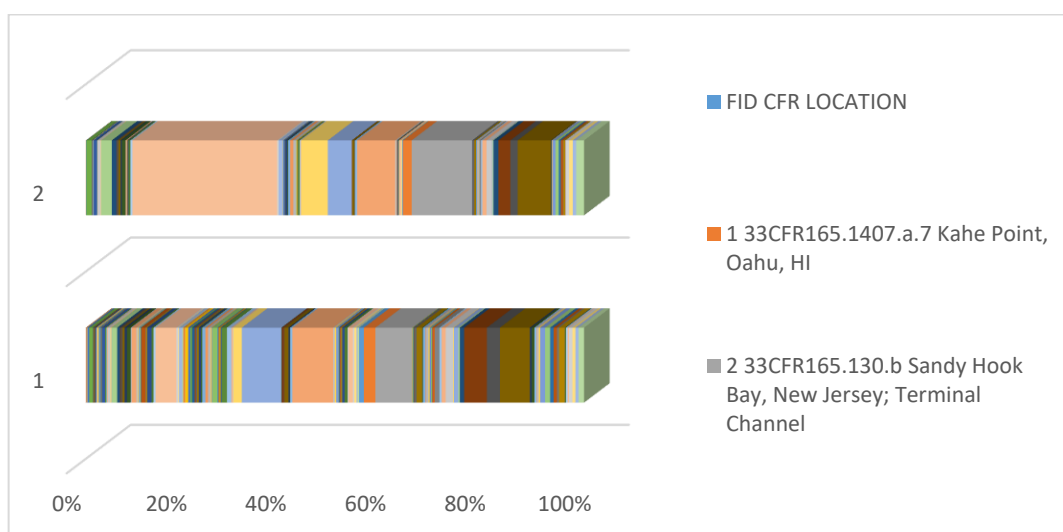


รูปที่ 4 การตรวจสอบความเรียบร้อยของการตรวจสอบ

จากรูปที่ 4 การตรวจสอบความเรียบร้อยของการตรวจสอบ พบว่า การตรวจสอบความเรียบร้อยของระบบประกอบด้วยหลายขั้นตอนที่สำคัญ เพื่อให้แน่ใจว่าระบบทำงานตามมาตรฐานและความคาดหวังที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้ การเปรียบเทียบผลลัพธ์ 4.87% ซึ่งให้ถึงถึงความจำเป็นในการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการตรวจสอบกับผลลัพธ์ที่คาดหวัง เพื่อยืนยันความสอดคล้องและความถูกต้อง ตามด้วยการตรวจสอบเงื่อนไขการทดสอบที่ 4.64% ซึ่งเน้นการตั้งเงื่อนไขทดสอบให้เหมาะสมและครอบคลุมทุกแง่มุมที่จำเป็น การตรวจสอบข้อมูลเข้าระบบที่ 4.78% ยืนยันว่าข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบถูกต้องและเกี่ยวข้อง ขณะที่การวิเคราะห์และการรายงานที่ 4.93% คือการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลลัพธ์เพื่อระบุและแก้ไขปัญหาที่พบ และการตรวจสอบข้อกำหนดและมาตรฐานที่ 4.82% เพื่อยืนยันว่าการทดสอบปฏิบัติตามแนวทางและมาตรฐานที่กำหนดไว้ เหล่านี้รวมกันช่วยให้มั่นใจว่าระบบที่ตรวจสอบมีความน่าเชื่อถือและตรงตามความต้องการที่กำหนดไว้

ส่วนที่ 3: การแจ้งเตือนของระบบปฏิบัติการ

การแจ้งเตือนของระบบปฏิบัติการ เป็นข้อความหรือสัญญาณที่ระบบปฏิบัติการสร้างขึ้นเพื่อแจ้งเตือนผู้ใช้เกี่ยวกับเหตุการณ์หรือสถานะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งอาจเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญหรือการแจ้งเตือนเกี่ยวกับปัญหาที่ต้องการให้ผู้ได้รับทราบและดำเนินการต่อไป ประเภทของการแจ้งเตือน, ระดับความสำคัญของการแจ้งเตือน, วิธีการแจ้งเตือน, การปรับแต่งการแจ้งเตือน, การบันทึกประวัติการแจ้งเตือน และการตรวจสอบความเรียบร้อยของการแจ้งเตือน โดยสามารถสรุปผลการทดสอบได้ตามรูปที่ 5

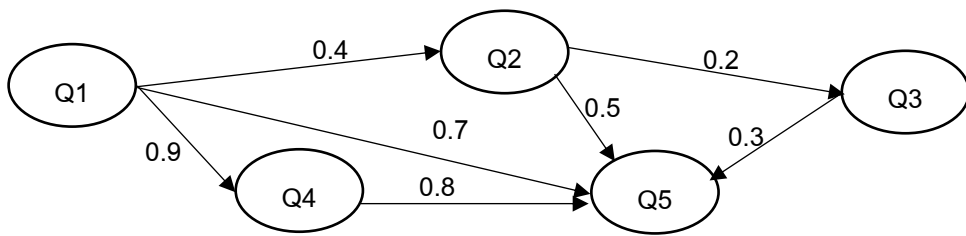


รูปที่ 5 การแจ้งเตือนของระบบปฏิบัติการ

จากรูปที่ 5 การแจ้งเตือนของระบบปฏิบัติการ พบว่า ประเภทของการแจ้งเตือน (4.76%) เป็นการแจ้งเตือนมีหลายประเภทตั้งแต่ข้อผิดพลาดของระบบ, การแจ้งเตือนสถานะปกติ รวมถึงการแจ้งเตือนกิจกรรมเฉพาะ เช่น การเข้าสู่ระบบ ขณะที่ระดับความสำคัญของการแจ้งเตือน (4.87%) เป็นการแจ้งเตือนมีระดับความสำคัญที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ระดับสูงสุดสำหรับเหตุการณ์สำคัญมาก ไปจนถึงระดับต่ำสำหรับเหตุการณ์ที่ไม่เป็นไปตามปกติ ในขณะที่วิธีการแจ้งเตือน (4.98%) มีหลากหลายวิธีในการแจ้งเตือน ไม่ว่าจะเป็นการส่งข้อความบนหน้าจอ, การส่งอีเมลล์หรือ SMS, การเปิดเสียงเตือน, หรือการใช้แอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ ในขณะที่การปรับแต่งการแจ้งเตือน (4.85%) ซึ่งผู้ใช้สามารถปรับแต่งการแจ้งเตือนได้ตามความต้องการ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานและความสำคัญของแต่ละเหตุการณ์ ในขณะที่การบันทึกประวัติการแจ้งเตือน (4.79%) เป็นระบบสามารถบันทึกประวัติการแจ้งเตือนไว้เพื่อการตรวจสอบและวิเคราะห์ในอนาคต ช่วยในการเรียนรู้และการปรับปรุงระบบแจ้งเตือน และในขณะที่การตรวจสอบความเรียบร้อยของการแจ้งเตือน (4.83%) มีการตรวจสอบการทำงานของระบบแจ้งเตือนเพื่อให้แน่ใจว่ามีการแจ้งเตือนทุกเหตุการณ์ตามที่กำหนดและป้องกันข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งการวิเคราะห์นี้ช่วยให้เข้าใจถึงแง่มุมต่างๆ ของการแจ้งเตือนในระบบปฏิบัติการ และความสำคัญของการมีระบบแจ้งเตือนที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถปรับแต่งได้ตามความต้องการของผู้ใช้ และสามารถบันทึกประวัติไว้เพื่อการวิเคราะห์และการปรับปรุงในอนาคต

ส่วนที่ 4: การวิเคราะห์แนวทางการพัฒนาการตรวจสอบ และแจ้งเตือนการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของระบบปฏิบัติการด้วยการประยุกต์ใช้โมเดลออกโตมาตา

ในบริบทของ automata (หรือ finite automata) เป็นโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาการคำนวณและการรู้จำรูปแบบ (pattern recognition) คำว่า "node" หมายถึง "state" หรือสถานะภายใน automaton ประกอบด้วย 1) States (Nodes) คือจุดในกราฟที่แสดงถึงสถานะต่างๆ ของระบบ ซึ่งรวมถึงสถานะเริ่มต้น (initial state) และสถานะสิ้นสุด (accepting/final state) 2) Alphabet ก็คือชุดของสัญลักษณ์ที่ automaton สามารถประมวลผลได้ 3) Transition Function คือฟังก์ชันที่ระบุวิธีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะหนึ่งไปยังสถานะหนึ่งไปตามสัญลักษณ์ที่ได้รับ 4) Initial State คือสถานะที่ automaton เริ่มต้นการประมวลผล 5) Accepting States คือสถานะที่ถ้า automaton หยุดที่สถานะนั้น จะถือว่าได้รู้จำสัญลักษณ์ (input) สำเร็จ โดยผู้วิจัยศึกษาแนวคิดเพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาระบบปฏิบัติการที่มีความสามารถในการทำงานแบบอัตโนมัติและสามารถประสานงานกับอุปกรณ์และทรัพยากรต่าง ๆ โดยที่มีการนำเทคโนโลยีอัจฉริยะมาใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสะดวกสบายในการใช้งานสำหรับผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตามจากการทดสอบการทำงานของโมเดลออกโตมาตาได้ดังตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 การวิเคราะห์แนวทางการพัฒนาการตรวจสอบ และแจ้งเตือนการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของระบบปฏิบัติการด้วยการประยุกต์ใช้โมเดลอัตโนมัติ

จากรูปที่ 6 การวิเคราะห์แนวทางการพัฒนาการตรวจสอบ และแจ้งเตือนการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของระบบปฏิบัติการด้วยการประยุกต์ใช้โมเดลอัตโนมัติ พบว่า การวิเคราะห์ข้อมูลสัมพันธ์กับการสร้างโมเดลอัตโนมัติมีความสัมพันธ์อยู่ที่ 0.7 เปอร์เซนต์ ซึ่งอยู่ในระดับมากอย่างมีนัยสำคัญ การวิเคราะห์ข้อมูลช่วยให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลและใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการสร้างโมเดลอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพ ส่วนการตรวจสอบและวิเคราะห์สัมพันธ์กับการแจ้งเตือนมีความสอดคล้องกับการประเมินความเสี่ยงและการปรับปรุงเรียนรู้ โดยมีค่าความสัมพันธ์อยู่ที่ 0.9 เปอร์เซนต์ ซึ่งอยู่ในระดับมากอย่างมีนัยสำคัญ การตรวจสอบและแจ้งเตือนช่วยให้ผู้ใช้สามารถตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาและวิจัยที่นำเสนอเป็นการวิเคราะห์แนวทางการพัฒนาการตรวจสอบ เฝ้าระวัง และแจ้งเตือนการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของระบบปฏิบัติการด้วยการประยุกต์ใช้โมเดลอัตโนมัติ (Automata) ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักที่ชัดเจนดังนี้ 1) ศึกษาบริบท ปัญหาและสถานการณ์ความมั่นคงปลอดภัยของระบบปฏิบัติการ เป็นการวิจัยมุ่งเน้นการวิเคราะห์และทำความเข้าใจเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมที่ระบบปฏิบัติการต้องเผชิญ ปัญหาที่อาจเกิดขึ้น และวิธีการที่เหมาะสมในการดำเนินการเพื่อรักษาความมั่นคงปลอดภัยของระบบปฏิบัติการ 2) พัฒนารูปแบบการตรวจสอบ เฝ้าระวัง และแจ้งเตือนระดับความมั่นคงปลอดภัย เป็นการวิจัยมุ่งเน้นการพัฒนาเครื่องมือและเทคโนโลยีที่ใช้ในการตรวจสอบระบบปฏิบัติการ เช่น โมเดลอัตโนมัติที่สามารถตรวจจับและป้องกันการละเมิดความมั่นคงปลอดภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ 3) การประเมินระบบตรวจสอบ เฝ้าระวัง และแจ้งเตือน เป็นการวิจัยมุ่งเน้นการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของระบบตรวจสอบและแจ้งเตือนในการควบคุมและรักษาความมั่นคงปลอดภัยของระบบปฏิบัติการ โดยมีผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในหลายด้านดังต่อไปนี้ การทดสอบและการตรวจสอบระบบปฏิบัติการ พบว่าการจัดการข้อมูลการทดสอบและการเลือกเครื่องมือที่เหมาะสมมีความสำเร็จสูง ซึ่งช่วยให้มีโมเดลที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบและเฝ้าระวังความมั่นคงปลอดภัย และการตรวจสอบความเรียบร้อย

ของการตรวจสอบ พบว่า การวิเคราะห์และการรายงานรวมถึงการตรวจสอบข้อกำหนดและมาตรฐานแสดงให้เห็นถึงความเรียบร้อยของการตรวจสอบที่ทำให้ระบบได้รับการปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และการแจ้งเตือนของระบบปฏิบัติการ พบว่ามีวิธีการแจ้งเตือนและการปรับแต่งได้รับคะแนนสูงเนื่องจากสามารถส่งข้อมูลและแจ้งเตือนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการวิเคราะห์แนวทางการพัฒนา พบว่า การทำความเข้าใจและการสร้างโมเดลอัตโนมัติที่สามารถตรวจจับและป้องกันการละเมิดความมั่นคงปลอดภัยของระบบปฏิบัติการ พร้อมทั้งการอัปเดตและการเสริมความมั่นคงปลอดภัยของระบบตามความเสี่ยงและภัยคุกคามที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งผลการวิจัยนี้ช่วยให้นักวิจัยและผู้ดูแลระบบปฏิบัติการเข้าใจและจัดการกับความเสี่ยงและภัยคุกคามที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพื่อพัฒนาวิธีการป้องกันที่มีความมั่นคงปลอดภัยและคุ้มค่าต่อการใช้งานของระบบปฏิบัติการในอนาคต

References

- [1] Molina-Granja F, Molina L, Velasco D, Allauca G, Senthikumar G, Swaminathan N. Demand and employability for the career of engineering in computer security. In: *Inventive Communication and Computational Technologies Conference 2022*;383:533-42.
- [2] Plerdplern W. The cybersecurity skills development of national cyber security agency [Master of Public Administration]. Bangkok, Thailand: Ramkhamhaeng University; 2022. (In Thai)
- [3] Lin J. Research on the security of the application of computer technology and electronic information engineering technology. *Journal of Physics Conference Series* 2021;1744(3): 032126. doi:10.1088/1742-6596/1744/3/032126.
- [4] Zhigalov K, Guzueva E, Polovneva S. Automation security in a machine-building plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2021;1111:012067. doi: 10.1088/ 1757-899X/1111/1/012067
- [5] Molisakulmongkol P, Praneetpolgrang P, Soonthornsaratul M, Weerakulwattana S, Wuttiornpong A. *Operating systems*. Bangkok, Thailand: Duangkamonsamai; 2002. (In Thai)
- [6] Jungsamarn S, Pangsuk P. Development of surgical safety checklist in operating room in Surin hospital. *Udonthani Hospital Medical Journal* 2020;28(2):130-42. (In Thai)

- [7] Nilmanee P. The relationship between the perception and the use of computer information security systems: a case study of Thairath group [master of business administration]. Pathumthani, Thailand: Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2018. (In Thai)
- [8] Gu J, Hua Z, Li M, Chen H. Innovations and applications of operating system security with a hardware-software co-design. Chineses Science Bulletin 2022;67(32):3862-71.
- [9] Sipser M. Introduction to the theory of computation. 3rd ed. Boston, USA: Cengage Learning; 2012.
- [10] Imsuwan S, Vorarat S. Using automation testing test the software web application: case study of information and communication technology company. DPU Graduate Studies Journal 2018;7(1):1186-97. (In Thai)
- [11] Dataset.world. Cyber security (performance measure 5.12) [Internet]. 2020 [cited 2024 January 20]. Available from: <https://data.world/datasets/performance-measures>
- [12] Rohini N, Sharmila B. RT-IoT2022 [Internet]. 2024 [cited 2024 January 20]. Available from: <https://archive.ics.uci.edu/dataset/942/rt-iot2022>.
- [13] Wikipedia. SPSS statistics [Internet]. 1968 [cited 2024 January 20]. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/SPSS>
- [14] Wikipedia. MATLAB programming language. [Internet]. 1970s [cited 2024 January 20]. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/MATLAB>
- [15] Wikipedia. Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA) [Internet]. 2022 [cited 2024 January 20]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Weka_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Weka_(software))

ประวัติผู้เขียนบทความ



ทิภาพร ศุภมิตร อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต เลขที่ 60 ถนนร่มเกล้า แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510 E-mail: tipaporn.sup@kbu.ac.th
สนใจงานวิจัยด้านสมาร์ตซิตี้/สมาร์ตคอมมูนิตี้ วิศวกรรมซอฟต์แวร์ ดาต้า ไมนิ่ง ระบบปฏิบัติการ ระบบเทคโนโลยีสารสนเทศ



สุวิทย์ วงศ์คุ้มสิน อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต เลขที่ 60 ถนนร่มเกล้า
แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510 E-mail: suwit@kbu.ac.th
สนใจงานวิจัยด้านระบบฐานข้อมูล การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน แอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน



ชนะธิป อารังวิทยภาคย์ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต เลขที่ 60 ถนนร่มเกล้า
แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510 E-mail: chanatip.vv@gmail.com
สนใจงานวิจัยด้านระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย



อิฐติศักดิ์ เมืองสง อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต เลขที่ 60 ถนนร่มเกล้า
แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510 E-mail: ittisak.ms@gmail.com
สนใจงานวิจัยด้านความปลอดภัยในระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

Article History:

Received: February 21, 2024

Revised: August 1, 2024

Accepted: August 21, 2024

MEASURING THE ENERGY EFFICIENCY OF RDF QUERY PROCESSING

Marko Niinimäki¹, Kitichai Chanyalikit² and Atamfon Udofia³

¹Lecturer, Chulalongkorn School of Integrated Innovation, Chulalongkorn University,
254 Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330, marko.n@chula.ac.th

²Assistant, Chulalongkorn School of Integrated Innovation, Chulalongkorn University,
254 Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330, kitichai.c@chula.ac.th

³Student, Chulalongkorn School of Integrated Innovation, Chulalongkorn University,
254 Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330, 6558104256@student.chula.ac.th

ABSTRACT

The cost of electric power consumed by a server computer is a significant component of its total cost of ownership. Since database servers are essential in the era of Big Data, we studied the performance and energy consumption of a small server. To achieve this, we stored a large set of RDF (Resource Description Framework) data in a database (RDF4J) running on consumer-grade hardware. Using realistic SPARQL language queries from Wiki data and a low-cost power/energy meter, we measured the energy consumption of RDF query processing. Our database management system responded to queries over a network connection, demonstrating that the network processing overhead in query processing was quite low (about 2 to 4%). We found that the most energy-efficient processing (queries per Watt) could be achieved with a slightly larger degree of parallelism than the best throughput (queries per hour). Moreover, we discovered that using a stripped-down version of the operating system on which the database ran did not affect the energy consumption of the query processing.

KEYWORDS: database, energy, RDF, RDF4J

1. Introduction

According to an estimate by the International Energy Agency (IEA) [1], the ITC ecosystem in 2019 consumed about 8.9% of world electricity supplied for all purposes. Power and cooling were between 25% to 33% of the total cost of ownership (TCO) of an enterprise data center [2, 3]. Analysts estimate that in 2024, 147 Zettabytes of data will be generated,

with the amount increasing each year [4]. New methods will be needed to manage the data, store the energy needed and process the data. Indeed, energy-efficiency is one of the key drivers in the UN Sustainable Development Goals 7 (Affordable and Clean Energy) and 13 (Climate Action).

Big Data has been loosely defined as “the information asset characterized by high Volume, Velocity and Variety to require specific technology and analytical methods for its transformation into value” [5]. The value can naturally be financial potential or other benefits if the data can be analyzed. The challenge in managing big data lies in the ability to efficiently locate, access, store, and integrate vast volumes of rapidly evolving data that exist in diverse formats.

Here, we would like to promote an assumption by Martinez-Prieto et al: In the presence of heterogeneous data, the more data integrated and managed under a common model, the more interesting the knowledge generated may be, increasing the resulting dataset value [6]. As a common model, the Resource Description Framework (RDF, see [7]) appears to be a usable tool for Big Data integration. As discussed by Cruz and Xiao [8], data sources can be heterogeneous in syntax, schema, or semantics. Syntactic heterogeneity is the result of using different presentation formats for different data sources. Schematic heterogeneity results from structural differences in the data sources and can mean naming concepts differently in them. Ontologies, expressed in RDF and RDFS (RDF Schema) can alleviate these problems. We can define an RDF statement as a pair of resources (nodes) connected by a property (edge) [8]: a city (node) Rome is connected to its population (node) by a property (edge) “has population”. Due to this format, RDF statements are often called “triples”. RDFS is used to define the semantic relationships between properties and resources by using namespaces (or prefixes). For example, the prefix <http://www.wikidata.org/entity/> defines the semantics of entities that can appear in statements about them in the context of Wiki data (see below).

In this paper, we present a method for measuring energy efficiency of RDF queries applied to non-trivial amounts of data. Our dataset is based on Wiki data – the data resource behind Wikipedia’s articles. Wiki data contains data items described through property-value pairs; for example, the item for “Rome” might have a property “population” with the value “2,777,979” [9]. These statements can further be refined by “qualifiers” like the statement above qualified as being an estimate by The Italian National Institute of Statistics in 2010.

Furthermore, items and properties each possess their own dedicated Wikipedia pages (such as “Rome” and “Population”) and are also associated with unique resource identifiers (URIs) [9]. For example, the URI of Rome, Italy is <http://www.wikidata.org/entity/Q220> and the URI for population is <http://www.wikidata.org/entity/Q1613416>. Our RDF export of the data is an RDF file of Wiki data, available at archive.org (<https://archive.org/details/wikidata-json-20150706>). This file contains more than 1 billion statements. The queries used in testing are a set of 30 Wiki data sample queries from <https://query.wikidata.org>. The query language used is SPARQL [10].

Though the terms energy and power are often used synonymously, power is measured by Watts and energy by “Watts over time” like kilowatt hour (kWh).

As discussed by O’Neil [11], there are several types of database performance: throughput, response time, and the appropriate cost per user. By convention, we use “queries per hour” (QPH) as a measure for throughput and “average query processing time” as a measure for response time. “Watts per query” (WPQ) or “energy efficiency” is used in this paper for cost evaluation.

Our research objectives are:

- To evaluate the database performance of an RDF database management system (DBMS) operating on a commodity hardware PC.
- To identify the energy-consuming software components in a database system and determine their proportional power consumption.
- To analyze the differences in energy consumption when queries are executed in a DBMS running under different operating systems.

The rest of the paper is organized as follows. In Section 2, we give a review of related research. In Section 3, we describe the data, queries, and environment used for testing. In section 4, we detail the actual tests and their results. Section 5 contains a summary of the research and its benefits, a conclusion and directions for future research.

2. Related Work

In related research, Pickavet et al [12] gave a summary of power consumption with different kinds of information and communications technology (ICT) devices. Their survey includes energy consumption figures of TV sets, and video players but for the purpose of

this research, the figures listed in Table 1 are the most relevant. Table 2 contains the International Energy Agency's estimate of Worldwide ICT Electricity Consumption by equipment type [1].

Table 1 ICT equipment and their power consumption

Type of equipment	Power consumption when active
Desktop PC with an LCD display	100 W
Laptop PC	30 W
Volume server	220 W
Mid-range server	700 W
High-end server	10 000 W

Table 2 Worldwide electricity consumption of ICT equipment, IEA estimate 2019

Type of equipment	Electricity consumption
Data centers	200 TWH
End users	550 TWH
Network equipment	250 TWH
ICT manufacturing	1000 TWH

Following Bianchini and Rajamony's [3] example, a 200W server running for one year would consume 1750 kWh. Based on the current U.S. electricity prices (17 cents/kWh) in 2024, the cost of running a 200W server for one year would be approximately \$300. However, Bianchini and Rajamony calculated that cooling the server for a year would consume an additional 498 kWh.

The energy efficiency of PC hardware has improved since Pickavet's study. Park et al [13] stated that an ENERGY STAR registered LCD monitor consumes 10 to 25 Watts in on-mode. The ENERGY STAR Program [14] specifies requirements for typical annual energy consumption (TEC) in kWh. Some energy-efficient PCs listed at the program's web site have TECs as low as 5.4. During our measurements, we recorded power consumptions between

23.7 to 93.3 W. A PC hobbyist web page [15] gave the following measures for the components of an office PC like the one we have used in our tests:

CPU Intel i5: 73 to 95 W,

Motherboard: 25 to 40 W,

RAM DDR3: 2 to 3 W,

Hard drive 3.3": 6.5 to 9 W,

80 mm case fan: 0.6 to 1.8 W.

Barroso and Holzle [16] have promoted energy proportional computing: computers should consume energy proportionally to the tasks they are performing. However (as of 2007), even an energy-efficient server still consumed about half its full power when doing virtually no work. Lang et al [17] studied if processing (optimizing and executing) queries as fast as possible is the most energy-efficient way to operate a database management system (DBMS). They found that this is not the case due to low server utilization and the hardware's power/performance configurations.

Economou et al [18] presented a study of energy consumption of a server computer ("blade") and its hardware and software components. Further, they developed the Mantis model to estimate a server's energy consumption.

Arenas et al [19] discussed the logical model of RDF databases and the SPARQL query language but did not mention any actual RDF DBMS software implementations. Wylot et al [20], on the other hand, described multiple methods of implementing RDF storage and queries and listed DBMS's that utilize them. Bizer and Schultz [21] introduced an RDF benchmark and tested four different RDF storages. The Java-based Sesame [22] is a popular RDF query processor and was discussed in their study. Sesame is the basis of the RDF4J framework (including a DBMS) and the commercial GraphDB product. Nacional et al [23] compared the performance of several RDF storage solutions (including RDF4J) with medical publication data and further compared their performance with a MongoDB storage of the same data. However, energy efficiency was not discussed in their study. Hernandez et al [24], likewise, studied RDF retrieval using five different RDF DBMS's (including GraphDB) but did not study their energy efficiency. Notably, they used Wikidata in their study.

Shakhovska et al [25] provided a framework for Big Data processing based on a formal model of Big Data. Big Data technologies like Hadoop [26] combine distributed processing and storage methods.

Queries with RDF data in Hadoop environments have been discussed by Schätzle et al [27], Kawises and Vatanawood [28] and Husain et al [29]. Husain et al tested a limited set of queries using a 10-node Hadoop cluster and RDF data with up to 1.1 billion triples. Niinimäki et al [30] tested RDF query processing with many different node configurations in a Hadoop cluster and improved the processing speed (compared to a single node solution) by 85%.

Concerning database query energy efficiency, the Transaction Processing Council (TPC) releases benchmarks and tools aimed at measuring the “Watts per operation” characteristics of database products [31]. Tsirogiannis et al [32], using the TPC benchmark data, studied both hardware components and relational DBMS software methods in their database energy efficiency tests. Niinimäki et al [33] measured the energy consumption of a web-based database application and presented methods to improve its efficiency. Some studies have addressed the energy efficiency perspective of using RDF data on the Internet of Things context [34]. However, to our knowledge, there have not been studies measuring the energy efficiency of RDF databases and comparing our results with others is difficult.

3. The Test Data, Queries and Environment

For our tests, we have used a publicly available large data set from the Wiki data [9] project. This data set contains the statements of Wiki data, archived in June 2015 (<https://archive.org/details/wikidata-json-20150706>) in the Terse RDF Triple Language [35] format. The data set had some mistakes like encoding of the percent sign in the URLs, but after correcting those, the set contained 1 051 431 958 statements. The data size of the storage for these statements was about 96 gigabytes. An example of the data is shown below; the first item is about a volleyball player. Property P21 states her gender (Q6581072 is female), P31 – Q5 states she is human and P569 states her date of birth.

```
@prefix rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> .
```

```
..
```

```
@prefix wikibase: <http://wikiba.se/ontology-beta#> .
```

```
..
```

```
@prefix skos: <http://www.w3.org/2004/02/skos/core#> .
```

```
@prefix schema: <http://schema.org/> .
```

```
@prefix wd: <http://www.wikidata.org/entity/> .
```

```
..
```

@prefix wdt: <http://www.wikidata.org/prop/direct/> .

..

wd:Q702872 a wikibase:Item ;

..

rdfs:label "Zhao Ruirui"@en ;

skos:prefLabel "Zhao Ruirui"@en ;

schema:name "Zhao Ruirui"@en ;

..

schema:description "pallavolista cinese"@it,

"Chinese volleyball players"@en,

..

wdt:P21 wd:Q6581072 ;

wdt:P31 wd:Q5 ;

..

wdt:P569 "1981-10-08T00:00:00Z" ^^xsd:dateTime ;

Our thirty SPARQL queries are adopted from the sample queries of Wiki data. The queries include “Cats in Wiki data”, “Number of humans in Wiki data”, “Chemistry Nobel Prizes”, and “Persons whose gender is not known” (shown below).

```
SELECT ?human WHERE { ?human wdt:P21 ?gender FILTER isBLANK(?gender) . }
```

At the time of the writing, there were 326 sample queries in Wiki data. We have omitted queries that did not produce an answer with the 2015 data that we used. For queries that produced thousands of results, we have limited the number of results to 50. Some queries were omitted or modified because they returned multimedia content that our primitive test environments could not display. Three queries ran correctly but their running time was so long (more than 1 hour in our environment) that they would have dominated the test. The hardware and software environments for our test setup are shown below.

CPU: Intel I5-4590 @ 3.30 GHz

RAM: 8GB DIMM DDR3 Synchronous 1600 MHz

Motherboard (with an integrated video adapter): Dell 02YYK5

Hard drive: ST 500D M002-1DD142, 7200 RPM, average seek time 8.5 ms.

Operating system: Ubuntu Linux 18.04 kernel 4.18.0-15

Java: OpenJDK 11.0.7 2020-04-14

RDF4J: 3.1.3

Web Server: Tomcat 8.5.39

The energy consumption was measured using a low-cost consumer grade power/energy meter TS-863A.

To compare our test setup with a more professional server, we have used a higher-end Linux system kindly provided by the Ludwig Maximilian University, Munich. This computer was previously used in our database performance testing [23]. The software is similar to our test setup and the hardware characteristics are shown below.

CPU: 24-core Xeon (E5-2620 v2 @ 2.10 GHz),

RAM: 32 GB DDR3.

We measured the query performance of this system and compared it with our test system but unfortunately, we were not able to measure the energy consumption of the server due to data center policies.

4. Test Results

We executed the queries using two methods: (i) a completely linear execution where the RDF4J server is running in a “console” mode as a single process and (ii) a parallel method where RDF4J is running as a server.

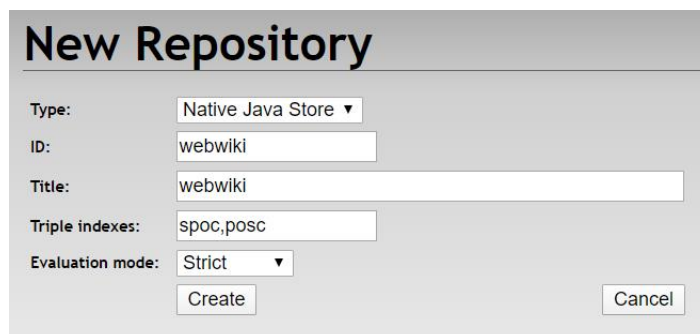
The linear method gave us an overall view of the queries, while the server method corresponded to a more realistic database server environment.

The running times of the queries, using the linear method, are shown in the first column of Table 3. The test was repeated only three times because there was very little variance (0.1% of the combined time) in the execution times. The average combined execution time of the queries was 6530 seconds (about 1 hour 49 minutes) and thus, the average execution time for a query was 218 seconds. The longest running query (“largest cities”) took ca. 22 minutes and the shortest ones ca. 1/10 of a second.

For the parallel method, we used the RDF4J web applications (server and workbench) running under the Tomcat 8 Java servlet HTTP server. Using this technology, we created the repository as shown in Figure 1 and executed the “URL encoded” queries as shown below (the query is “People whose gender is not known”). The queries were executed on a separate computer connected to the server by a 1 Gbit Ethernet cable. The data transferred over the network by the requests and responses was only 352 kB.

curl <http://192.168.10.120:8080/rdf4j-server/repositories/webwiki?query=%20%20PREFIX%20wdt%3A%20%3Chttp%3A%2F%2Fwww.wikidata.org%2Fprop%2Fdirect%2F%3E%20%20PREFIX%20wd%3A%20%3Chttp%3A%2F%2Fwww.wikidata.org%2Fentity%2F%3E%20SELECT%20%3Fhuman%20WHERE%20%7B%20%3Fhuman%20wdt%3AP21%20%3Fgender%20FILTER%20isBLANK%28%3Fgender%29%20.%20%7D>

Even though using the web server allowed us to execute our queries in parallel, Table 3 column 3 contains the execution times of queries when they are run as a sequence of HTTP requests. Comparing columns 2 and 3, we can observe that the overhead of running the queries through the HTTP server is small. The difference in the average combined execution times was 282 seconds (about 4%). Both the console and web-based systems executed about 16 queries per hour. For our higher-end system this figure was about 700 queries per second.



New Repository

Type: Native Java Store ▼

ID: webwiki

Title: webwiki

Triple indexes: spoc, posc

Evaluation mode: Strict ▼

Create Cancel

Figure 1 Creating a web-based RDF database

Our first parallel benchmarking task was to find the best performance level, which is defined as the number of parallel processes that gives the most responses per hour. For this purpose, we created N query sets, i.e. files containing the URL encoded queries in a random sequence. These files were then executed in parallel. The results with different values of N are shown in Table 4.

We can see that parallel processing with two query sets is actually less efficient than running the queries individually. However, the queries per hour figures improved as we increased the number of parallel query sets. This continued until the resources were exhausted. We first noticed this when we ran 6 query sets in parallel. When running multiple

query sets in parallel, the server was quite overloaded. The average load figures were between 7.1 and 8.9 with 7 query sets. When running the linear test, however, these figures were between 0.4 and 1.2.

Having determined that the best throughput (queries per hour) was achieved when five query sets were executed in parallel, our next task was to study the energy consumption of the server hardware and software while running the queries.

The desktop PC used in our tests is a typical “small form factor” office PC with an integrated VGA and Ethernet adaptors, and a 500 GB traditional SATA hard disk (not a solid disk drive). This PC is not listed at energystar.gov, however a comparable model by the same manufacturer has TEC ratings between 77.8 and 100.8 kWh. Using our power/energy meter, the power consumption was 23.7W to 23.8W, when idle. The maximum reading of the power meter was 93.3 W. Furthermore, we measured the energy consumption of the system when it ran for one hour with and without the Tomcat web server and these tests gave a figure of 24 W each. We could not determine a definite overhead for the Tomcat process when it was not processing any queries. This is understandable since the Tomcat process consumed only about 0.3% of the CPU power and 3.3% of the memory. We shall later estimate the energy consumption of Tomcat using the proportion of CPU usage (in Figure 2).

The results of energy measurements are shown in Table 5. The linear test was executed using the “console” command of RDF4J. The parallel tests were executed by connecting a client computer directly to the server, starting the Tomcat server in the server computer and running the queries using the curl program in the client.

Table 5 indicates that the lowest Watts per query figure does not correspond with the best performance – it was reached after running six or seven query sets in parallel.

Earlier, we noted that the performance difference was approximately 4% when running a single sequence of queries using RDF4J alone compared to RDF4J in conjunction with Tomcat. Next, we estimated Tomcat’s energy consumption overhead when running queries in parallel. Figure 2 (made with the Python psrecord package) illustrates the CPU usage of the service containing both Tomcat and RDF4J. The CPU levels were recorded during the first hour of parallel testing with six query sets. The average CPU consumption was 17.9%. The role of Tomcat during the process was to pass queries to RDF4J, receive the replies and pass them to the client. We simulated the process by measuring the CPU consumption

of Tomcat when retrieving 25 small static files under its control (25 since this is the QPH figure for the server). During this experiment, the Tomcat process's CPU consumption was 0.3%. Therefore, it is likely that the Tomcat component's energy consumption was about 0.3/17.9 which is 2% of the Tomcat+RDF4J combination.

Our final research question aims at finding out whether we can save energy by using a different kind of operating system. We tested the Porteus Linux distribution [36] and the preliminary findings were mixed. When the Porteus system was idle, it consumed about 20% less energy than Ubuntu Linux. However, when running a database and replying to queries, there was no difference between the energy consumption of the two operating systems.

Table 3 Queries and Their Linear Execution Times in Milliseconds

Query#	Command line	Web server
1	703	1377
2	44	74
3	455500	517986
4	520919	508632
5	4250	4637
6	12350	13403
7	704651	793857
8	1281709	1333476
9	3008	2829
10	576682	598554
11	131	162
12	239821	249979
13	42411	44843
14	13019	15444
15	1119	1348
16	987	1160
17	166	181
18	121215	135043
19	13840	15312

Table 3 Queries and Their Linear Execution Times in Milliseconds (continued)

Query#	Command line	Web server
20	45527	57866
21	5583	5625
22	14523	15079
23	783339	786481
24	662078	673351
25	670623	678277
26	4818	4690
27	313785	314466
28	37124	37362
29	89	103
30	43501	42185
SUM	6573515	6853785
H:MIN:S	1:49:33	1:54:13
AVG	219117	228459
QPH	16.4	15.75

Table 4 Parallel Processing

Num parallel tasks	Average query processing time (ms)	Average query set processing time	QPH
2	494663	4h9min	14.48
3	542872	4h31min	19.89
4	620471	5h10min	23.21
5	709122	5h54min	25.35
6	945741	7h52min	22.84
7	1115723	8h53min	23.60

Table 5 Energy Consumption During Testing

Type of test	Num queries	Time (h)	Energy consumption (kWh)	Watts	WPQ
Linear	30	1:50	0.05	27.38	0.91
Parallel-5	150	5:54	0.174	29.44	0.20
Parallel-6	180	7:52	0.218	27.66	0.15
Parallel-7	210	8:53	0.247	26.5	0.15

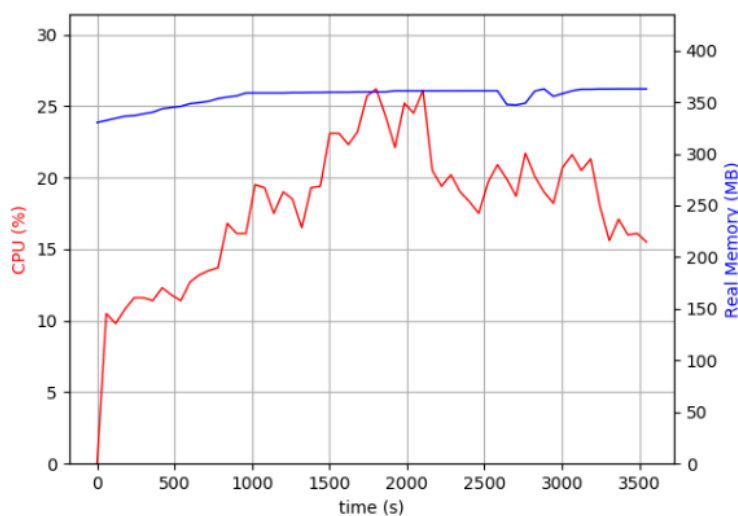


Figure 2 CPU and Memory Consumption of Tomcat + RDF4J

5. Summary and Future Research

In this paper, we answered the following questions:

- What kind of database performance can we expect from an RDF database system running in a commodity hardware PC?
- How can we identify the energy consuming software components in a database system, and their proportional power consumption?
- Are there differences in energy consumption when the queries are executed in a DBMS running under different operating systems?

The main benefits of our research are:

- Demonstrating that a commodity PC with a Linux operating system is feasible for

processing RDF queries. However, it is observed that the execution of complex queries results in significant processing delays.

- Demonstrating that the overhead of network data processing is small compared with query processing.
- Demonstrating that a “lightweight” Linux distribution does not improve the energy efficiency of query processing.

For our measurements, we have used a large set (more than 1 billion statements) from Wiki data, and a set of 30 Wikidata example SPARQL queries. Our hardware environment (the database server) was a simple desktop PC with integrated graphics, 500 GB hard drive, 8 GB memory and an Intel i5 CPU. The tests were run using a client PC computer connected to the server directly by an Ethernet cable. We measured the energy consumption of the tests with a consumer grade power/energy meter connected to a wall socket.

The results, based on our measurements, can be stated as follows:

The commodity hardware PC's query processing performance was less than 3% of that of our higher end system (24 core Xeon with 32 GB RAM).

We can measure the impact of a database management system (RDF4J) in the energy consumption when processing queries with a system that contains RDF4J under the control of a web server (Apache Tomcat). However, estimating the impact of the web server is more difficult since its overhead is small compared with RDF4J, and we estimate it to be about 2%.

Changing the operating system to a more minimalistic Linux distribution reduces the energy consumption when the system is running idle but does not have a real impact when the system is processing queries.

We have run some initial measurements on our desktop PC using a solid-state disk (SSD) and the performance improvement was notable. This is in line with Intel's reporting quadruple database performance when using SSDs [37]. In our future research, we shall provide figures for our setup with an SSD. Other future research will concentrate on “fine tuning” the operating system and the Java environment for better performance and economy. More challenging topics will expand the scope of the study with other types of databases and retrieval systems. RDF processing can be compared with a more recent alternative: graph databases with the GraphQL query language. RDF databases have been studied in the context of Large Language Models, too [38]. Expanding this type of research could

combine the ease of use of Large Language Models with the fact-based knowledge bases implemented using RDF.

References

- [1] Gelenbe E. Electricity consumption by ICT: Facts, trends, and measurements. Ubiquity 2023;(August):1-15.
- [2] Patel CD, Shah AJ. Cost model for planning, development and operation of a data center. Hewlett-Packard Laboratories Technical Report 2005;107:1-36.
- [3] Bianchini R, Rajamony R. Power and energy management for server systems. Computer 2004;37(1):68-76.
- [4] Alex Woodie. Big Growth Forecasted for Big Data [Internet]. Datanami [updated 2022 Jan 11; cited 2024 Aug 12] Available from: <https://www.datanami.com/2022/01/11/big-growth-forecasted-for-big-data>
- [5] De Mauro A, Greco A, Grimaldi M. A formal definition of Big Data based on its essential features. Library review 2016;65(3):122-35.
- [6] Martínez-Prieto MA, Cuesta CE, Arias M, Fernández JD. The solid architecture for real-time management of big semantic data. Future Generation Computer Systems 2015;47:62-79.
- [7] The World Wide Web Consortium. W3C RDF [Internet] The World Wide Web Consortium [updated 2014 Feb 25; cited 2024 Aug 12] Available from: <https://www.w3.org/RDF/>.
- [8] Cruz IF, Xiao H. The role of ontologies in data integration. Engineering intelligent systems for electrical engineering and communications 2005;13;245.
- [9] Vrandečić D, Krötzsch M. Wikidata: a free collaborative knowledgebase. Communications of the ACM 2014;57(10):78-85.
- [10] Harris S, Seaborne A, Prud'hommeaux E. SPARQL 1.1 query language. [Internet] The World Wide Web Consortium [updated 2013 Mar 21; cited 2024 Aug 12] Available from: <https://www.w3.org/TR/sparql11-query>.
- [11] O'Neil PE. Database Performance Measurement. In: Tucker AB, editor. The Computer Science and Engineering Handbook. Boca Raton, USA: CRC Press, 1997. p.1078-92.

- [12] Pickavet M et al. Worldwide energy needs for ICT: the rise of power-aware networking. Proceeding of 2nd International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems; 2008 Dec 15-17; Mumbai, India. Piscataway, USA: IEEE; 2008. p. 1-3.
- [13] Park WY, Phadke A, Shah N. Efficiency improvement opportunities for personal computer monitors: implications for market transformation programs. Energy Efficiency 2013;6:54-69.
- [14] ENERGYSTAR. ENERGY STAR program requirements [Internet] ENERGYSTAR [updated 2010 Aug 1; cited 2024 Aug 12] Available from: https://www.energystar.gov/sites/default/files/specs/private/Computers_Program_Requirements.pdf
- [15] BuildComputers. Power consumption of PC components in watts. buildcomputers.net [Internet]. BuildComputers [updated 2013 Mar 15; cited 2024 Aug 12] Available from: <http://www.buildcomputers.net/power-consumption-of-pc-components.html>
- [16] Barroso LA, Hölzle U. The case for energy-proportional computing. Computer 2007; 40(12):33-7.
- [17] Lang W, Kandhan R, Patel JM. Rethinking query processing for energy efficiency: Slowing down to win the race. IEEE Data Engineering Bulletin 2011;34:12-23.
- [18] Economou D, Rivoire S, Kozyrakis C, Ranganathan P. Full-system power analysis and modeling for server environments. In: Eeckhout, Lieven, and J. YI, editors. Proceedings of the Second Annual Workshop on Modeling, Benchmarking and Simulation (MoBS) Held in Conjunction with the 33rd Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA-33); 2006 Jun 17-21; Boston, MA. Piscataway, USA: IEEE; 2006. p. 70-7.
- [19] Arenas M, Gutierrez C, Pérez J. Foundations of RDF databases. Heidelberg, Germany: Springer; 2009.
- [20] Wylot M, Hauswirth M, Cudré-Mauroux P, Sakr S. RDF data storage and query processing schemes: A survey. ACM Computing Surveys (CSUR) 2018;51(4):84.
- [21] Bizer C, Schultz A. Benchmarking the performance of storage systems that expose SPARQL endpoints. Proceeding of 4 th International Workshop on Scalable Semantic Web Knowledge Base Systems (SSWS); 2008 Oct 21; Karlsruhe, Germany. CEUR; 2008. p. 39.

- [22] Broekstra J, Kampman A, Van Harmelen F. Sesame: A generic architecture for storing and querying RDF and RDF schema. Proceeding of the Semantic Web-ISWC 2002: First International Semantic Web Conference; 2002 June 9-12; Sardinia, Italy. Heidelberg, Germany: Springer; 2002. p. 54-68.
- [23] Nacional T, Niinimäki M, Heikkurinen M. RDF Databases - Case Study and Performance Evaluation. MATTER: International Journal of Science and Technology 2019;5(3):1-14.
- [24] Hernández D, Hogan A, Krötzsch M. Reifying RDF: What works well with Wikidata? Proceedings of the 11th International Workshop on Scalable Semantic Web Knowledge Base Systems; 2015 Oct 11; 2015; Bethlehem, USA. p. 32-47.
- [25] Shakhovska N, Veres O, Bolubash Y, Bychkovska L. Big data information technology and data space architecture. Sensors & Transducers 2015;195:69-76.
- [26] Kambatla K, Pathak A, Pucha H. Towards optimizing hadoop provisioning in the cloud. Proceedings of the 2009 conference on Hot topics in cloud computing (HotCloud'09); 2009 Jun 15; San Diego, USA. USA: USENIX Association; 2009. Article 22.
- [27] Schätzle A, Przyjaciół-Zablocki M, Neu A, and Lausen G. Sempala: Interactive SPARQL query processing on Hadoop. The Semantic Web-ISWC 2014: 13th International Semantic Web Conference; 2014 Oct 19-23; Riva del Garda, Italy. Heidelberg, Germany: Springer; 2014. p. 164-179.
- [28] Kawises J and Vatanawood W. A development of RDF data transfer and query on Hadoop Framework. 2016 IEEE/ACIS 15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS); 2016 June 26-29, Okayama, Japan. Piscataway, USA: IEEE; 2016. p. 1-4.
- [29] Husain MF, Doshi P, Khan L, Thuraisingham BM. Storage and retrieval of large RDF graph using Hadoop and MapReduce. In: Jaatun MG, Zhao G, Rong C, editors, Proceeding of the first International Conference (CloudCom 2009); Beijing, China, 2009 December 1-4. Lecture Notes in Computer Science 2009 (5931):680-86.
- [30] Niinimäki M, Niemi T, Thanisch P. Dataspace management with ETL and RDF support. Naresuan University Journal: Science and Technology (NUJUST) 2020;28:36-49.
- [31] Poess M, Nambiar RO, Vaid K, Stephens Jr JM, Huppler K, Haines E. Energy benchmarks: a detailed analysis. Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking; 2010 Apr 13-15; Passau, Germany. New York, USA: ACM; 2010. p. 131-40.

- [32] Tsirogiannis D, Harizopoulos S, Shah MA. Analyzing the energy efficiency of a database server. Proceeding of the 2010 ACM SIGMOD International Conference on Management of data; 2010 Jun 6-11; Indianapolis, USA. New York, USA: ACM; 2010. p. 231-42.
- [33] Niinimäki M, Abaunza F, Niemi T, Thanisch P, Kommeri J. Energy-efficient query processing in a combined database and web service environment. Green Computing Strategies for Competitive Advantage and Business Sustainability. Pennsylvania, USA: IGI Global; 2018. p. 62-88
- [34] Hasemann H, Kröller A, and Pagel M. RDF Provisioning for the Internet of Things. Proceeding of the 3rd IEEE International Conference on the Internet of Things; 2012 Oct 24-26; Wuxi, China. Piscataway, USA: IEEE; 2012 p. 143-50.
- [35] Prud'hommeaux E, Carothers G. Turtle - Terse RDF triple language. [Internet] The World Wide Web Consortium [updated 2015 Feb 25; cited 2024 Aug 12] Available from: <https://www.w3.org/TR/turtle>
- [36] Flood J. Porteus Linux. [Internet] Porteus [updated 2023 Oct 4; cited 2024 Aug 12]. Available at: <http://porteus.org>
- [37] Wu K, Arpaci-Dusseau A, Arpaci-Dusseau R, Sen R, Park K. Exploiting Intel Optane SSD for Microsoft SQL server. In: 15th International Workshop on Data Management on New Hardware; 2019 July 1; Amsterdam, Netherlands. New York, USA: ACM; 2019. Article 15.
- [38] Frey J, Meyer LP, Arndt N, Brei F, Bulert K. Benchmarking the abilities of large language models for RDF knowledge graph creation and comprehension: How well do LLMs speak Turtle. Proceeding of the ISWC 2023 Workshop on Deep Learning for Knowledge Graphs; 2023 Nov 6-7; Athens, Greece. CEUR; 2023.

Author's Profile



Mr. Marko Niinimäki gained his Ph.D. in computer science at the University of Tampere, Finland. He has worked as a researcher at CERN, and lectured computer science in many universities in Europe and Asia. His special interests are databases and data management. He currently works at Chulalongkorn University School of Integrated Innovation.



Mr. Kitichai Chanyalikit gained his M.Sc. at the Assumption University of Bangkok. He shares his time between Chulalongkorn University and his web consultancy business.



Ms. Atamfon Udofia is currently a 3rd year student of the Chulalongkorn School of Integrated Innovation. She is an enthusiast of Artificial Intelligence and Machine Learning with 3 years of pre-medical studies at the University of Benin, Benin City, Nigeria.

Article History:

Received: August 22, 2023

Revised: August 13, 2024

Accepted: August 21, 2024

การใช้โครงข่ายประสาทเทียมช่วยในการวิเคราะห์กำลังสูญเสีย
ของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายในสภาวะโหลดปกติและโหลดเกิน
**USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO ANALYZE POWER
LOSSES OF DISTRIBUTION TRANSFORMER UNDER NORMAL LOAD
AND OVERLOAD CONDITIONS**

บุญเลิศ สื่อน้อย¹ สมศักดิ์ สิริโปรานานนท์^{2*} และ นรุตม์ เพ็ชรเจริญ³

^{1,2*}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160,

¹tdlert@hotmail.com, ^{2*}somsaks@sau.ac.th

³นักศึกษา, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160, petchjarern@gmail.com

Boonlert Suechoey¹ Somsak Siriporananon^{2*} and Narut Petchjarern³

^{1,2*}Lecturer, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

Southeast Asia University, 19/1 Phetkasem Road, Nongkhaem, Bangkok, 10160, Thailand,

¹tdlert@hotmail.com, ^{2*}somsaks@sau.ac.th

³Student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

Southeast Asia University, 19/1 Phetkasem Road, Nongkhaem, Bangkok, 10160, Thailand,

petchjarern@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์กำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 100 kVA 22kV 400/230 V ที่ใช้งานในระบบจำหน่าย ในสภาวะโหลดปกติ และโหลดเกิน โดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม สามารถวิเคราะห์กำลังสูญเสียในหม้อแปลงได้เร็วกว่า และใช้ตัวแปรที่น้อยกว่าการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้มาจากการทดสอบที่โรงงานผู้ผลิตหม้อแปลง กระแสที่ใช้ทดสอบตั้งแต่ 1%-140% ที่อุณหภูมิ 35°C, 45°C, 55°C, 65°C และ 75°C แล้วนำมาคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลง มีจำนวนข้อมูล 70,000 ชุด โดยแยกสำหรับเป็นข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของโครงข่ายประสาทเทียม จำนวน 56,000 ชุด และเป็นข้อมูลอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อ

หาค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงของโครงข่ายประสาทเทียม จำนวน 14,000 ชุด จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกับค่าที่คำนวณจากการทดสอบที่โรงงานผู้ผลิต ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดไม่เกิน 1.06 อยู่ในระดับที่น่าพอใจ และสามารถนำวิธีการดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบทดสอบค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลงได้ในอนาคต

คำสำคัญ: โครงข่ายประสาทเทียม, หม้อแปลงจำหน่าย, อุณหภูมิ, กำลังสูญเสียในหม้อแปลง

ABSTRACT

This research paper presents power loss analysis in a 3-phase distribution transformer of 100 kVA 22 kV-400/230 V in normal load and overload conditions using a neural network technique. This method can analyze power loss in the transformer quicker and use fewer variables than the power loss calculation using various parameters obtained from transformer manufacturers. Seventy thousand sets of current tests ranging from 1%-140% at temperatures of 35°C, 45°C, 55°C, 65°C and 75°C were experimentally measured, then power losses are calculated. Fifty-six thousand sets of those were used for training of the neural network to find the parameters and the other 14,000 sets were used for the input data to find power losses. In addition, the power losses obtained from the artificial neural network were compared with calculated power losses by using parameters from transformer manufacturers. The error percentage value no more than 1.06 was at a satisfactory level suggesting that this method can be applied in the designing of electrical power loss test for transformers in the future.

KEYWORDS: Artificial neural network, Distribution transformer, Temperature, Power losses

1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากสำหรับการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า การออกแบบและการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายไฟฟ้าต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดของการไฟฟ้า ในการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีความสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวหม้อแปลง เรียกว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Losses) ซึ่งประกอบด้วยการสูญเสียจากแกนเหล็ก (Core Losses) และการสูญเสียจากขดลวดทองแดง (Copper Losses) [1, 2] ซึ่งประกอบด้วยหลาย ๆ ตัวแปร เช่น แรงดัน, กระแส, ความต้านทาน, อุณหภูมิ, ภาวะทางไฟฟ้า และคุณภาพของขดลวด ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลง มีความยุ่งยากและ

ซับซ้อน อีกทั้งต้องหาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าและอุณหภูมิต่าง ๆ [1, 2] จากงานวิจัยของ Souza et al [1] นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการระบุค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 1 เฟส ขนาด 75 kVA โดยการป้อนตัวแปรสำหรับการคำนวณ 6 ตัวแปร ที่อุณหภูมิ 30°C, 35°C และ 40°C เข้าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ทำให้ลดความยุ่งยากและลดความซับซ้อนของการคำนวณลง ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 1.22% จากงานวิจัยของ Suttisinthong and Pothisarn [3] นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการระบุค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 1 เฟส 30 kVA โดยการป้อนตัวแปรสำหรับการคำนวณ 3 ตัวแปร ที่อุณหภูมิ 35°C, 45°C และ 55°C เข้าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ทำให้สามารถลดความยุ่งยากและความซับซ้อนของการคำนวณลงได้ และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 1.2% และจากงานวิจัยของ Basheer and Hajmeer [4] นำเสนอการใช้โครงข่ายประสาทเทียมค้นหาการประมาณค่าที่ดีที่สุดในการหาค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าคือใช้โครงข่ายประสาทเทียมวิธีแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น (Feed-forward multilayer perceptron. MLP)

ในบทความวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมด้วยการป้อนอินพุตสำหรับคำนวณ 4 ตัวแปร ที่ช่วงอุณหภูมิใช้งานของหม้อแปลง 35°C, 45°C, 55°C, 65°C และ 75°C ในการหาค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟส โดยทำการศึกษาหม้อแปลงที่พิกัด 100 kVA 22 kV-400/230 V ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น (Feed-Forward Multilayer Perceptron. MLP) [4] ซึ่งสามารถลดความจำนวนตัวแปรได้น้อยกว่า 2 ตัวแปร [1] และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่น้อยกว่า [3] ผลจากงานวิจัยสามารถช่วยวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในสภาวะโหลดปกติ และโหลดเกินได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น รวมทั้งสามารถช่วยในการวางแผนการใช้งานหม้อแปลงให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อศึกษาหลักการและวิธีการวัดค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 100 kVA 22kV-400/230 V ที่ใช้งานในระบบจำหน่าย ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

2) นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมด้วยการป้อนอินพุต 4 ตัวแปร ประกอบด้วยอุณหภูมิ (T), กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{Core}), กระแสทางด้านขดลวดแรงต่ำ (I_{LV}), และกระแสทดสอบ (I_{Test}) ที่อุณหภูมิ 35°C, 45°C, 55°C, 65°C และ 75°C ในการหาค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลง

3) นำผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ ช่วยวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในสภาวะโหลดปกติ และโหลดเกินจากการไปใช้งานจริง และสามารถช่วยในการวางแผนการใช้งานหม้อแปลงให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 หลักการที่เกี่ยวข้อง

3.1.1 กำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง (Power Losses)

ค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง ประกอบด้วย กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Losses) และความสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Losses) ดังสมการที่ 1 [1, 3, 5]

$$P_T = P_{Core} + P_{CU} \quad (1)$$

โดยที่ P_T คือ กำลังสูญเสียรวมในตัวหม้อแปลง (W), P_{Core} คือ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (W), P_{CU} คือ กำลังสูญเสียในขดลวดทองแดง (W)

3.1.2 กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก

การทดสอบเปิดวงจร ดังรูปที่ 1 (ก) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ค่าสูญเสียในแกนเหล็กมีผลเนื่องจากความสูญเสียฮิสเตอรีซิส (Hysteresis Loss) และความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy-current Loss) และค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กจะมีค่าคงที่ในทุกๆ สภาวะของภาวะทางไฟฟ้า ดังสมการที่ 2 [1-3]

$$P_{Core} = P_H + P_E \quad (2)$$

โดยที่ P_H คือ ความสูญเสียจากฮิสเตอรีซิส (W), P_E คือ ความสูญเสียจากกระแสไหลวน (W)
- ความสูญเสียฮิสเตอรีซิส (Hysteresis loss) ดังสมการที่ 3 [6]

$$P_H = K_S \cdot B^{1.6} \cdot f \quad (3)$$

โดยที่ K_S คือ สัมประสิทธิ์ของวัสดุที่ผสมในแกนเหล็ก, B คือความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (T), f คือ ความถี่ (Hz)

- ความสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy-current loss) ดังสมการที่ 4 [6]

$$P_E = K_e \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot D^2 \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

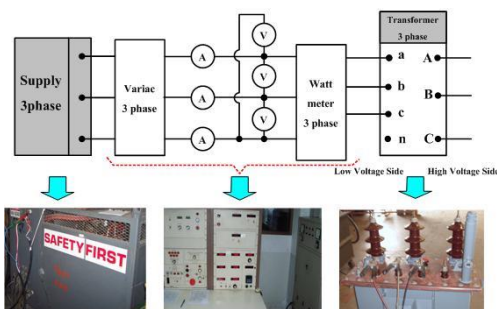
โดยที่ K_e คือ ค่าคงที่กระแสไหลวน, d คือ ความหนาของแกนเหล็กกลาไมเนต (mm), B คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (T) และ f คือ ความถี่ (Hz)

3.1.3 การสูญเสียจากขดลวดทองแดง

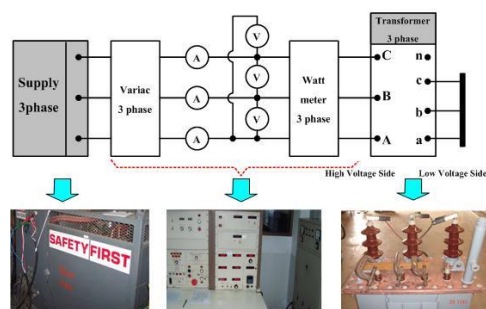
การทดสอบลัดวงจร ดังรูปที่ 1 (ข) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดงโดยลัดวงจรทางด้านแรงต่ำ (Low voltage side) และจ่ายแรงดันทางด้านแรงสูง (High voltage side) ให้ได้ตามพิกัดกระแสด้านแรงสูงหาได้ดังสมการที่ 5 [6, 7]

$$P_{CU} = 3(I_{HV}^2 \cdot R_{HV} + I_{LV}^2) + R_{LV} \quad (5)$$

โดยที่ R_{HV} คือความต้านทานขดลวดแรงสูง, I_{HV} คือ กระแสทางด้านขดลวดแรงสูง, R_{LV} คือ ความต้านทานขดลวดแรงต่ำ และ I_{LV} คือ กระแสทางด้านขดลวดแรงต่ำ



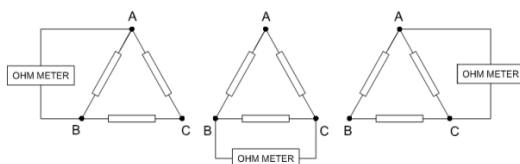
(ก) การทดสอบเปิดวงจร



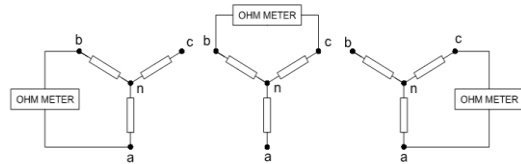
(ข) การทดสอบลัดวงจร

รูปที่ 1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

การวัดความต้านทานของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้เครื่องวัดความต้านทาน ดังรูปที่ 2



(ก) ด้านแรงดันสูง



(ข) ด้านแรงดันต่ำ

รูปที่ 2 การวัดค่าความต้านทานที่ขั้วของหม้อแปลง

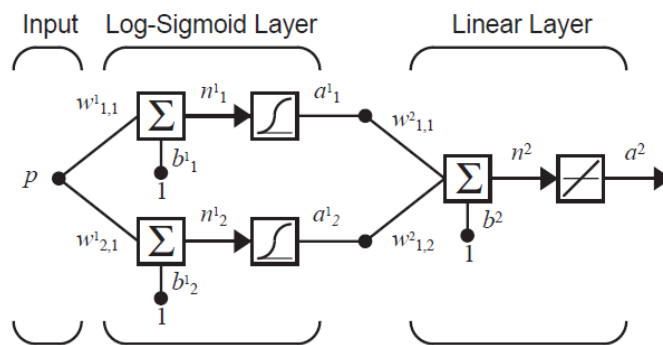
การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงที่อุณหภูมิใช้งานต่าง ๆ จะต้องทำการหาค่าความต้านทานที่อุณหภูมิใช้งานนั้น ๆ โดยค่าความต้านทานขณะทำการวัดเริ่มต้นจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม ค่าความต้านทานตามอุณหภูมิที่ใช้งานสามารถหาได้ดังสมการที่ 6 [8-10]

$$R_r = R_a \left(\frac{235 + \theta_r}{235 + \theta_a} \right) \quad (6)$$

โดยที่ R_r คือ ความต้านทานขดลวดที่อุณหภูมิใช้งาน (θ_r), R_a คือ ความต้านทานขดลวดที่อุณหภูมิแวดล้อม (θ_a)

3.1.4 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks)

จากการศึกษานำโครงข่ายประสาทเทียม [4, 6, 11-14] มาหาค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น (Feed-forward multilayer perceptron, MLP) เหมาะกับการนำมาใช้หาค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้า [11]

จากรูปที่ 3 อินพุต p ถูกคูณด้วย ค่าน้ำหนักประสาท (Weight) w โดยมีไบอัส (Bias) b หรือออฟเซต (Offset) เป็นอีกอินพุตที่มีค่าน้ำหนักคงที่เท่ากับ 1 โดยอินพุตทั้งหมดถูกรวม (Sum) จะได้เอาต์พุตเป็น n มักจะเรียกว่า “เน็ตอินพุต (Net Input)” จะเป็นอินพุตของฟังก์ชันกระตุ้น หรือฟังก์ชันถ่ายโอน (Activation Function) หรือ (Transfer Function) f และได้เอาต์พุตของนิวรอนคือ a ดังสมการที่ 7

$$a = f(wp + b) \quad (7)$$

โดยที่ a คือ เอพาร์ท, w คือ น้ำหนักประสาท, f คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน, p คือ อินพุต และ b คือ ไบอัส

3.1.5 การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง ได้แก่ อุณหภูมิ (T), กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{Core}), กำลังสูญเสียในขดลวด (P_{Cu}), ความต้านทานขดลวดด้านแรงดันสูง (R_{HV}), ความต้านทานขดลวดด้านแรงดันต่ำ (R_{LV}), กระแสทางด้านขดลวดแรงสูง (I_{HV}), กระแสทางด้านขดลวดแรงต่ำ (I_{LV}) และกระแสทดสอบ (I_{Test})

จากสมการที่ 5 ค่ากำลังสูญเสียในขดลวด (P_{Cu}) ขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดและความต้านทานของขดลวด สำหรับกระแสทางด้านขดลวดแรงต่ำ (I_{LV}) มีผลต่อกำลังสูญเสียในขดลวดมากที่สุด เนื่องจากมีค่ากระแสสูงกว่ากระแสทางด้านขดลวดแรงสูง (I_{HV}) มาก และผลการทดสอบเปรียบเทียบการป้อนข้อมูลอินพุตระหว่างกระแสทางด้านขดลวดแรงต่ำ (I_{LV}) กับกระแสทางด้านขดลวดแรงสูง (I_{HV}) การป้อนกระแสทางด้านขดลวดแรงต่ำ (I_{LV}) จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำกว่ากระแสทางด้านขดลวดแรงสูง (I_{HV})

จากงานของ Souza et al [1] ในการหาค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า ใช้ 6 ตัวแปรประกอบด้วย อุณหภูมิ (T), ความต้านทานขดลวดด้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำ (R_{HV} และ R_{LV}), กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{Core}), กำลังสูญเสียของขดลวดทองแดง (P_{Cu}), และกระแสทดสอบ (I_{Test})

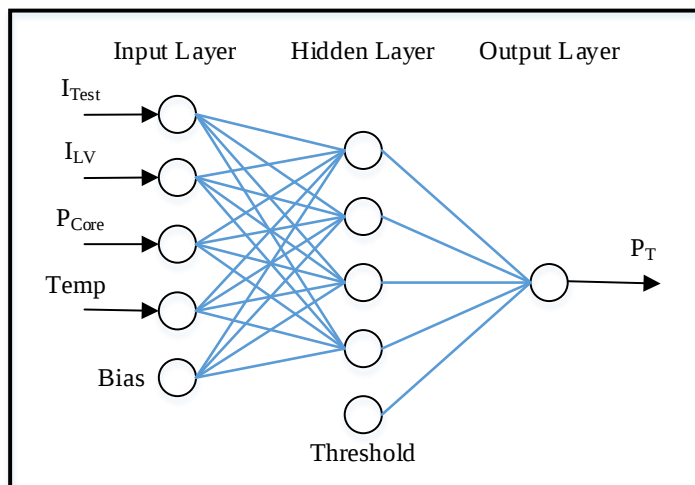
งานวิจัยนี้จะใช้อินพุต 4 ตัวแปร ประกอบด้วยอุณหภูมิ (T), กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{Core}), กระแสทางด้านขดลวดแรงต่ำ (I_{LV}), และกระแสทดสอบ (I_{Test}) เป็นข้อมูลป้อนเข้าโครงข่ายประสาทเทียม

โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้มาจากการทดสอบหม้อแปลงที่บริษัทผู้ผลิต จำนวน 100 เครื่อง ใช้กระแสที่ทดสอบตั้งแต่ 1%-140% นำมาคำนวณที่อุณหภูมิ 35°C, 45°C, 55°C, 65°C และ 75°C แล้วนำมาคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลง สามารถแยกข้อมูลออกได้จำนวน 70,000 ชุด โดยแบ่งสำหรับเป็นข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงข่ายประสาทเทียม จำนวน 80 เครื่อง (56,000 ชุด) ดังตารางที่ 1 และเป็นข้อมูลอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อหาค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงของโครงข่ายประสาทเทียม จำนวน 20 เครื่อง (14,000 ชุด) จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากการวัดในโรงงาน เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ใช้ในการสอนโครงข่ายประสาทเทียม

No	I _{Test} (%)	I _{LV} (A)	P _{CORE} (W)	Temp (°C)	P _T (W)
1	1	1.44	240.2	35	240.3
2	2	2.89	240.2	35	240.7
3	3	4.33	240.2	35	241.3
4	4	5.77	240.2	35	242.2
5	5	7.22	240.2	35	243.4
136	136	196.30	240.2	35	2602.1
137	137	197.74	240.2	35	2637.0
138	138	199.19	240.2	35	2672.1
139	139	200.63	240.2	35	2707.5
140	140	202.07	240.2	35	2743.1
11201	1	1.44	240.2	45	240.3
11202	2	2.89	240.2	45	240.7
11203	3	4.33	240.2	45	241.4
11204	4	5.77	240.2	45	242.3
11205	5	7.22	240.2	45	243.5
11336	136	196.30	240.2	45	2689.6
11337	137	197.74	240.2	45	2725.7
11338	138	199.19	240.2	45	2762.1
11339	139	200.63	240.2	45	2798.8
11340	140	202.07	240.2	45	2835.8
22401	1	1.44	240.2	55	240.3
22402	2	2.89	240.2	55	240.7
22403	3	4.33	240.2	55	241.4
22404	4	5.77	240.2	55	242.4
22405	5	7.22	240.2	55	243.6
22536	136	196.30	240.2	55	2777.1
22537	137	197.74	240.2	55	2814.5
22538	138	199.19	240.2	55	2852.2
22539	139	200.63	240.2	55	2890.2
22540	140	202.07	240.2	55	2928.5
33601	1	1.44	240.2	65	240.3
33602	2	2.89	240.2	65	240.8
33603	3	4.33	240.2	65	241.5
33604	4	5.77	240.2	65	242.5
33605	5	7.22	240.2	65	243.7
33736	136	196.30	240.2	65	2864.5
33737	137	197.74	240.2	65	2903.3
33738	138	199.19	240.2	65	2942.3
33739	139	200.63	240.2	65	2981.6
33740	140	202.07	240.2	65	3021.2
55861	1	1.44	240.2	75	240.3
55862	2	2.89	240.2	75	240.8
55863	3	4.33	240.2	75	241.5
55864	4	5.77	240.2	75	242.5
55865	5	7.22	240.2	75	243.9
55866	6	8.66	240.2	75	245.5
55867	7	10.10	240.2	75	247.4
55868	8	11.55	240.2	75	249.6
55869	9	12.99	240.2	75	252.0
55870	10	14.43	240.2	75	254.8
55991	131	189.08	240.2	75	2750.4
55992	132	190.53	240.2	75	2788.8
55993	133	191.97	240.2	75	2827.6
55994	134	193.41	240.2	75	2866.7
55995	135	194.86	240.2	75	2906.0
55996	136	196.3	240.2	75	2945.6
55997	137	197.74	240.2	75	2985.6
55998	138	199.19	240.2	75	3025.8
55999	139	200.63	240.2	75	3066.3
56000	140	202.07	240.2	75	3107.1

จากตารางที่ 1 เป็นข้อมูลที่ได้มาจากการทดสอบหม้อแปลงที่บริษัทผู้ผลิต นำมาทำการฝึกสอนให้ได้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม อินพุต 4 โหนด ชั้นซ่อน (Hidden Layer) 4 โหนด ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นลอจิสติกมอยด์ (Log-sigmoid) และชั้นเอาต์พุต (Output Layer) 1 โหนด ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นลิเนียร์ฟังก์ชัน (Linear) แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม แบบอินพุต 4 ตัวแปร

ค่าพารามิเตอร์ กระแสทดสอบที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ (I_{Test}) กระแสด้านแรงดันต่ำ (I_{LV}) กำลังสูญเสียของแกนเหล็ก (P_{CORE}) อุณหภูมิของหม้อแปลงและค่าไบอัส (Bias) ในแต่ละโหนดของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม แบบอินพุต 4 ตัวแปร แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การปรับปรุงโครงข่ายประสาทเทียม (Improved Neural Network)

Hidden 1			
Node 1 (Sigmoid)	Node 2 (Sigmoid)	Node 3 (Sigmoid)	Node 4 (Sigmoid)
I_{Test} (%): -2.792	I_{Test} (%): -1.514	I_{Test} (%): -0.388	I_{Test} (%): -0.052
I_{LV} (A): -2.743	I_{LV} (A): -1.396	I_{LV} (A): -0.414	I_{LV} (A): -1.034
P_{CORE} (W): 0.041	P_{CORE} (W): -0.004	P_{CORE} (W): -0.049	P_{CORE} (W): -0.001
Temp: -0.242	Temp: -0.257	Temp: 0.887	Temp: -0.086
Bias: -6.109	Bias: 3.548	Bias: -1.023	Bias: 0.640

ตารางที่ 2 การปรับปรุงโครงข่ายประสาทเทียม (Improved Neural Network) (ต่อ)

Output
Regression (Linear)
Node 1: 0.153
Node 2: -1.960
Node 3: -0.086
Node 4: -1.606
Threshold: 2.449

4. ผลการวิจัย

ข้อมูลจากการทดสอบจริงของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 100 kVA 22kV-400/230 V ที่ใช้งานในระบบจำหน่าย แล้วนำไปผ่านการฝึกสอน จะเป็นแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม และทำการประเมินแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลที่วัดจริงเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จากการเปรียบเทียบข้อมูลจำนวน 20 เครื่อง (14,000 ชุด) ได้ตั้งตารางที่ 3 โดยแสดงค่าจากการจำลอง Prediction (P_T) กับค่าที่วัดได้จริง P_T (W) มีค่าผิดพลาดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ error (%) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ Temp ($^{\circ}\text{C}$) และกระแสทดสอบที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ I_{Test} (%)

ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลง

No.	I_{Test} (%)	P_T (W)	Prediction (P_T)	error (%)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)
1	1	238.93	239.09	0.07	35
2	2	239.31	239.57	0.11	35
3	3	239.96	240.28	0.13	35
4	4	240.86	241.22	0.15	35
5	5	242.02	242.41	0.16	35
136	136	2617.44	2600.71	-0.64	35
137	137	2652.55	2635.90	-0.63	35
138	138	2687.91	2671.34	-0.62	35
139	139	2723.53	2707.03	-0.61	35
140	140	2759.42	2742.95	-0.60	35

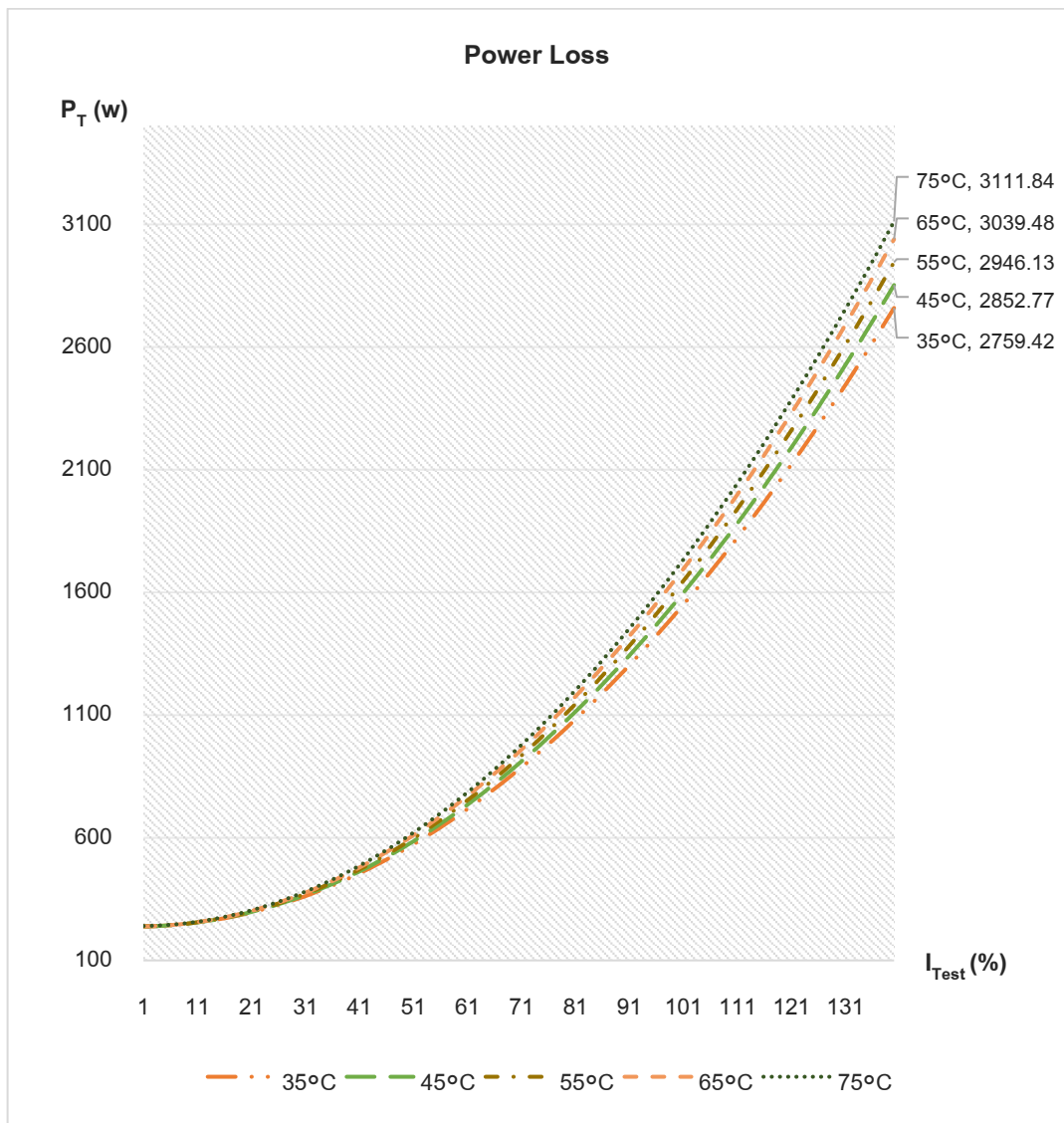
No.	I_{Test} (%)	P_T (W)	Prediction (P_T)	error (%)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)
2801	1	238.93	239.63	0.29	45
2802	2	239.33	240.16	0.35	45
2803	3	240.00	240.91	0.38	45
2804	4	240.93	241.90	0.40	45
2805	5	242.13	243.13	0.41	45
2936	136	2705.54	2686.18	-0.72	45
2937	137	2741.94	2722.50	-0.71	45
2938	138	2778.62	2759.05	-0.70	45
2939	139	2815.56	2795.81	-0.70	45
2940	140	2852.77	2832.78	-0.70	45

ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลง (ต่อ)

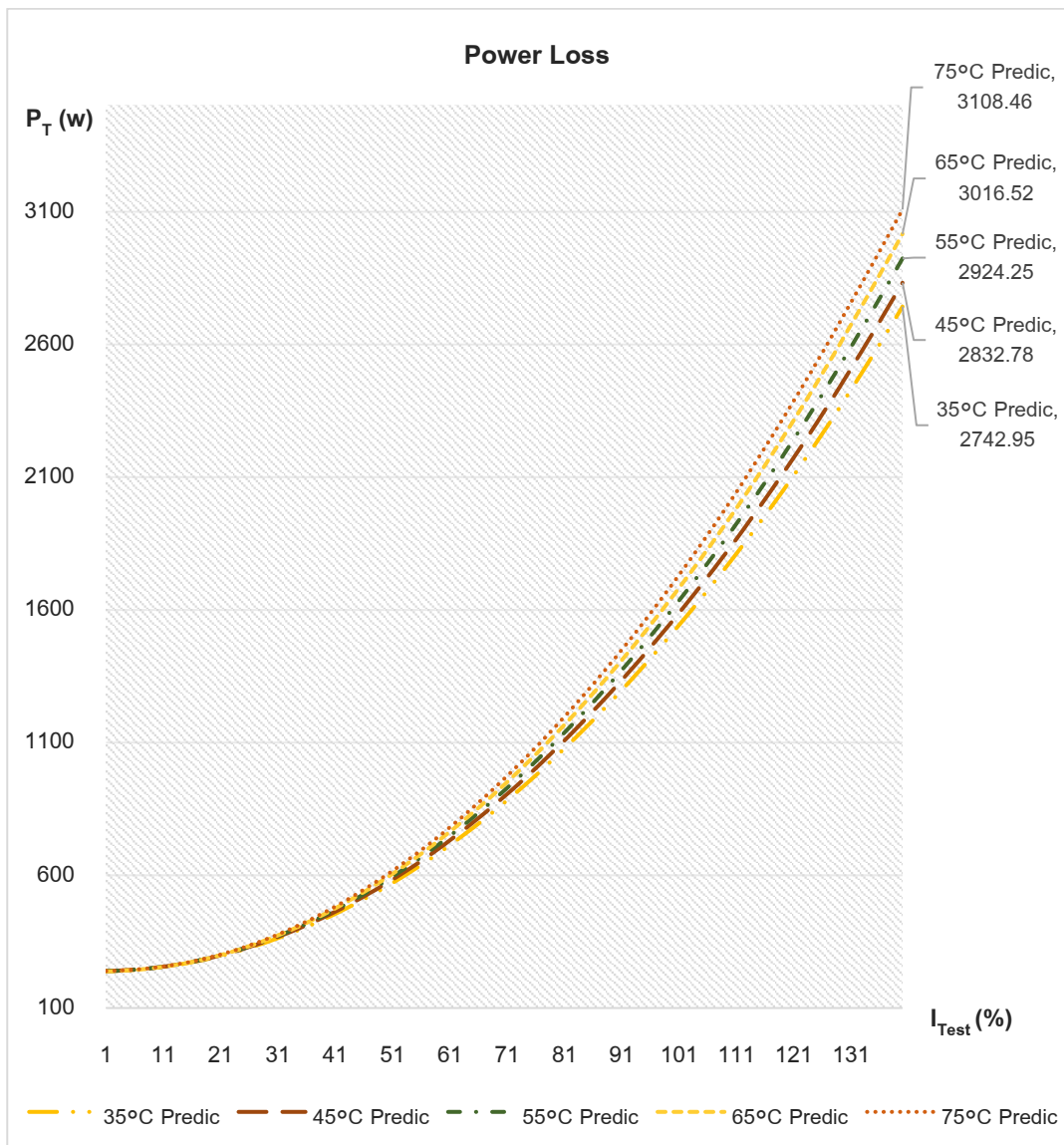
No.	I _{Test} (%)	P _T (W)	Prediction (P _T)	error (%)	Temp (°C)
5601	1	238.94	238.94	0.00	55
5602	2	239.35	239.52	0.07	55
5603	3	240.04	240.32	0.12	55
5604	4	241.01	241.35	0.14	55
5605	5	242.25	242.62	0.15	55
5736	136	2793.63	2773.68	-0.71	55
5737	137	2831.34	2811.05	-0.72	55
5738	138	2869.33	2848.61	-0.72	55
5739	139	2907.59	2886.35	-0.73	55
5740	140	2946.13	2924.25	-0.74	55
8401	1	238.94	238.05	-0.38	65
8402	2	239.37	238.68	-0.29	65
8403	3	240.09	239.53	-0.23	65
8404	4	241.09	240.59	-0.20	65
8405	5	242.37	241.89	-0.20	65

No.	I _{Test} (%)	P _T (W)	Prediction (P _T)	error (%)	Temp (°C)
8536	136	2881.73	2862.49	-0.67	65
8537	137	2920.74	2900.80	-0.68	65
8538	138	2960.04	2939.25	-0.70	65
8539	139	2999.62	2977.83	-0.73	65
8540	140	3039.48	3016.52	-0.76	65
13861	1	240.15	239.55	-0.25	75
13862	2	240.59	240.24	-0.14	75
13863	3	241.32	241.12	-0.08	75
13864	4	242.34	242.21	-0.06	75
13865	5	243.66	243.51	-0.06	75
13996	136	2950.08	2951.70	0.05	75
13997	137	2990.08	2990.78	0.02	75
13998	138	3030.37	3029.94	-0.01	75
13999	139	3070.96	3069.18	-0.06	75
14000	140	3111.84	3108.46	-0.11	75

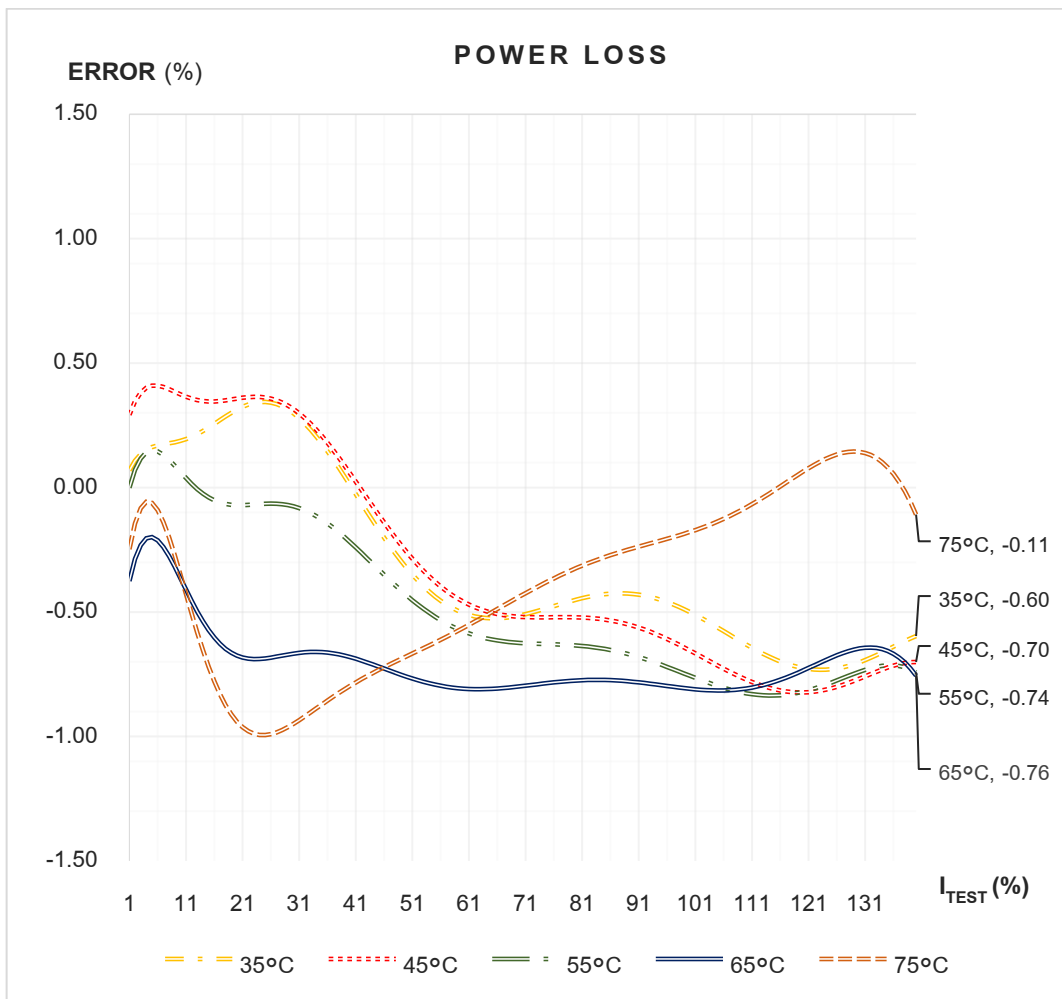
จากตารางที่ 3 สามารถแสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากการจำลองกับค่าที่วัดได้จริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังรูปที่ 5 และสามารถแสดงตัวอย่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแต่ละอุณหภูมิ ดังรูปที่ 6 ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดทั้งบวกและลบ เนื่องจากค่าจากการจำลองกับค่าที่วัดได้จริงมีค่ามากน้อยสลับกัน



รูปที่ 5 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากการจำลองกับค่าที่วัดได้จริงที่อุณหภูมิที่ 35°C, 45°C, 55°C, 65°C และ 75°C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากการจำลองกับค่าที่วัดได้จริงที่อุณหภูมิที่ 35°C Predic, 45°C Predic, 55°C Predic, 65°C Predic และ 75°C Predic



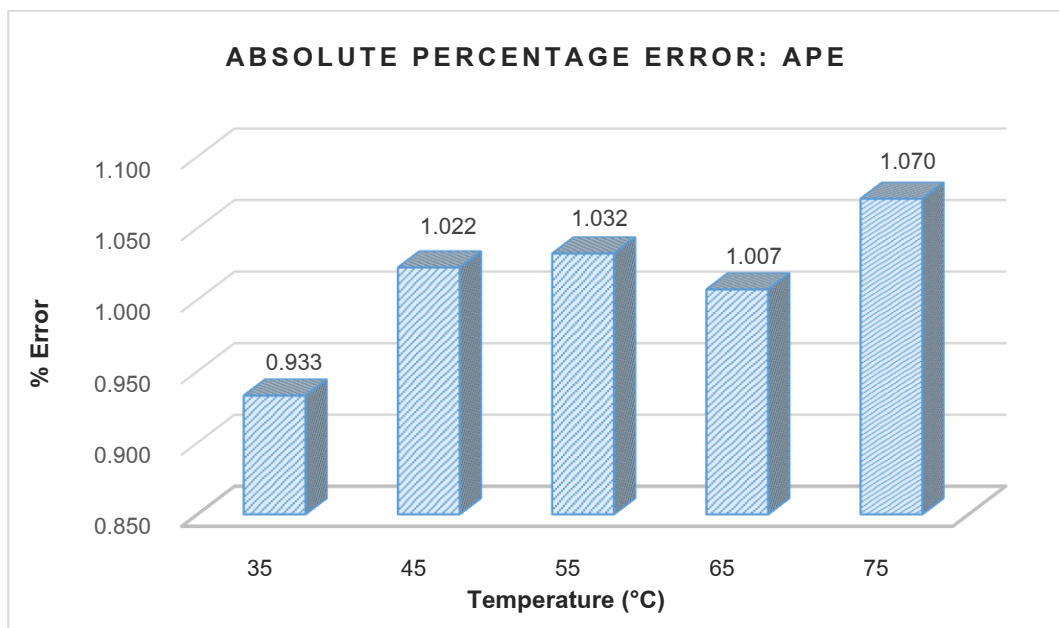
รูปที่ 5 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากการจำลองกับค่าที่วัดได้จริงที่อุณหภูมิที่ 35°C, 45°C, 55°C, 65°C และ 75°C (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากการจำลองกับค่าที่วัดได้จริงที่อุณหภูมิที่ 35°C Predic, 45°C Predic, 55°C Predic, 65°C Predic และ 75°C Predic (ต่อ)



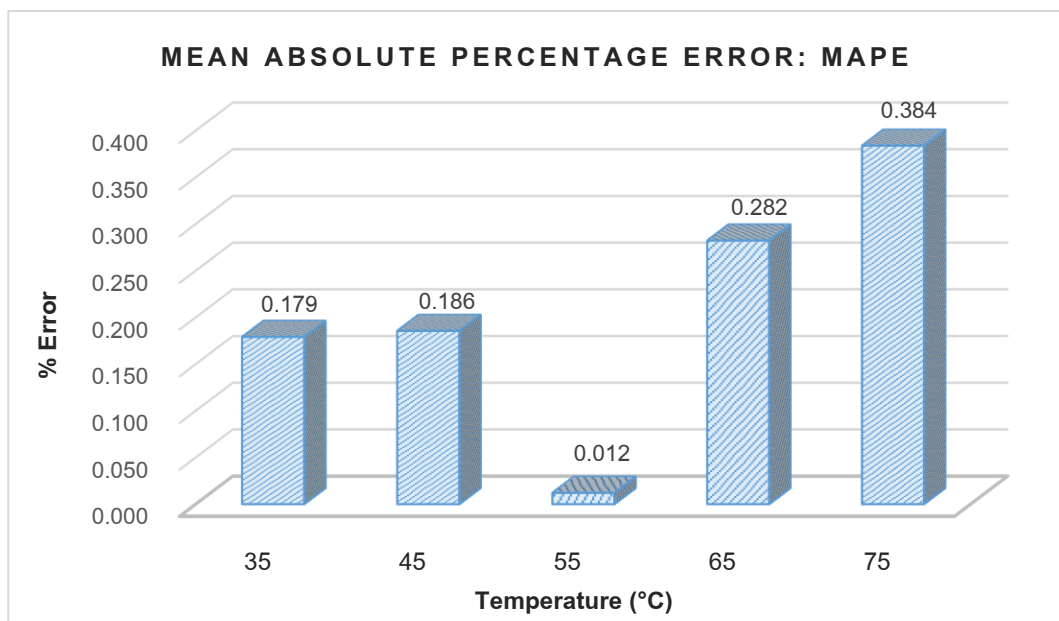
รูปที่ 6 เปอร์เซนต์ความผิดพลาดที่อุณหภูมิที่ 35°C, 45°C, 55°C, 65°C และ 75°C

5. สรุปอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการทดสอบในตารางที่ 3 ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าจากการจำลองสามารถเปรียบเทียบเปอร์เซนต์ความผิดพลาด โดยในงานวิจัยจะเลือกใช้ APE กับ MAPE เนื่องจากค่าความผิดพลาดมีค่าต่ำ จะให้ค่าความแม่นยำสูง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซนต์ผิดพลาดสัมบูรณ์ (Absolute Percentage Error: APE) กับค่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซนต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) กับค่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมบูรณ์กับค่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์กับค่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ

การคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟส ต้องใช้ตัวแปรในการคำนวณ 6 ตัวแปร แต่ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคที่ช่วยในการหาค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 100 kVA 22kV-400/230 V ที่ใช้งานในระบบจำหน่ายโดยตัวแปรในการคำนวณเพียง 4 ตัวแปร และใช้โครงข่ายประสาทเทียม ทำหน้าที่เป็นตัวคาดการณ์ (Prediction) และจากการทดสอบข้อมูลที่ได้จากการวัดจริง 14,000 ชุด ทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมบูรณ์ (Absolute Percentage Error: APE) ไม่เกิน 1.06 และค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ไม่เกิน 0.17 ซึ่งอยู่ในช่วงที่น่าพอใจ

ผลที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบ ลดขั้นตอนการคำนวณ และยังช่วยประเมินการจ่ายโหลดในสถานะต่างๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การประหยัดพลังงาน และผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพที่ดี มีความถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริง และสามารถพัฒนาต่อไปในอนาคตได้ โดยมีข้อจำกัดสามารถใช้ในการทำนายค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม (P_T) ของหม้อแปลงจำหน่าย ไม่เกิน 2,000 kVA ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท ที.ดี.ทรานสฟอร์เมอร์ จำกัด และบริษัทพงษ์พیمانการไฟฟ้า จำกัด ที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

References

- [1] Souza AN, Silva IN, Souza CFLN, Zago MG. Using artificial neural networks for identification of electrical losses in transformers during the manufacturing phase. Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks Vol.2; 2002 May 12-17; Honolulu, HI, USA. 2002. p. 1346-50
- [2] Suechoey B. Estimating the economically optimal size of distribution transformer to suitable the load and reduce electrical power losses. Kasem Bundit Engineering Journal 2024;14(1):48-61. (In Thai)
- [3] Suttisinthong N, Pothisarn C. Analysis of Electrical Losses in Transformers using Artificial Neural Networks. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2014 Vol II (IMECS 2014); 2014 Mar 12-14, 2014; Hong Kong. p. 705-8

- [4] Basheer IA, Hajmeer M. Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. *Journal of Microbiological Methods* 2000;43(1):3-31.
- [5] Suechoey S, Siriporananon S, Pringsakul N, Thongrak A. Implementation of load cycle simulation for studies of loss energy and lifetime of oil-immersed transformers. *Proceedings of the 10th International Conference on Sciences, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2018)*; 2018 May 9-11; Vientiane, Laos. p. 202-7.
- [6] Siriporananon S, Suechoey B. Power losses analysis in a three-phase distribution transformer using artificial neural networks. *The ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications* 2020;18(2):130-6.
- [7] Siriporananon S, Suechoey B, Pringsakul N. Performance testing of transformers used in distribution systems. *Proceedings of the 10th International Conference on Sciences, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2018)*; 2018 May 9-11; Vientiane, Laos. p. 196-201.
- [8] International Electrotechnical Commission. IEC60076-2. Power transformer part 2: temperature rise for liquid-immersed transformers. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission; 2011.
- [9] Grainger JJ, Stevenson WD. *Power system analysis*. Newyork, USA: McGraw-Hill; 1994.
- [10] Provincial Electricity Authority Thailand (PEA). Three-phase transformer for 22 kV and 33 kV distribution systems with ability to withstand short circuit, specification No. RTRN-035/2558. Bangkok, Thailand: Provincial Electricity Authority Thailand; 2015.
- [11] Hagan MT, Demuth HB, Beale M. *Neural network design*. Boston, USA: PWS Publishing Company; 1996.
- [12] Demuth H, Beale M. *Neural network toolbox user's guide*. Natick, MA: The Mathwork; 1998.
- [13] Souza KN, Castro TN, Pereira TM, Pontes RST, Braga APS. Prediction of core losses on a three-phase transformer using neural network. *Proceeding of the International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2011)*; 2011 May 15-19; Rio de Janeiro, Brazil. p.1105-8.
- [14] Yadav AK, Azeem A, Singh A, Malik H, Rahi OP. Application research based on Artificial Neural Network (ANN) to predict no-load for transformer's design. *Proceeding of the 2011 International Conference on Communication Systems and Network Technologies*; 2011 Jun 3-5; Katra, India. p.180-3.

ประวัติผู้เขียนบทความ



บุญเลิศ สือเฉย ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการหลักสูตรปริญญา
ดุขฎฐิบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
19/1 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160 เบอร์โทรศัพท์
02-8074500 ต่อ 312 E-mail: tdlert@hotmail.com



สมศักดิ์ สิริโปรภานนท์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัย
เอเชียอาคเนย์ 19/1 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160
เบอร์โทรศัพท์ 02-8074500 ต่อ 312 E-mail: somsaks@sau.ac.th



นรุตม์ เพ็ชรเจริญ นักศึกษาหลักสูตรปริญญาดุขฎฐิบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ 19/1 ถนนเพชรเกษม
เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160 เบอร์โทรศัพท์ 02-8074500 ต่อ 312
E-mail: petchjarern@gmail.com

Article History:

Received: June 11, 2024

Revised: August 28, 2024

Accepted: August 29, 2024

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต:

ศ.ดร.กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์	สาขาวิศวกรรมขนส่ง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.แคลิยา ปัทมพรหม	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศ.ดร.โจเซฟ เดดารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.วัฒนวงศ์ รัตนวราห	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศ.ดร.สุวัฒน์ จิตตลดาการ	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
Prof. Dr. Belkacem Zeghamati	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.กรองแก้ว เลาหลิดานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.กัณวรัช พลุปราชญ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.กิตติพงศ์ อัครกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.จิรนุช เสี่ยงมศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ชูสิทธิ์ ประดับเพ็ชร	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
รศ.ดร.ชัยณรงค์ อธิสกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.ณกร อินทร์พยุง	คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา
รศ.ดร.ณฐา คุปต์ขจีบุตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ดนุพล ตันนโยภาส	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เทอดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ธนุ ฉุยฉาย	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.นคร ภู่วโรคม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.นิตย์ เพ็ชรรักษ์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
รศ.ดร.นิตมา อัจฉริยะโพธา	ศูนย์บริการทางการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตราชบุรี
รศ.ดร.เนตรนภิส ดันเต็มทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.บุญเลิศ สือเฉย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัดชู	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ประยูร สุรินทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รศ.ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
รศ.ดร.พนิต ภูจินดา	ภาควิชาการวางแผนภาคและเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พรฤดี เนติโสภาคกุล	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.พานิช วุฒิพฤษ	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พาสีทธิ์ หล่อธีรพงศ์	บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.พิศิษฐ์ โภการัตน์กุล	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.พุทฺศักดิ์ ชิวสุวิทย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภัทรมน จงประดิษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.ภาวิณี เอี่ยมตระกูล	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.มาโนช สรรพกิจทิพาการ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทงจิตร	บัณฑิตวิทยาลัย สาขาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
รศ.ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.ระพี กาญจนะ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.วรรณุช แจงสว่าง	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
รศ.ดร.วรพจน์ กรีสระเดช	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และปัญญาประดิษฐ์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วัชร เพียรสุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวดิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.สถาพร โอภาสานนท์	สาขาวิชาบริหารธุรกิจระหว่างประเทศ โฉจิสติกส์และการขนส่ง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.สมใจ จันทร์อุดม	สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.สมศักดิ์ มิตะธา	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สินชัย ชินวรรตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สิริพร ไรจนันต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.เสรี เศวตเศรณี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.สุนิติ สุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.สุรพล บุญลือ	ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.อดิศักดิ์ กาญจนหฤทัย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.อรจักร จิตต์โสภาคย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสาพันธ์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์
รศ.ดร.อำพล การณสุนทวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต บางเขน
รศ.วิญญู แสงสนิทกิจ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยา เขตบางเขน
รศ.เอกชัย วิมลมาลา	ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.เอนก ศิริพานิชกร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.กรกช ทวีสิน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผศ.ดร.กฤษ สุจริตตั้งธรรม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผศ.ดร.กัมพล พรหมจิระประวัตติ	สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ
ผศ.ดร.กฤษณ ทอณศรี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เขมพัฒน์ ดันติวัฒนกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จักร จันทลักษณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จารุวรรณ เกษมทรัพย์	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.จิราพรณ สุทธธโชติ	ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.จิราวรรณ อุ้มเมตตาอารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.เจษฎา ชัยโณม	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ฉัตร สุจินดา	ธุรกิจส่วนตัว
ผศ.ดร.ชลัท ทิพาการเกียรติ	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ.ดร.ชัยรัตน์ ชีระวัฒนสุข	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ณัฏวิภา เจริญระโนวชิระ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ณัฐ โอธนาทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์น้อย	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดนัย เผ่าฤทธิทรัพย์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดวงพร กาชาสปี	สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ดาวุด ทองทา	ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ติกะ บุนนาค	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
ผศ.ดร.ตรี วาทกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเกษตรและเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยนครพนม
ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ ตะกระโทก	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.นที ศรีสวัสดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ปรารถน์ ศุภมิตรโยธิน	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.พงศกร บำรุงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.พงษ์สัณฐ์ ประกฤตศรี	ภาควิทยาศาสตร์พื้นฐานและพลศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.พิพัฒน์พงศ์ วัฒนวันยู	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ.ดร.พิมพ์เพชร สระทองอ่อน	สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผศ.ดร.มนทล นาวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.มนูญ มาศนิยม	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.รัฐวุฒิ ฐันทนคุณ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสยาม
ผศ.ดร.วรัญญู วงษ์เสรี	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วัชรินทร์ ดงบัง	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง
ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผศ.ดร.วินัย ไฉกล้ำ	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ศิริชล ศิริธร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.สนิท วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมบัติ เจริญวิไลศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมศักดิ์ มีนคร	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิตางศุ์ พิไลย์หล้า	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.สิริชัย จีรวงศ์นุสรณ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.สุจิตา ทิปรักษ์พันธุ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.สมล แสงเฮง พิสิษฐ์สังฆการ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.อรกมล วังอภิสิทธิ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.กัมปนาท ไชยเพชร	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผศ.กานติส สุดสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.จิรเมธา สังข์เกษม	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.นราธิป แสงซ้าย	ศูนย์แห่งความเป็นเลิศเฉพาะทางด้านการวิจัยและพัฒนา อุตสาหกรรมเครื่องเรือน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.พรสิริ ชาดิปรีชา	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญา ภิวัฒน์
ผศ.วรรณะ ประภาภรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.วรารกร เกิดทรัพย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
ผศ.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.อุษณีย์ ระหา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.อนุชิต เจริญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.กฤษชัย วิถีพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
อ.ดร.กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล พระนคร
อ.ดร.คมพันธ์ ชมสมุทร	สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลพระนคร
อ.ดร.จักรภาพ วงศ์วิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
อ.ดร.ฉัตรเพชร ยศพล	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ชัยพันธ์ ขำญาติ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยา เขตบางเขน
อ.ดร.ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
อ.ดร.ชาติ ฤทธิ์หิรัญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย นเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและ นวัตกรรมแห่งชาติ

อ.ดร.ชานินทร์ ศรีสุวรรณนา	ภาควิชาสถิติประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อ.ดร.ณัฐภรณ์ เจริญธรรม	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิต	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.ดุชนิ สติระเศรษฐี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ตันติกร พิษณุพิบูล	คณะกรรมการจัดการโลจิสติกส์และการคมนาคมขนส่ง สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.บุญเลิศ วงศ์เจริญแสงศิริ	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.ปริญญา บุญกนิษฐ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ประภาส ผ่องสนาม	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อ.ดร.ปรารภนา อินตะวิน	สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.ดร.พงศกร พรหมสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
อ.ดร.พิชิตภูมิ จรัสบำรุงโรจน์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
อ.ดร.ภาสินี ศิริประภา	คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อ.ดร.วรศิริ เดอ กาเดอนต์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.วาทัญญ รอดประพัฒน์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร.วสิน มหัตนรินทร์กุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.วิทยา พวงสมบัติ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อ.ดร.วีรเดช กิรติชนวิทย์	สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

อ.ดร.ศรินรัตน์ วงษ์ลี	กลุ่มวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์ แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
อ.ดร.สำเริง เนตรภู	บริษัท เอส. เอช. เค. เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด
อ.ดร.สุวรรณี สายสิน	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิม พระเกียรติ
อ.ดร.อดิเทพ ศรีคงศรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.อภิชาติ บัวกล้า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
อ.ดร.อนันต์ เดอร์ชิง	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ
อ.ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ดร.จุฑา สุนิตย์สกุล	สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง
ดร.พุทธิพงษ์ หะสิทธิ์รัตนวัฒนา	สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท
ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์	สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง
อ.จิรวรรณ ปล่องไหม	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
อ.ณัฐนันท์ รัตนไชย	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
อ.นิตยา จันทรเรือง มหาผล	เลขาธิการสภาวิศวกร ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
อ.ว่าที่ ร.ต.สรวิชัย ดาแก้ว	คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
อ.สมเดช อิงคะวะระ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา



ปรัชญา ปณิธาน

1. ผลิตบัณฑิตทางวิศวกรรมที่มีคุณภาพ เพื่อสนองความต้องการของส่วนราชการ เอกชน ให้สอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ
2. ค้นคว้าและวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะสิ่งที่ยังประโยชน์ให้เกิดแก่ประเทศไทยโดยตรง
3. บริการวิชาการ และให้คำปรึกษาแนะนำทางวิศวกรรมศาสตร์แก่หน่วยงานของรัฐและเอกชน รวมทั้งประชาชนทั่วไป

เป้าหมาย และวัตถุประสงค์

1. ผลิตบัณฑิตทางวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อแสวงหาเทคโนโลยีที่ทันสมัย อันนำไปสู่การพัฒนาตนเองทางเทคโนโลยีในการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ
2. ให้บริการวิชาการด้านวิศวกรรมศาสตร์แก่สังคม

วิสัยทัศน์

**“คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต เป็นคณะวิศวกรรมศาสตร์
ที่ติดอันดับ 1 ใน 10 ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอกชน ที่เป็นที่ยอมรับ
โดยมุ่งเน้นผลิตบัณฑิตวิศวกรนักปฏิบัติที่มีนั้คงและยั่งยืน”**

ผู้เขียนจะต้องจัดเตรียมบทความต้นฉบับที่พิมพ์ตามข้อกำหนดของรูปแบบวารสาร จำนวน 1 ชุด และผู้เขียนบทความกรอกข้อมูลใบนำส่งบทความ พร้อมสแกนใบนำส่งบทความและแนบไฟล์ต้นฉบับบทความ มาที่

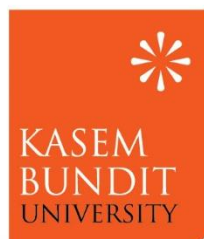
E-mail: engkasemjournal@kbu.ac.th

และสมัครสมาชิกพร้อมส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System ได้ที่

<https://www.tci-thaijo.org/index.php/kbej/user/register>

ท่านที่สนใจสามารถดูรายละเอียดและดาวน์โหลดแบบฟอร์มต่างๆ หรือสอบถามเพิ่มเติม ได้ที่

- เว็บไซต์: http://eng.kbu.ac.th/home/?main_page=research&page=engineer_journal
- E-mail: engkasemjournal@kbu.ac.th
- <https://www.tci-thaijo.org/index.php/kbej/user/register>
- โทรศัพท์: 0-2320-2777 ต่อ 1211



www.kbu.ac.th

วิทยาเขตพัฒนาการ

1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง
กรุงเทพฯ 10250
โทร. 0-2320-2777
Fax : 0-2321-4444

วิทยาเขตร่มเกล้า

60 ถนนร่มเกล้า เขตมีนบุรี
กรุงเทพฯ 10510
โทร. 0-2904-2222
Fax : 0-2904-2200