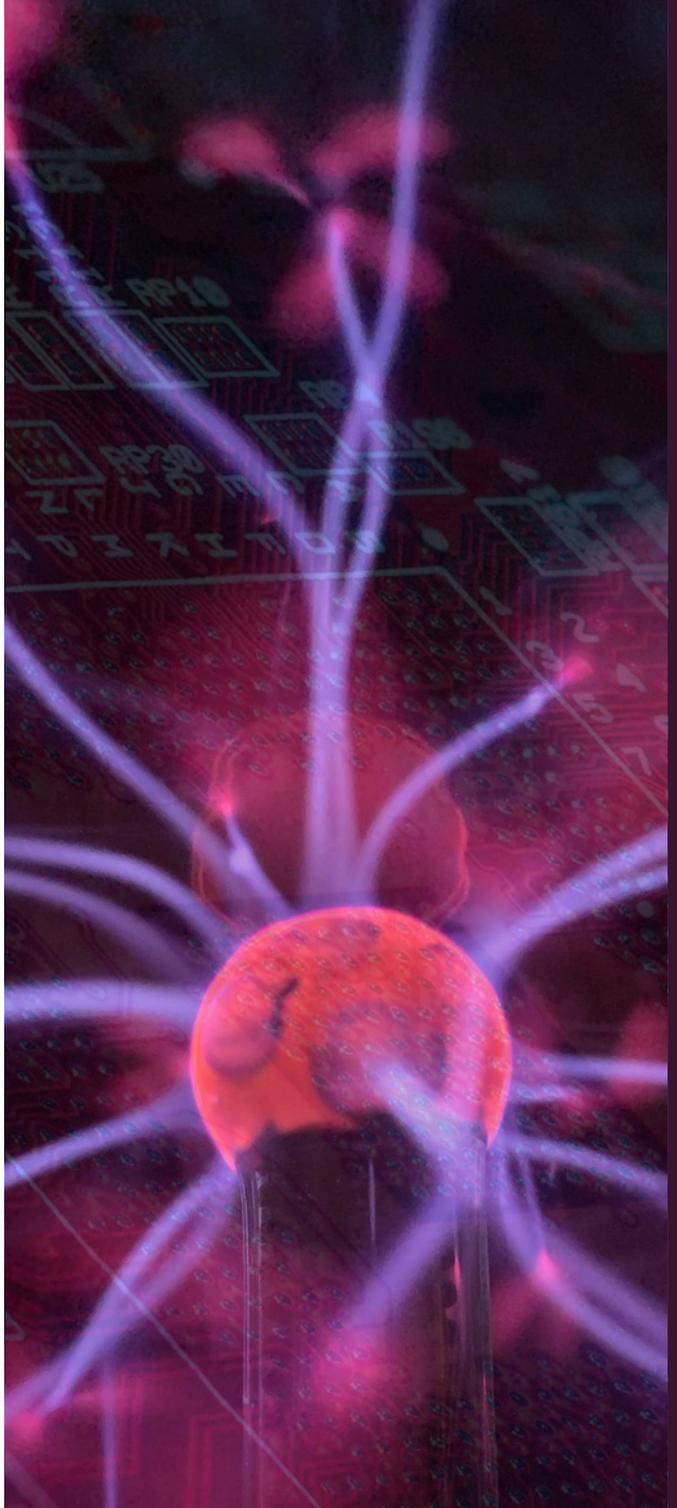


RMUTP

RMUTP

RESEARCH JOURNAL  
*Sciences and Technology*



วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร  
**สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**

ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 ประจำเดือนกรกฎาคม – ธันวาคม 2568  
Vol. 19 No. 2 July – December 2025

E-ISSN : 3027-8260

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
RMUTP RESEARCH JOURNAL Sciences and Technology

ที่ปรึกษา

ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา บุญกนิษฐ

รองอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี

กองบรรณาธิการ จากหน่วยงานภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์วิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.อรธกร	เก่งพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.สันติ	แมนศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.ทรงศักดิ์	เพ็ชรมิตร	มหาวิทยาลัยมหิดล
ศาสตราจารย์ ดร.รัตติก	ยี่มนิรัฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย	อมรศักดิ์ชัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย	พองสมุทร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา	รัตนวิไล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ	แววศักดิ์	มหาวิทยาลัยทักษิณ
รองศาสตราจารย์ ดร.พนิดา	กั้งซุ่น	มหาวิทยาลัยทักษิณ
รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล	กลีนบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กองบรรณาธิการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งอรุณ พรเจริญ	รองศาสตราจารย์ ดร.รัตนพล มงคลรัตนาสีทธี
รองศาสตราจารย์ ดร.กัลทิมา เชาวน์ชาญชัยกุล	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรลักษณ์ ปัญญาธิติพงศ์
ดร.ชลากร อุดมรักษาสกุล	ดร.สิงห์แก้ว ปือกเพ็ง
ดร.วราพร ทองจีน	นางสาวพัชรนันท์ ยั่งวรวีเชียร

## สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2568 ISSN 3027-8260 (Online)

---

หน้า

### บทความวิจัย:

ผลการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ทาร์ต จิราภัทร โอทอง และ กฤษณธร साเอี่ยม	1
โปรแกรมสำหรับจำลองฟลักโปรไฟล์ในเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี พลาริป คัคโนภาส และ สมเกียรติ สุกางโฮง	13
การประยุกต์ใช้เทคนิคการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ กรณีศึกษาอ่างเก็บน้ำห้วยหลวง นิวัตร ภูมิพันธ์ นพรัตน์ ธรรมวงษา และ ณัฐพงศ์ บุตรธนู	27
จลนศาสตร์การดูดซับสารหนูของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกกล้วย นำพร ปัญญาใหญ่ ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย จิระพล กลิ่นบุญ และ ทิพาพร คำแดง	40
การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ กมลพรรณ เมืองมา จิราภรณ์ ปุณยวิจน์พรกุล และ ประจักษ์ ปุณยวิจน์พรกุล	51
การศึกษาเชิงตัวเลขของการระบายอากาศแบบธรรมชาติภายในอาคารด้วยระบบ หลังคาแสงอาทิตย์แบบหนึ่งช่องทางไหล ณัฐพงษ์ วงศ์บัพพา ทวีศิลป์ เล็กประดิษฐ์ ศิวกร ศรีธัญญากร และ พรสวรรค์ ทองใบ	64
ผลของน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรดต่อความเหนียว และการขจัดคราบเปื้อนบนสิ่งทอ ศศิประภา รัตนดิลก ณ ภูเก็ต และ กิตติกานต์ ทัพหิกรณ	76

## สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2568 ISSN 3027-8260 (Online)

---

หน้า

### บทความวิจัย:

การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพอัดเม็ดจากการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร วิจิตรา สิงห์ศิริบุญสรณ์ ปณิตทัต ลือโสภา และ วิชชุดา ภาโสสม	87
การใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันชนิด YOLOv8 ร่วมกับหุ่นยนต์ แบบคาร์ทีเซียนสำหรับการตรวจหาโรคและรตน้ำอัตโนมัติ ดำรงศักดิ์ กิจเดช และ วีระพันธ์ ด้วงทองสุข	101
การศึกษาประสิทธิภาพแท่งเชื้อเพลิงจากกระบวนการคาร์บอนเซชัน ยุทธชัย จารุจิตร มงคล คราพันธ์ และ ตั้งเฮง ยนต์สถิตย์กุล	119
การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใช้น้ำแผ่นกรอบ จურიมาศ ดีอำมาตย์	129
ผลของการพรีทรีตเมนต์ด้วยไมโครเวฟและเทคนิคการฟัฟฟิงต่อคุณภาพ ของแคร่รถตอบแห้ง ประยูร จอมหล้าพีรติกุล ภูชิษฐ์ ตันวานิชกุล และ อาภาภรณ์ จอมหล้าพีรติกุล	139
ผลของการทดแทนเนื้อไก่ด้วยผงจิ้งหรีดที่มีต่อคุณภาพทางกายภาพเคมี และประสาทสัมผัสของแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชัน ( <i>Clitoria ternatea</i> L.) วัชร เทพโยธิน อรทัย บุญทะวงศ์ สุรพล ใจวงศ์ษา และ เกรียงศักดิ์ ลือชัย	150
การพัฒนาเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยง กันญา โภสุมภ์ ศิวดล แก้วอาจ สิทธิโชค นวนไชย และ ภูวนัย สุขแก้ว	165

## สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2568 ISSN 3027-8260 (Online)

---

หน้า

### บทความวิจัย:

ผลของระยะเวลาต้ม ความเข้มข้นของสารละลายต่างและสารละลายเอนไซม์ ต่อปริมาณ ความยาว และขนาดเส้นใยเปลือกข้าวโพดหวานพันธุ์อินทรี 2 วัลภา เต็มทอง สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ ธัญชนิต ทับสวัสดิ์ ปวีณา ขำสงค์ และ ศรัณย์พร จุลเจิมศักดิ์	174
การเปรียบเทียบตัวแบบ GM(1,1), DGM(1,1), FGM(1,1) และ FDGM(1,1) สำหรับการทำนายจำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม ศวิตา ทองขุนวงศ์ และ ภัคพล สวัสดิ์สมถ	190

# ผลการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ทาร์ต

จิราภัทร โอทอง<sup>1</sup> และ กฤษณธร साเอี่ยม<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

<sup>2</sup>คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

<sup>1</sup>168 ถนนศรีอยุธยา แขวงวชิรพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

<sup>2</sup>1 ถนนอุทงนอก แขวงดุสิต เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

รับบทความ 7 กรกฎาคม 2567 แก้ไขบทความ 24 มกราคม 2568 ตอรับบทความ 11 มีนาคม 2568

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ทาร์ต โดยสูตรผลิตภัณฑ์ทาร์ตพื้นฐานมีส่วนประกอบดังนี้ แป้งสาลีร้อยละ 49 นมข้นหวานร้อยละ 6 นมข้นจืดร้อยละ 5 เนยเค็มร้อยละ 32 น้ำตาลร้อยละ 7 และเกลือร้อยละ 1 นำผลิตภัณฑ์ทาร์ตสูตรพื้นฐานมาศึกษาการใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีที่ 4 ระดับ คือ ร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 ประเมินคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางประสาทสัมผัสเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (สูตรพื้นฐาน) จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่พัฒนามาศึกษาองค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $L^*$  และค่า  $b^*$  ของผลิตภัณฑ์ทาร์ตลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ( $p \leq 0.05$ ) ส่วนค่า  $a^*$  และค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ( $p \leq 0.05$ ) ผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีร้อยละ 50 มีคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่เหมาะสมที่สุด มีค่า  $L^* = 33.28$ ,  $a^* = 5.62$ ,  $b^* = 8.15$  และค่าความแข็ง  $= 12.68$  N และมีคะแนนเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัสอยู่ที่ 7.55 ซึ่งอยู่ในระดับความชอบปานกลาง และเมื่อนำผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่พัฒนาได้ไปศึกษาองค์ประกอบทางเคมีเพื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม พบว่า ผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่พัฒนาได้มีปริมาณแอมโนไคยานิน ความชื้น ไขมัน และเยื่อใยที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ( $p \leq 0.05$ ) ส่วนคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และเถ้าน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ( $p \leq 0.05$ )

**คำสำคัญ :** แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่; แป้งสาลี; ผลิตภัณฑ์ทาร์ต; ทดแทน

# Effect of Wheat Flour Substitution with Riceberry Flour on Qualities of Tart Product

Jirapat Othong<sup>1</sup> and Kitsanatorn Saeiam<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

<sup>2</sup>Faculty of Science and Technology, Suan Sunandha Rajabhat University

<sup>1</sup>168 Thanon Sri Ayuthaya, Wachira Phayaban, Dusit District, Bangkok, 10300

<sup>2</sup>1 U Thong Nok Road, Dusit, Dusit District, Bangkok, 10300

---

*Received 7 July 2024; Revised 24 January 2025; Accepted 11 March 2025*

## Abstract

This research aims to the study of effect of wheat flour substitution with riceberry flour on qualities of tart product. The basic tart product formula has the following ingredients: wheat flour 49%, sweetened condensed milk 6%, evaporated milk 5%, salted butter 32%, sugar 7%, and salt 1%. The basic tart formula was to study the wheat flour was replaced with riceberry flour in 4 labels 25%, 50%, 75%, and 100%. The physical quality and sensory quality were assessed in comparison with the control sample (Basic formula). Then the developed tart product was studied in chemical composition compared with the control sample. The study found that when the amount of riceberry flour increased, the L\* value and b\* value of the tart product decreased with statistical significance at the ( $p \leq 0.05$ ) level, while a\* value and hardness values increased with statistical significance at the ( $p \leq 0.05$ ) level. Tart products that use 50% riceberry flour instead of wheat flour have the most suitable physical quality and sensory quality. That had L\* = 33.28, a\* = 5.62, b\* = 8.15, and hardness = 12.68 N, and the average sensory quality at 7.55 was moderate liking. The 50% riceberry flour in tart product was studied for chemical composition and compared with the control sample. The developed tart product had the higher anthocyanin, moisture, fat, and fiber ( $p \leq 0.05$ ). Carbohydrates, protein, and ash were lower ( $p \leq 0.05$ ).

**Keywords :** Riceberry flour; Wheat flour; Tart product; Replacement

## 1. บทนำ

ปัจจุบันประชากรส่วนใหญ่ให้ความนิยมในการรับประทานผลิตภัณฑ์ขนมอบหรือเบเกอรี่เป็นทั้งอาหารหลักและอาหารว่างในชีวิตประจำวันซึ่งได้รับความนิยมอย่างมากเพราะมีรูปแบบที่หลากหลายและมีความสะดวกในการบริโภคสามารถรับประทานร่วมกับชาและกาแฟได้ [1] จากการสำรวจพฤติกรรมการบริโภคผลิตภัณฑ์เบเกอรี่พบว่า ในปี 2566 ที่ผ่านมามีประชากรส่วนใหญ่ให้ความสนใจบริโภคเค้ก พาย และทาร์ตอยู่ที่ 8,600 ล้านกิโลกรัมต่อปี โดยซื้อเพื่อบริโภคเองและซื้อเป็นของฝากให้ผู้อื่นด้วย [2]

ทาร์ตเป็นผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่มีลักษณะเป็นแป้งพายกรอบร่วนที่อุ่มไส้ไว้ โดยตัวไส้มีทั้งไส้คาวและไส้หวานและจะต้องไม่มีแป้งปิดด้านบน [3] ส่วนผสมหลักของทาร์ต คือ แป้งสาลี เหนย นมข้นจืด ไข่ไก่ เกลือ และน้ำตาล เนื่องจากทาร์ตเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถใส่ไส้ได้หลากหลายรสชาติ จึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่บริโภคได้ง่ายและสามารถบริโภคได้ทุกเพศทุกวัย แต่ทาร์ตมีแป้งสาลีขัดขาวเป็นส่วนประกอบหลักซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการน้อยหากบริโภคมากเกินไปจะเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดโรคเบาหวานและโรคอ้วนได้

ข้าวไรซ์เบอร์รี่ (Riceberry) ชื่อวิทยาศาสตร์ *Oryza sativa* เป็นข้าวที่พัฒนาจากข้าวเจ้าหอมนิล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พันธุ์พ่อ) กับข้าวขาวดอกมะลิ 105 สถาบันวิจัยข้าว (พันธุ์แม่) ลักษณะประจำพันธุ์คือมีความสูง 106 เซนติเมตร อายุการเก็บเกี่ยว 130 วัน เมล็ดเรียวยาว สีม่วงดำ ข้าวไรซ์เบอร์รี่มีใยอาหารซึ่งอยู่ในรำข้าวช่วยชะลอการดูดซึมน้ำตาลทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดขึ้นช้ากว่าการบริโภคข้าวกล้องและข้าวขัดขาวทั่วไปจึงเหมาะกับผู้ป่วยเบาหวาน มีสรรพคุณช่วยลดระดับไขมันและคอเลสเตอรอล ช่วยทำให้ระบบขับถ่ายทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [4] โดยมีงานวิจัยพบว่า ผู้สูงอายุที่เป็นโรคเบาหวานชนิดที่ 2 ที่ดื่มเครื่องดื่มข้าวไรซ์เบอร์รี่เป็นเวลา 3 เดือน มีค่าระดับน้ำตาลในเลือดสะสมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

[5] ข้าวไรซ์เบอร์รี่มีฤทธิ์ช่วยลดการสะสมของไตรกลีเซอไรด์ในเนื้อเยื่อไขมันและช่วยควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดส่งผลให้ช่วยรักษาโรคอ้วนได้ [6] นอกจากนี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ยังช่วยให้รู้สึกอิ่มนานขึ้นและชะลอการดูดซึมน้ำตาลหลังมื้ออาหารได้อีกด้วย [7] คุณค่าทางโภชนาการของข้าวไรซ์เบอร์รี่มีดังนี้ ธาตุเหล็ก 13-18 mg/kg, ธาตุสังกะสี 31.9 mg/kg, โอมิแก 325.51 mg/100 g, วิตามินอี 678 µg/100 g, โฟเลต 48.1 µg/100 g, เบต้าแคโรทีน 63 µg/100 g, สารประกอบโพลีฟีนอล 113.5 mg/100g, แทนนิน 89.33 mg/100 g และแกรมมาโอโรซานอล 462 µg/g ข้าวไรซ์เบอร์รี่ยังมีสารต้านอนุมูลอิสระชนิดละลายในน้ำ 47.5 mg ascorbic acid equivalent/100 g และสารต้านอนุมูลอิสระชนิดละลายในน้ำมัน 33.4 mg Trolox equivalent/100g [8] รำข้าวไรซ์เบอร์รี่มีแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในระดับความเข้มข้น 15.7 mg./100 g และรำข้าวไรซ์เบอร์รี่มีค่า ORAC ถึง 400 Trolox eq./g ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระเป็นสารที่สามารถป้องกันหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยา oxidation จากอนุมูลอิสระที่เป็นสาเหตุของการเกิดภาวะหลอดเลือดอุดตัน มะเร็ง พาร์กินสัน และอาการอักเสบต่างๆ [9] นอกจากนี้ยังมีการนำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่หลากหลายจากงานวิจัยพบว่า การนำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มาทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์บราวนี่ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์บราวนี่มีลักษณะความแน่นเนื้อของเนื้อสัมผัสที่ลดลง เนื่องจากแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ไม่มีโปรตีนกลูเตนิน (Glutenin) และ โกลอะดิน (Gliadin) ที่มีคุณสมบัติการรวมตัวเป็นร่างแหและเก็บกักก๊าซไว้ได้ซึ่งทำให้ขนมอบมีเนื้อสัมผัสที่นุ่มจึงทำให้ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์บราวนี่ได้ร้อยละ 25 [10] และจากงานวิจัยยังพบว่า การนำรำข้าวไรซ์เบอร์รี่มาทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมปังแซนวิช พบว่า การใช้รำข้าวไรซ์เบอร์รี่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนมปังแซนวิชมีความแข็ง

ของเนื้อสัมผัสที่สูงขึ้นและค่าความยืดหยุ่นของขนมปังลดลง เนื่องจากขนมปังแซนวิชที่มีการใช้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีปริมาณกลูเตนที่เป็นส่วนประกอบลดลง และข้าวไรซ์เบอร์รี่มีปริมาณใยอาหารที่สูงส่งผลให้ขนมปังแซนวิชมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นทำทดแทนแป้งสาลีได้ร้อยละ 20 ซึ่งทำให้มีความแข็งแรงไม่แตกต่างจากขนมปังแซนวิชสูตรควบคุม [11] เนื่องจากข้าวไรซ์เบอร์รี่เป็นข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงมีใยอาหารและสารต้านอนุมูลอิสระที่ส่งผลดีต่อสุขภาพ ทางผู้วิจัยจึงนำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ทาร์ตเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ทาร์ตให้มีคุณค่าทางโภชนาการที่สูงขึ้น มีปริมาณใยอาหารและสารต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นและเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพที่เหมาะสมกับผู้บริโภคในยุคปัจจุบัน

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 การเตรียมแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่

แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ทาร์ตนี้ทำด้วยวิธีการไม่แห้ง โดยนำข้าวไรซ์เบอร์รี่จากกลุ่มเกษตรกรโรงสีทิวรวมมิตร จังหวัดเพชรบุรี ใส่ลงในเครื่องบดแห้ง (Jiangxi, China) กดเปิดเครื่องเพื่ออบเป็นระยะเวลา 5 นาที กดปิดเพื่อพักเครื่อง 1 นาที และปั่นต่อเป็นระยะเวลาอีก 5 นาที จากนั้นนำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช นำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มาศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ พลังงาน ความชื้น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เยื่อใย และเถ้า และศึกษาปริมาณแอนโทไซยานิน

### 2.2 การศึกษาปริมาณแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่

#### ทดแทนแป้งสาลี

สูตรพื้นฐานผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่ใช้เป็นปัจจัยควบคุมเป็นของ [12] ซึ่งมีส่วนผสมที่ดังนี้ แป้งสาลีอเนกประสงค์ร้อยละ 49 นมข้นหวานร้อยละ 6 นมข้นจืดร้อยละ 5 เนยเค็มร้อยละ 32 น้ำตาลร้อยละ

7 และเกลือร้อยละ 1 และมีการใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีที่ 4 ระดับ คือร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 ของส่วนผสมทั้งหมด วิธีการทำผลิตภัณฑ์ทาร์ต คือ ใส่ส่วนผสมลงในเครื่องผสมอาหาร (KitchenAid Artisan Series Tilt-Head Stand Mixer, KitchenAid, USA) ตีส่วนผสมต่างๆให้เข้ากันด้วยหัวตีตะกร้อ ความแรงระดับ 10 นาน 3 นาที จากนั้นใส่แป้ง เกลือ และเนยแช่แข็งสับละเอียดลงไปผสมนาน 5 นาที ใส่ไข่ลงไปลดความแรงลงเหลือระดับ 7 จนแป้งเริ่มเกาะตัวเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นปิดเครื่อง นำแป้งที่ได้ใส่ลงในอ่างผสมขนาดแป้งจนเป็นเนื้อเดียวกันนาน 3 นาที จากนั้นพักแป้งไว้ในตู้เย็น 30 นาที นำแป้งที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นให้มีความหนา 2 มิลลิเมตร ทดตามรูปพิมพ์ ใช้ส้อมจิ้มให้เกิดรูบนตัวแป้งนำเข้าอบอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

ตารางที่ 1 ส่วนผสมที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่มีการใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลี 4 ระดับ

วัตถุดิบ	ปริมาณ (%)			
	0%	25%	50%	100%
แป้งสาลี	49	36.75	24.5	0
นมข้นหวาน	6	6	6	6
นมข้นจืด	5	5	5	5
เนยเค็ม	32	32	32	32
น้ำตาล	7	7	7	7
เกลือ	1	1	1	1
แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่	0	12.25	24.5	49

นำผลิตภัณฑ์ทาร์ตมาศึกษาคุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) และค่าเนื้อสัมผัส และคุณภาพทางประสาทสัมผัส เพื่อคัดเลือกผลิตภัณฑ์ทาร์ตจากแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่เหมาะสมที่สุด

## 2.3 การศึกษาคุณภาพทางกายภาพ

### 2.3.1 การวัดค่าสี

นำผลิตภัณฑ์ทาร์ตมาบดให้ละเอียดวัดค่าสีด้วยเครื่อง Hunter Lab (Hunter Lab Digital Colorimeter Color Global, Colourflex EZ, USA) และแสดงออกมาในค่า  $L^*$ ,  $a^*$ , และ  $b^*$  วัดทั้งหมด 10 ซ้ำ

### 2.3.2 การวัดค่าเนื้อสัมผัส

นำผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. และสูง 2 ซม. มาวัดเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture Analyzer (LLOYD, TA. Plus, USA) วัดค่าความแข็ง (Hardness) ใช้หัววัดแบบ Knife Edge with Slotted Insert (HDP/BS) โดยกำหนดความเร็วของหัววัดเนื้อสัมผัสเป็น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วขณะทดสอบ (Test speed) 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีและความเร็วหลังทดสอบ (Post-test speed) 1 มิลลิเมตรต่อวินาที กำหนดเป็น distance โดยกำหนดระยะการกดหัววัดเนื้อสัมผัสเป็น 20 มิลลิเมตร และกดลงบนตัวอย่างทาร์ตเพื่อวัดค่าความแข็งจำนวน 10 ซ้ำ

## 2.4 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี

นำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ และผลิตภัณฑ์ทาร์ตมาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ได้แก่ การวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน ไขมัน เกล็ด และเยื่อใย [9] สำหรับคาร์โบไฮเดรตใช้การคำนวณ คาร์โบไฮเดรต (%) =  $100 - (\text{ความชื้น} (\%) + \text{โปรตีน} (\%) + \text{ไขมัน} (\%) + \text{เยื่อใย} (\%) + \text{เถ้า} (\%))$

## 2.5 การศึกษาปริมาณแอนโทไซยานิน

นำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ และผลิตภัณฑ์ทาร์ตมาวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธีการของฟิเอซ-ดิฟเฟอเรนเชียล (pH-differential) ตามวิธีการ [13]

## 2.6 การศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัส

นำผลิตภัณฑ์ทาร์ตมาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ

เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีการชิมแบบให้คะแนนความชอบที่ 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) (โดย คะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และคะแนน 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด) ใช้ผู้ประเมินจำนวน 80 คน นำตัวอย่างบรรจุตัวอย่างลงในถุงพลาสติก มีการใช้รหัสเลข 3 ตัวแทนชื่อตัวอย่าง โดยเลขที่ใช้ได้จากตารางเลขสุ่ม และมีการล้างปากด้วยดื่มน้ำในระหว่างการเปลี่ยนตัวอย่าง

## 2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ นำมาวางแผนการทดลองแบบ CRD (Completely Randomized Design) ในการประเมินคุณภาพทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี และ RCBD (Randomized Complete Block Design) โดยกำหนดให้ผู้ทดสอบชิมเป็นแหล่งความแปรปรวนระหว่างบล็อก ในการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างตัวอย่าง โดยวิธี Duncan's Multiple Range Test และ วิธี t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

## 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

### 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่

เมื่อนำข้าวไรซ์เบอร์รี่มาไม่แห้งจนเป็นแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ จากนั้นนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณแอนโทไซยานิน ความชื้น โปรตีน ไขมัน เยื่อใย เกล็ด คาร์โบไฮเดรต และพลังงาน ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ 100 g มีแอนโทไซยานินร้อยละ 10.56 ซึ่ง [14] ได้ศึกษาปริมาณสารแอนโทไซยานินในข้าว 6 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์โสมมาลี หอมพิมาย หอมใบเตย ไรซ์เบอร์รี่ นิลสุรินทร์ และทับทิมชุมแพ พบว่า ข้าวพันธุ์นิลสุรินทร์ ปริมาณสารแอนโทไซยานินสูงที่สุดรองลงมา คือ ไรซ์เบอร์รี่ และทับทิมชุมแพ ตามลำดับ (27.58 27.58 และ 21.71 mg

/ 100 g ตามลำดับ) นอกจากนี้ [15] ได้ศึกษาปริมาณสารแอนโทไซยานินในข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ปลูกใน 5 จังหวัดของประเทศไทย คือ เชียงใหม่ ลำปาง เพชรบูรณ์ สิงห์บุรี และสุรินทร์ พบว่า ข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ปลูกในจังหวัดลำปางมีปริมาณแอนโทไซยานินสูงที่สุดคือ 300 mg / 100 g รองลงมาคือจังหวัดเพชรบูรณ์มีปริมาณ 100 mg / 100 g ซึ่งเห็นได้ว่าปริมาณของแอนโทไซยานินในข้าวนั้นแตกต่างกันขึ้นกับสายพันธุ์ของข้าว สถานที่ปลูกและสภาพอากาศของพื้นที่ปลูกซึ่งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ใช้ในงานวิจัยปลูกที่จังหวัดเพชรบุรี

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ จากตัวอย่าง 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณในหน่วย บริโภค 100 กรัม
สารแอนโทไซยานิน (%)	10.56
ความชื้น (%)	4.70
โปรตีน (%)	10.63
ไขมัน (%)	3.26
เยื่อใย (%)	0.95
เถ้า (%)	1.18
คาร์โบไฮเดรต (%)	79.28

ตารางที่ 2 แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มีโปรตีนร้อยละ 10.63 และเยื่อใยร้อยละ 0.95 ซึ่งใกล้เคียงกับ [16] ข้าวไรซ์เบอร์รี่มี โปรตีนร้อยละ 7.84-9.25 และเยื่อใยร้อยละ 1.82-2.40 และใกล้เคียงกับ [15] พบว่าแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มีโปรตีนร้อยละ 8.34 และเยื่อใยร้อยละ 2.73 ด้วยเหตุนี้การใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ในผลิตภัณฑ์อาหารจึงเป็นการเพิ่มปริมาณโปรตีนและเยื่อใยจึงเป็นการทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากแอนโทไซยานินอีกด้วย

### 3.2 การศึกษาปริมาณแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลี

เมื่อนำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มาทดแทนแป้งสาลีที่เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ทาร์ตทั้ง 4 ระดับ คือ ร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 จากนั้นนำมาศึกษาคุณภาพทางกายภาพได้แก่ ค่าสี (L\*, a\*, b\*) และค่าความแข็งเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 3 เมื่อปริมาณแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทาร์ตมีค่า L\* และค่า b\* ลดลง ส่วนค่า a\* และค่าความแข็งเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างควบคุมมีค่า L\* และค่า b\* สูงที่สุด คือ 55.29 และ 29.97 และมีค่า a\* และค่าความแข็งน้อยที่สุด คือ 4.46 และ 3.42 N และผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ ร้อยละ 100 มีค่า L\* และค่า b\* น้อยที่สุด คือ 29.93 และ 6.82 ตามลำดับ ส่วนค่า a\* และค่าความแข็งมากที่สุด คือ 6.07 และ 18.98 N ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณของแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ส่งผลคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ทาร์ตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ (p< 0.05) เนื่องจากแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มีสารแอนโทไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุที่ให้น้ำเงินม่วงแก่พืช ซึ่งมีคุณสมบัติในการละลายน้ำด้วยเหตุนี้เมื่อใส่แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ลงในผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่มีนมข้นจืดซึ่งมีน้ำเป็นส่วนประกอบแอนโทไซยานินจากแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่จึงละลายออกมาผสมกับส่วนผสมอื่นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มีสีน้ำเงินม่วงซึ่งต่างจากผลิตภัณฑ์ทาร์ตสูตรควบคุมที่ไม่ใส่แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่จะมีสีน้ำตาลและสีของผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่มีลักษณะเป็นสีน้ำเงินม่วงที่เข้มข้น เกิดจากการใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีเพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทาร์ตมีปริมาณของสารแอนโทไซยานินที่ละลายออกมาเพิ่มขึ้น เนื่องจากแอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่ละลายน้ำได้จัดอยู่ในกลุ่มฟลาโวนอยด์เป็นสารให้สีตามธรรมชาติ โดยสีของแอนโทไซยานินจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะความเป็นกรด-ด่างซึ่งจะมีสีน้ำเงินเข้มในสภาวะที่เป็นด่าง (pH มากกว่า 7) มีสีม่วงเมื่อเป็นกลาง (pH 7) และจะเปลี่ยนเป็นสีแดงส้มในสภาวะที่เป็นกรด (pH น้อยกว่า 7) [16]

ปริมาณแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ทาร์ตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ( $p \leq 0.05$ ) โดยผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 100 มีค่าความแข็งสูงสุด และผลิตภัณฑ์ทาร์ตตัวอย่างควบคุมมีค่าความแข็งน้อยที่สุด เนื่องจากแป้งสาลีมีโปรตีนกลูเตนินและโปรตีนไกลอะดิน เมื่อมีการใส่ของเหลวและนวดผสมแป้งสาลี โปรตีนกลูเตนินและโปรตีนไกลอะดินจะเกิดการรวมตัวกันและสร้างพันธะไดซัลไฟด์จึงเกิดเป็นโปรตีนกลูเตนที่มีลักษณะเหนียวและยืดหยุ่นขึ้น [17] ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ใช้แป้งสาลีมีความนุ่มและยืดหยุ่น ด้วยเหตุนี้ผลิตภัณฑ์ทาร์ตตัวอย่างควบคุมที่ใช้แป้งสาลีเพียงอย่างเดียวจึงมีค่าความแข็งน้อยที่สุด ส่วนผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีทั้ง 4 ระดับจะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ในแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ยังมีใยอาหารเป็นส่วนประกอบ โดยแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ 100 กรัม มีใยอาหารร้อยละ 0.95 (ตารางที่ 2) จากคุณสมบัติในการอุ้มน้ำของใยอาหาร เพราะเส้นใยอาหารมีองค์ประกอบเป็นโพลีแซคคาไรด์ ซึ่งเป็นโมเลกุลที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เพราะมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเป็นจำนวนมากจึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ ด้วยเหตุนี้เส้นใยอาหารทั้งชนิดที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำจึงมีความสามารถในการอุ้มน้ำ [18] และมีความสามารถในการกักเก็บน้ำและความสามารถในการพองตัวส่งผลให้เมื่อผสมแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ลงในผลิตภัณฑ์ทาร์ต ใยอาหารในข้าวไรซ์เบอร์รี่จะดูดซับน้ำจากส่วนผสมอื่นเอาไว้ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อใยอาหารเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ [19] พบว่า เมื่อปริมาณแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่เพิ่มขึ้นส่งผลให้บราวนี่มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น โดยบราวนี่ที่ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 0 มีค่าน้อยที่สุดคือ 1.31 Kg และบราวนี่ที่ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 100 มีค่าความแข็งสูงสุด คือ 3.32 Kg

### 3.3 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลี

เมื่อนำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มาทดแทนแป้งสาลีที่ 4 ระดับ คือ ร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 จากนั้นนำมาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีการชิมแบบให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) โดยให้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 80 คน ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า คะแนนเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านกลิ่น รสชาติ ความกรอบร่วน และความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์ทาร์ตมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ( $p < 0.05$ ) ส่วนค่าเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ และสี ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ( $p > 0.05$ ) ซึ่งตัวอย่างควบคุมมีคะแนนเฉลี่ยของคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความกรอบร่วน และความชอบโดยรวมสูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.60, 7.60, 8.13, 7.90, 7.93 และ 8.20 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก ส่วนผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 100 ได้รับคะแนนเฉลี่ยของคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความกรอบร่วน และความชอบโดยรวมน้อยที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.30, 7.03, 7.18, 6.88, 6.70 และ 6.91 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับความชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง เนื่องจากการเติมแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะกลิ่นของข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่มากเกินไปและมีรสชาติที่ขมมากขึ้นทำให้ผู้ทดสอบให้การยอมรับน้อยที่สุด ด้านความกรอบร่วนพบว่า การเติมแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้ความกรอบร่วนของผลิตภัณฑ์ทาร์ตมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มีปริมาณเส้นใยหยาบที่สูงซึ่งไปขัดขวางการเกิดโครงสร้างกลูเตนในผลิตภัณฑ์ และทำให้ปริมาณของกลูเตนินและไกลอะดินลดลงส่งผลผลิตภัณฑ์ไม่สามารถขึ้นฟูและกัก

เก็บน้ำและอากาศไว้ได้ทำให้เนื้อสัมผัสมีลักษณะที่แห้งและร่วน [10], [11] ดังนั้นปริมาณของแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่เหมาะสมในการทดแทนแป้งสาลีคือร้อยละ 50 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทาร์ตมีคะแนนเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่ดีในด้านรสชาติและความกรอบร่วนที่ยังเป็นลักษณะที่ของผลิตภัณฑ์ทาร์ตส่วนในด้าน

ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น และความชอบโดยรวมอยู่ในระดับความชอบปานกลางที่ 7.58, 7.36, 7.58 และ 7.55 ตามลำดับ ซึ่งผู้ทดสอบให้ยอมรับลักษณะของผลิตภัณฑ์ทาร์ตมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีที่ระดับร้อยละ 25, 75 และ 100

ตารางที่ 3 คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีทั้ง 4 ระดับ

คุณภาพทางกายภาพ	ลักษณะปรากฏ	ค่าสี			ค่าความแข็ง (N)
		L*	a*	b*	
ตัวอย่างควบคุม		55.29±0.59 <sup>a</sup>	4.46±0.06 <sup>c</sup>	29.97±0.11 <sup>a</sup>	3.42±0.39 <sup>d</sup>
ร้อยละ 25		48.05±0.10 <sup>b</sup>	5.35±0.01 <sup>b</sup>	9.50±0.24 <sup>b</sup>	9.67±0.47 <sup>c</sup>
ร้อยละ 50		37.94±0.50 <sup>c</sup>	5.62±0.05 <sup>b</sup>	8.15±0.09 <sup>c</sup>	12.68±0.44 <sup>b</sup>
ร้อยละ 75		33.28±1.38 <sup>c</sup>	5.90±0.02 <sup>b</sup>	6.44±0.02 <sup>d</sup>	16.85±0.73 <sup>b</sup>
ร้อยละ 100		29.93±0.58 <sup>d</sup>	6.07±0.01 <sup>a</sup>	6.82±0.03 <sup>d</sup>	18.98±0.58 <sup>a</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรในแนวตั้งที่ต่างกัน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ (p≤0.05)

ค่า L\* คือ ความสว่าง มีค่า 0 - 100, ค่า a\* คือ ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a\* เป็น + คือ ออกสีแดง และ a\* เป็น - คือ ออกสีเขียว) และค่า b\* คือ ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b\* เป็น + คือ ออกสีเหลือง และ b\* เป็น - คือ ออกสีน้ำเงิน)

ตารางที่ 4 คะแนนเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีทั้ง 4 ระดับ

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	คะแนนเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัส				
	ตัวอย่างควบคุม	ร้อยละ 25	ร้อยละ 50	ร้อยละ 75	ร้อยละ 100
ลักษณะปรากฏ <sup>ns</sup>	7.60±1.13	7.21±0.96	7.58±0.83	7.52±1.18	7.30±1.03
สี <sup>ns</sup>	7.60±1.10	6.85±1.15	7.36±1.14	7.21±1.19	7.03±1.14
กลิ่นแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่	8.13±1.01 <sup>a</sup>	7.36±1.06 <sup>bc</sup>	7.58±1.17 <sup>b</sup>	7.39±1.27 <sup>bc</sup>	7.18±1.21 <sup>c</sup>
รสชาติแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่	7.90±1.13 <sup>a</sup>	7.42±1.15 <sup>ab</sup>	7.42±1.20 <sup>ab</sup>	6.97±1.10 <sup>b</sup>	6.88±1.27 <sup>b</sup>
ความกรอบร่วน	7.93±0.94 <sup>a</sup>	7.55±0.83 <sup>b</sup>	7.45±1.09 <sup>b</sup>	6.88±1.19 <sup>bc</sup>	6.70±0.97 <sup>c</sup>
ความชอบโดยรวม	8.20±1.16 <sup>a</sup>	7.52±0.94 <sup>b</sup>	7.55±0.97 <sup>b</sup>	7.00±1.03 <sup>bc</sup>	6.91±0.79 <sup>bc</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรในแนวนอนที่ต่างกัน หมายถึง มีค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ (p<0.05)

<sup>ns</sup> หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ (p>0.05)

### 3.4 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่พัฒนา

นำผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีที่ระดับร้อยละ 50 มาศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณแอนโทไซยานิน ความชื้น โปรตีน ไขมัน เยื่อใย เถ้า คาร์โบไฮเดรต และพลังงาน เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า เมื่อใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีที่ระดับร้อยละ 50 ผลิตภัณฑ์ทาร์ตมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ (p<0.05) โดยแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทาร์ตมีปริมาณความชื้น ไขมัน และเยื่อใยเพิ่มขึ้นมีค่าร้อยละ 3.59, 31.38 และ 0.56 ตามลำดับ ส่วนโปรตีน เถ้า และคาร์โบไฮเดรตลดลง มีค่าร้อยละ 7.54, 0.91 และ 43.07 ตามลำดับ นอกจากนี้การใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลียังส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณแอนโทไซยานินเพิ่มอีกด้วย คือ ร้อยละ 3.44 เนื่องจากแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ 100 กรัม มีแอนโทไซยานิน ร้อยละ 10.56 ไขมัน ร้อยละ 3.26 และเยื่อใย ร้อยละ

0.95 (ตารางที่ 2) ส่งผลให้ปริมาณแอนโทไซยานิน ความชื้น ไขมัน และเยื่อใยเพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์ทาร์ตซึ่งปริมาณของใยอาหารและแอนโทไซยานินส่งผลให้ร่างกายมีสุขภาพดี โดยแอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ไม่สามารถย่อยใยอาหารได้จึงไม่ให้พลังงานและเส้นใยอาหารสามารถจับกับคอเลสเตอรอลและไขมันช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือดป้องกันโรคท้องผูกและเป็นอาหารของแบคทีเรียในลำไส้ ทำให้ระบบการขับถ่ายดีขึ้น [17] นอกจากนี้แอนโทไซยานินเป็นสารที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพช่วยต้านอนุมูลอิสระ ลดอาการอักเสบโดยเพิ่มความแข็งแรงของเส้นใยโปรตีนในเนื้อเยื่อเกี่ยวพันและกระดูกอ่อนจึงลดการทำลายจากอนุมูลอิสระ นอกจากนี้ยังช่วยปกป้องหลอดเลือดโดยการขยายหลอดเลือดและกระตุ้นการไหลเวียนของเลือด ลดคอเลสเตอรอลในเลือดโดยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว [16] ด้วยเหตุนี้การใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีจึงเป็นการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้แก่ผลิตภัณฑ์ทาร์ต

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ทาร์ตสูตรควบคุมและผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ระดับร้อยละ 50 จากตัวอย่าง 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณในหน่วยบริโภค 100 กรัม	
	ตัวอย่างควบคุม	ร้อยละ 50
แวนโทไซยานิน	-	3.44±0.001
ความชื้น*	1.47±0.007	3.59±0.12
โปรตีน*	8.31±0.02	7.54±0.13
ไขมัน*	28.57±0.02	31.38±0.13
เยื่อใย*	0.41±0.02	0.56±0.05
เถ้า*	1.15±0.007	0.91±0.02
คาร์โบไฮเดรต*	60.5±0.02	43.07±0.01

หมายเหตุ : ตัวอักษรในแนวนอนที่ต่างกัน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ (p<0.05)

#### 4. สรุป

ระดับการใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ทาร์ตที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 50 เพราะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทาร์ตมีสี กลิ่น และรสชาติที่ผู้ชิมให้คะแนนเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัสในระดับชอบปานกลางอยู่ที่ 7.55 และมีความแข็งที่ตรงตามลักษณะที่ดีของผลิตภัณฑ์ทาร์ต นอกจากนี้ยังส่งผลให้มีปริมาณแวนโทไซยานินและเส้นใยที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการผลิตภัณฑ์ทาร์ตอีกด้วย เนื่องจากแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่อุดมไปด้วยแวนโทไซยานินและใยอาหารซึ่งมีร้อยละ 10.96 และ 0.95 ตามลำดับ

#### 5. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Nutasuton1, A. Noysumran, N. Homhual and N. Satsue, “Development of Riceberry Rice Flour Sweet Bread Product,” *Rajabhat*

*Maha Sarakham University Journal*, vol. 17, no. 3, pp. 159-165, 2023.

[2] Department of International Trade Promotion (DITP), “Bakery Industry Trends in the United States,” [Online]. Available: <https://www.ditp.go.th/post/et6qzhjykv2924ojbj7bvk93>. [Accessed: Feb. 12, 2024].

[3] My cooking School 101, “Sweet Tart,” [Online]. Available: <https://www.pholfoodmafia.com/wp-content/uploads/2017/08/23SweetTart.pdf>. [Accessed: Jan. 19, 2024].

[4] Rice Science Center, Kasetsart University, “Riceberry rice Thailand’s antioxidant-packed nutraceutical and super food!,” [Online]. Available: <https://dna.kps.ku.ac.th/index.php/research-develop/rice-research-and%20knowledge/272-riceberry-rice-thailand-s-antioxidant-packed-nutraceutical-and-super-food>. [Accessed: Feb. 14, 2024].

[5] S. Arunrungsawat, N. Chomsri and L. Inklap, “The Effect of Riceberry Rice Drink Consumption on Glycated Hemoglobin (HbA1c) in Elderly with Type 2 Diabetes.” *Christian University of Thailand journal*, Vol. 43, no. 3, pp. 355–364, 2018.

[6] P. Kongthitlerd, T. Suantawee, H. Cheng, T. Thilavech, M. Mampae, and S. Adisakwattana. “Anthocyanin-Enriched Riceberry Rice Extract Inhibits Cell Proliferation and Adipogenesis in 3T3-L1 Preadipocytes by Downregulating Adipogenic Transcription Factors and Their Targeting Genes.” *Nutrients*, vol. 12, no. 8, pp. 1-18, 2020.

- [7] N. Muangchan, B. Khiewwan, S. Chatree, K. Pongwattanapakin, N. Kunlaket, T. Dokmai, and R. Chaikomin. "Riceberry rice (*Oryza sativa* L.) slows gastric emptying and improves the postprandial glycaemic response." *British Journal of Nutrition*, vol. 128, no. 3, pp. 424-432, 2022.
- [8] Rice Science Center, Kasetsart University, "Riceberry rice," [Online]. Available: <https://dna.kps.ku.ac.th/index.php/articles-ricersc-rgdu-knowledge/29-2015-03-27-02-0415/53-Riceberry>. [Accessed: Feb. 5, 2024].
- [9] Center for Continuing Pharmacy Education, "Free Radicals and Antioxidants," [Online]. Available: [https://ccpe.pharmacycouncil.org/index.php?option=article\\_detail&subpage=article\\_detail&id=204](https://ccpe.pharmacycouncil.org/index.php?option=article_detail&subpage=article_detail&id=204). [Accessed: Jan. 24, 2024].
- [10] P. Sinchaipanit, K. Budpong, S. Disnil and R. Twichatwitayakul, "Influences of Rice Berry Flour as a Wheat Flour Substitute in Brownie: Textural and Quality Attributes," *SDU Research Journal Sciences and Technology*, vol. 10, No. 2, pp. 69-80, 2017.
- [11] S. Raungrusmee<sup>1</sup>, K. Jadwong<sup>1</sup> and O. Wongtong, "Development of Sandwich Bread Formulation Substituted Wheat Flour with Riceberry Bran," *Phranakhon Rajabhat Research Journal (Science and Technology)*, vol. 13, no. 1, pp. 123-138, 2018.
- [12] N. Paesure, *Bakey recipe in Teaching Publications Bakery*, 1st ed. Bangkok: Suan Sunandha Rajabhat University Press, 2022.
- [13] S. Rittem and S. Meerod. "Determination of Anthocyanin and Study the pH on Stability of Riceberry" in *Proceedings of the 5th National Academic Conference*, 2018, pp. 518-525.
- [14] V. Raksaphon, P. Thammapat, and S. Phimrat. "Phytosterols and bio-active compounds in some rice varieties." *PRAWARUN AGRICULTURAL JOURNAL*, vol. 20, no. 1, pp. 106-112, 2023.
- [15] N. Settapramote, T. Laokuldilok, D. Boonyawan, and N. Utama-ang "Physiochemical, Antioxidant Activities and Anthocyanin of Riceberry Rice from Different Locations in Thailand". *Food and Applied Bioscience Journal*, vol. 6 no. (Special Issue on International Conference on Food and Applied Bioscience), pp. 84-94, 2018.
- [16] S. Sapantupong, "Development of Bread with Riceberry Rice Bran," *RMUTP Research Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 186-195, Dec. 2019.
- [17] S. Khumkhom, "Effect of Riceberry Flour on Physicochemical Properties and Antioxidant Activities of Steamed Bun" *Thai Science and Technology Journal*, vol. 28, no. 11, pp. 2025 – 2038, Nov. 2020
- [18] J. Tonabut. "Development OF Khanom SOMMANAT SUPPLEMENTED WITH POMELO ALBEDO FIBERS." *Research and Development Journal Science and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 1-15, 2021.
- [19] N. Khamklin, N. Yossombat, S. Phumchuen, S. Sungsub, and U. Chattong "Effect of Riceberry flour on physico-chemical and

sensory properties of brownie”. in  
*Proceedings of the National Academic  
Conference “Innovation and Technology:*

Research from Knowledge towards  
Sustainable Development” 2017, pp. 758 –  
764.

# โปรแกรมสำหรับจำลองฟีกโปรไฟล์ในเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

พลาธิป คัคโนภาส\* และ สมเกียรติ์ สุกางโฮง

ภาควิชาเคมี-ฟิสิกส์ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

999 หมู่ 5 ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 2224 ตำบลมิตรภาพ อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี 18180

รับบทความ 11 มิถุนายน 2567 แก้ไขบทความ 3 กุมภาพันธ์ 2568 ตอรับบทความ 11 มีนาคม 2568

## บทคัดย่อ

แก๊สโครมาโทกราฟี (GC) เป็นเทคนิคที่มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพ ใช้เพื่อระบุองค์ประกอบและวิเคราะห์เชิงปริมาณสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยง่ายหรือกึ่งระเหย เช่น น้ำหอม เครื่องเทศ น้ำมันเชื้อเพลิง และสารที่ปะปนอยู่ในอากาศ เพื่อให้การวิเคราะห์ตัวอย่างมีประสิทธิภาพและลดสัญญาณรบกวน ตัวแปรใน GC เช่น ชนิดคอลัมน์ ความยาวคอลัมน์ รัศมีคอลัมน์ อัตราการไหลของแก๊สพา และอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต้องเป็นค่าที่เหมาะสมกับตัวอย่างนั้นๆ จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อพัฒนาโปรแกรมสำหรับจำลองผลการวิเคราะห์ของสารประกอบด้วยเทคนิค GC โดยอาศัยทฤษฎี linear solvation energy relation (LSER) และ time summation model เพื่อจำลองรีเทนชันไทม์ (retention time,  $t_R$ ) และใช้ทฤษฎีความสูงเพลตเพื่อจำลองความกว้างของฐานฟีก ( $\sigma$ ) ใช้สมการเกาส์เซียนเพื่อจำลองความเข้มของแต่ละฟีกในโครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระบบอุณหภูมิคงที่ (isothermal) และระบบเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างการวิเคราะห์ (temperature program) โดยใช้ Microsoft Excel และแสดงผลในรูปของโครมาโทแกรมสองมิติ จากนั้นนำโครมาโทแกรมของสารประกอบที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับ 2 ผลงานวิจัยที่ศึกษาการแยกสาร *n*-alkane ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี โดยใช้ระบบ temperature program ที่ได้รับการตีพิมพ์ ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบนี้ถูกแสดงด้วยพลอตสหสัมพันธ์ (Correlation plot) ระหว่างค่ารีเทนชันไทม์ที่ได้จากแบบจำลองและจากการทดลองเป็นเส้นตรงด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เป็น 0.9532 และ 0.9896

**คำสำคัญ :** แก๊สโครมาโทกราฟี; การจำลอง; แก๊สโครมาโทแกรม

## A Program for Simulation of Peak Profile in Gas Chromatography

Palathip Kakanopas\* and Somkiat Sukanghong

Department of Chemistry-Physics, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy  
999 Moo 5, National Highway 2224, Mittraphap, Muak Lek District, Saraburi 18180

---

*Received 11 June 2024; Revised 3 February 2025; Accepted 11 March 2025*

### Abstract

Gas chromatography (GC) is a precise and effective technique that is used to identify chemical compositions of samples of compounds and quantitatively analyze volatile organic compounds or semi-volatile organic ones, such as fragrances, spices, fuel, and substances in the air. To effectively analyze samples of compounds and reduce interference, the parameters in GC (e.g., a column type, a column length, a column radius, a gas flow rate, and a rate of temperature increase) must be optimized to fit such compounds. This research aims to develop the program for simulating the analysis results of the compounds by using linear solvation energy relationship (LSER) and time summation model to simulate retention time ( $t_R$ ). Plate Height Theory was used to simulate a peak width ( $\sigma$ ). Gaussian equation was used to simulate peak intensity for each chromatogram peak in both isothermal process and temperature program. The analysis was conducted through Microsoft Excel and the results were shown in the form of a two-dimensional chromatogram. Theoretical findings from the chromatogram simulation of the compounds were compared with 2 published research, that study about the separation of *n*-alkane through the temperature-programmed GC. Results of the present study show that good linearity with correlation coefficient ( $R^2 = 0.9532$  and  $0.9896$ ) from the correlation plot between simulated  $t_R$  and experimental  $t_R$  were achieved.

**Keywords :** Gas chromatography; Simulation; Gas chromatogram

---

\* Corresponding Author. Tel.: +668 7038 0531, E-mail Address: palathip\_ka@rtaf.mi.th

## 1. บทนำ

เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างสูงสำหรับวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณสำหรับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compound) และสารประกอบอินทรีย์กึ่งระเหย (Semi volatile organic compound) เช่น วิเคราะห์แก๊สธรรมชาติ สารเจือปนในแก๊สต่างๆ (Impurity gases) วิเคราะห์สารประกอบต่างๆ เช่น สารประกอบไนโตรเจน สารประกอบซัลเฟอร์ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ยาฆ่าแมลง ยาปราบศัตรูพืช วิเคราะห์สารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เช่น มลพิษในอากาศ (CO NO<sub>2</sub> และ SO<sub>2</sub>) มลพิษในน้ำ (Aldrin Heptachlor DDT และ BHC) มลพิษทางดิน (PAHs) เป็นต้น [1]-[3] โดยหลักการแยกของเทคนิคดังกล่าวจะอาศัยอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างเฟสนิ่ง (Stationary phase) คือ สารที่เคลือบหรือบรรจุอยู่ในคอลัมน์ (Column) และเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) หรือแก๊สพา (carrier gas) คือแก๊สที่พาไอระเหยของสารตัวอย่างเข้าสู่คอลัมน์เพื่อเกิดการแยกและไปยังตัวตรวจวัด แก๊สพาที่นิยมใช้กันทั่วไปคือแก๊สฮีเลียม มีการให้ความร้อนแก่คอลัมน์ด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิทำให้เกิดกระบวนการแยกในคอลัมน์ จากนั้นจึงเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวตรวจวัด (Detector) และแสดงผลออกมาในรูปโครมาโทแกรม (Chromatogram) แต่การได้มาของโครมาโทแกรมที่สามารถอ่านผลได้อย่างชัดเจนจะต้องมีการเตรียมตัวอย่างก่อนฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี และต้องปรับพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ในแต่ละครั้ง (Optimization) เช่น ชนิดของคอลัมน์ ความยาวคอลัมน์ (Column length) อัตราการไหลของแก๊สพา (Flow rate) อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heat rate) และชนิดของตัวตรวจวัด (Detector) เป็นต้น จะเห็นว่ามีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ ดังนั้นหากต้องปรับที่ละพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด จะส่งผลให้แต่ละการทดลองใช้เวลานาน สิ้นเปลืองสารเคมีและต้นทุนในการวิเคราะห์จะสูงขึ้นอย่างมาก

Y. Polyakova et al. (2008) [4] ได้นำเสนอ Quantitative structure retention relationship (QSRR) เป็นทฤษฎีในการอธิบายโครงสร้างและคุณสมบัติต่างๆทางเคมีโดยใช้ค่าคงที่ ซึ่งได้มาจากกระบวนการทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณลักษณะโมเลกุล (Molecular descriptors) ทฤษฎีนี้จะกำหนดลักษณะโมเลกุลโดยการแปลงคุณสมบัติทางเคมีที่หลากหลาย (ได้แก่ รูปร่าง ฟังก์ชันคลื่น พลังงานศักย์ และ คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์) ให้เป็นค่าเฉพาะของโมเลกุลนั้นๆ กล่าวคือ ความแตกต่างของพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G$ ) ของสารแต่ละชนิดที่กระจายตัวอยู่ระหว่างสารละลายบนเฟสคงที่ และเฟสเคลื่อนที่ จะมีคุณสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัว แตกต่างกันไปตามโครงสร้าง ดังนั้นวิธี QSRR ที่ศึกษาเกี่ยวกับ  $\Delta G$  จึงสามารถนำมาใช้ในการประมาณค่า  $t_R$

S. Pojjanapompun et al. (2008) [5] ได้เสนอแนวทางการจำลองฟังก์ชันโพลีในเทคนิค GC ด้วยหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Gibbs energy additivity method) ซึ่งสามารถใช้หาความสัมพันธ์ระหว่าง  $t_R$  กับคุณสมบัติต่างๆของสารประกอบ จุดแข็งของวิธีนี้อยู่ที่ความแม่นยำจากการปรับค่าเส้นโค้ง (Curve fitting) โดยใช้ค่าคงที่ทางเทอร์โมไดนามิกส์จำนวน 6 ค่า อย่างไรก็ตาม การคำนวณ  $t_R$  จากค่าคงที่ทางเทอร์โมไดนามิกส์ยังไม่ได้รับการนำมาใช้ในวงกว้าง เนื่องจากมีฐานข้อมูลที่จำกัดและความซับซ้อนในการสร้างฐานข้อมูล (เช่น การจำลองโครมาโทแกรมของสารประกอบ 10 ชนิด ด้วยคอลัมน์ 10 แบบ ต้องใช้ค่าคงที่ทางเทอร์โมไดนามิกส์ถึง 100 ชุด)

ทฤษฎี Linear solvation energy relationship (LSER) [6] จึงถูกพัฒนาเพื่อศึกษาอันตรกิริยา ระหว่างเฟสนิ่ง และเฟสเคลื่อนที่ โดยการนำโมเลกุลของสารอินทรีย์ระเหยง่ายและสารอินทรีย์กึ่งระเหยหลายๆชนิดมาวิเคราะห์ด้วยคอลัมน์ชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และตัวตรวจวัดเป็นแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Mass spectrometer; MS) แล้วนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ผ่านกระบวนการปรับเส้นโค้ง (Curve fitting) ได้เป็น

ความสัมพันธ์ระหว่างคาร์พาซิตีแฟกเตอร์ (Capacity factor;  $k$ ) และ 5 ค่าคงที่ ( $eE sS aA bB lL$ ) ซึ่งแต่ละโมเลกุลและคอลัมน์ก็จะมีชุดค่าคงที่เฉพาะตัวเป็นฐานข้อมูล LSER (LSER databased) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะใช้ทฤษฎี LSER จำลองค่าคาร์พาซิตีแฟกเตอร์ แล้วนำไปแทนค่าในสมการต่างๆเพื่อจำลอง คาร์เทนชันไทม์ (Retention time;  $t_R$ ) ความกว้างของฐานพีค (Peak width;  $\sigma$ ) และความเข้มของพีค (Peak intensity;  $g(x)$ ) เพื่อจำลองโครมาโทแกรมออกมาก่อนที่จะเริ่มทำการทดลองจริง [7] ผลที่ได้คือการประหยัดงบประมาณในการวิเคราะห์และลดระยะเวลาในการลองผิดลองถูกเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุด

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้จะจำลองโครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้ Microsoft Excel เพื่อศึกษาผลการปรับตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความยาวคอลัมน์ รัศมีคอลัมน์ อัตราการไหลของแก๊สพา และอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ และมีการจำลองผลเพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองจริงที่ได้รับการตีพิมพ์ ได้แก่งานวิจัย Analysis of *n*-alkanes in water samples by means of headspace solvent microextraction and gas chromatography [8] และ Performance and selectivity of lower-rim substituted calix[4]arene as a stationary phase for capillary gas chromatography [9]

### 2.1 คำนวณเวลาที่แก๊สพาเคลื่อนที่ในคอลัมน์ ( $t_0$ ) จากสมการอัตราการไหลของแก๊สพา

อัตราการไหลของแก๊สที่พาโมเลกุลของสารตัวอย่าง จากจุดที่เริ่มฉีดเข้ามา ผ่านคอลัมน์ไปยังดีเทค

เตอร์ คือสัดส่วนระหว่างปริมาตรภายในคอลัมน์ต่อเวลาที่แก๊สพาใช้เคลื่อนที่ในคอลัมน์ สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (1) [10]

$$v = \frac{\pi r^2 L}{t_0} \tag{1}$$

โดยที่

$r$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์

$L$  = ความยาวของคอลัมน์

$t_0$  = เวลาที่แก๊สพาเคลื่อนที่ในคอลัมน์โดยไม่มีสารตัวอย่าง

### 2.2 คำนวณ Retention factor ( $k$ ) จากทฤษฎี LSER

ทฤษฎี LSER ได้เสนออันตรกิริยาระหว่างสารตัวอย่างและเฟสนิ่งของคอลัมน์ออกมาดังสมการที่ (2) [11]-[13]

$$\log k = eE + sS + aA + bB + lL + c \tag{2}$$

โดยที่

$c$  = ค่าคงที่ (Intercept constant)

$k$  = ค่าคาร์พาซิตีแฟกเตอร์ (Capacity factor)

$eE sS aA bB$  และ  $lL$  = ผลคูณระหว่างชุดค่าคงที่ของสารตัวอย่างและเฟสนิ่ง โดยตัวอักษรพิมพ์ใหญ่เป็นชุดค่าคงที่ที่มาจากสารตัวอย่าง และตัวอักษรพิมพ์เล็กเป็นชุดค่าคงที่ที่มาจากเฟสนิ่งของคอลัมน์ ซึ่งแต่ละค่าคงที่จะแสดงถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติที่ถูกควบคุมโดยค่าคงที่ต่างๆจากสมการ LSER [10]

ชุดค่าคงที่จากสารตัวอย่าง	ชุดค่าคงที่จากเฟสหนึ่ง	คุณสมบัติ
$E$	$e$	พันธะคู่ของโครงสร้างโมเลกุล (Dispersivity-related)
$S$	$s$	ความมีขั้วของโครงสร้างโมเลกุล (Dipolarity-type)
$A$	$a$	พันธะไฮโดรเจน (H-bond) จากโครงสร้างโมเลกุลที่มีหมู่กรด
$B$	$b$	พันธะไฮโดรเจน (H-bond) จากโครงสร้างโมเลกุลที่มีหมู่เบส
$L$	$l$	ความยาวของสายโซ่ของโครงสร้างโมเลกุล (Dispersion/ cavity formation)

### 2.3 คำนวณรีเทนชันไทม์ ( $t_R$ ) ในระบบอุณหภูมิกคงที่

Capacity factor ( $k$ ) คืออัตราส่วนระหว่างโมลของสารตัวอย่าง ในคอลัมน์ต่อโมลของสารตัวอย่าง ในแก๊สพา โดย  $k$  จะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารตัวอย่างในคอลัมน์ [6] เนื่องจากหากโมเลกุลของสารตัวอย่างมีอันตรกิริยาได้ดี (Strong interaction) กับคอลัมน์จะส่งผลให้โมเลกุลดังกล่าวใช้เวลาอยู่ในคอลัมน์ (Retention time;  $t_R$ ) นานกว่าโมเลกุลที่มีอันตรกิริยากับคอลัมน์ไม่ดี (Weak interaction) โดย  $k$  และ  $t_R$  มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3) [11]

$$t_R = kt_0 + t_0 \tag{3}$$

โดยที่

$t_R$  = รีเทนชันไทม์

### 2.4 คำนวณความกว้างของฐานพีค ( $\sigma$ ) จากสมการส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

สมการส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานถูกใช้ในการคำนวณความกว้างของฐานพีค (Peak width;  $\sigma$ ) ดังสมการที่ (4) ซึ่งขึ้นกับ รีเทนชันไทม์ ความยาวคอลัมน์ และค่าความสูงของแต่ละ  $N$  ส่วนของคอลัมน์ที่เกิดการแยกโมเลกุลของสารตัวอย่างและความสูงเพลต (Plate

height;  $H$ ) ดังสมการที่ (5) ซึ่งค่า  $N$  และ  $H$  เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดคอลัมน์ที่ถูกผลิตออกมาใช้งาน โดยคอลัมน์ที่มีจำนวนเพลต (Theoretical plate;  $N$ ) สูง หมายถึงคอลัมน์ที่มีการกระจายของสัดส่วนที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารตัวอย่างและคอลัมน์มาก จะได้พีคที่มีลักษณะแคบและคมชัด ประกอบกับโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ใช้เวลาเคลื่อนที่ในคอลัมน์น้อย ( $t_R$  น้อย) พีคของโครมาโทแกรมจะมีฐานที่แคบกว่าโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ใช้เวลาเคลื่อนที่ในคอลัมน์มาก ( $t_R$  มาก) [14], [15]

$$\sigma = \sqrt{\frac{H(t_R)^2}{L}} \tag{4}$$

$$H = \frac{L}{N} \tag{5}$$

โดยที่

$L$  = ความยาวของคอลัมน์

$N$  = จำนวนเพลต (Theoretical plate)

$H$  = ความสูงของเพลต

$\sigma$  = ความกว้างของฐานพีค

### 2.5 คำนวณความเข้มของพีค (Peak intensity) จากสมการเกาส์เซียน (Gaussian equation)

สมการเกาส์เซียนถูกใช้ทางสถิติเพื่อคำนวณการกระจายแบบปกติของข้อมูล (Normal distribution)

ดังสมการที่ (6) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้สมการดังกล่าว ในการคำนวณความเข้มของพีก [16]

$$g(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t_R-t_0}{\sigma}\right)^2} \quad (6)$$

โดยที่

$g(x)$  = ความเข้มของพีก (Peak intensity)

## 2.6 คำนวณรีเทนชันไทม์ ( $t_R$ ) ในระบบ อุณหภูมิที่ถูกโปรแกรม

เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อพลังงานจลน์ของ โมเลกุล ความร้อนที่โมเลกุลได้รับจะแปรผันตรงกับ ความเร็วของโมเลกุล ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิในคอลัมน์สูงขึ้น โมเลกุลของสารตัวอย่างจะออกมาจากคอลัมน์เร็วขึ้น ( $t_R$  ต่ำ) โดยสมการระบบอุณหภูมิที่ถูกโปรแกรมใช้ใน

การคำนวณ  $t_R$  ที่อุณหภูมิเริ่มต้น  $T_0$  ถึงอุณหภูมิสุดท้าย  $T_R$  และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $\gamma$  ดังสมการที่ (7) [17]

$$1 = \frac{1}{\gamma} \int_{T_0}^{T_R} \frac{1}{t_0(t_R)[k_j(T)]} dt \quad (7)$$

โดยที่

$\gamma$  = อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate)

$T_0$  = อุณหภูมิเริ่มต้น

$T_R$  = อุณหภูมิสุดท้าย

$k_j(T)$  = capacity factor ของโมเลกุลสารตัวอย่าง  $j$  ที่อุณหภูมิ  $T$

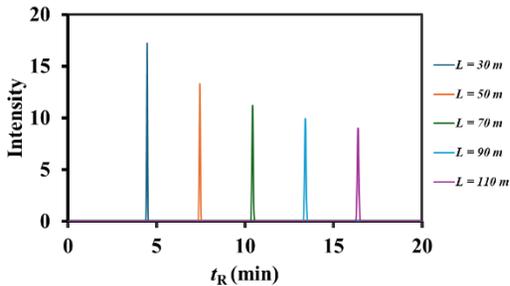
งานวิจัยนี้ใช้ Microsoft Excel ในการคำนวณ ค่าตัวแปรต่างๆและพลอตโครมาโทแกรม โดยสรุป ขั้นตอนการคำนวณตัวแปรต่างๆโดยใช้สมการ 1-7 ถูก แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปขั้นตอนการคำนวณตัวแปรจากสมการที่ 1-7 เพื่อจำลองพีกโปรไฟล์ในเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

สมการ	คำอธิบาย
(1) $v = \frac{\pi r^2 L}{t_0}$	แทนค่าอัตราการไหล ( $v$ ) รัศมีคอลัมน์ ( $r$ ) และความยาวคอลัมน์ ( $L$ ) ใน (1) เพื่อคำนวณเวลาที่แก๊สพาเคลื่อนที่ในคอลัมน์โดยไม่มีสารตัวอย่าง ( $t_0$ )
(2) $\log k = eE + sS + aA + bB + lL + c$	รวบรวมค่าคงที่ของสารตัวอย่าง ( $E S A B$ และ $L$ ) และคอลัมน์ ( $e s a b l$ และ $c$ ) แล้วแทนใน (2) เพื่อคำนวณค่า capacity factor ( $k$ )
(3) $t_R = kt_0 + t_0$	แทนค่า $k$ และ $t_0$ ใน (3) เพื่อคำนวณ retention time ( $t_R$ ) ในระบบ อุณหภูมิคงที่
(4) $\sigma = \sqrt{\frac{H(t_R)^2}{L}}$	แทนค่า $t_R$ ใน (4) เพื่อคำนวณความกว้างของฐานพีก $\sigma$ (เมื่อ $H = L/N$ ) (5) (เมื่อ $N$ คือ จำนวนเพลต)
(6) $g(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t_R-t_0}{\sigma}\right)^2}$	แทนค่า $t_R$ $t_0$ และ $\sigma$ ใน (6) เพื่อคำนวณความเข้มของพีก ( $g(x)$ )
(7) $1 = \frac{1}{\gamma} \int_{T_0}^{T_R} \frac{1}{t_0(t_R)[k_j(T)]} dt$	แทนค่า $k$ และ $t_0$ ใน (7) เพื่อคำนวณ retention time ( $t_R$ ) ในระบบ temperature program จากนั้นจึงนำ $t_R$ ที่ได้ไปแทนใน (6) เพื่อคำนวณ ( $g(x)$ )

### 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

#### 3.1 ศึกษาผลของการปรับความยาวของคอลัมน์ที่มีต่อแก๊สโครมาโทแกรม



รูปที่ 1 การจำลองแก๊สโครมาโทแกรมของ *n*-hexane ( $E = 0.134$   $S = 0.100$   $A = 0$   $B = 0.098$  และ  $L = 2.763$ ) โดยใช้คอลัมน์ HP-5 ( $e = 0$   $s = 0.305$   $a = 0.260$   $b = 0$   $l = 0.561$  และ  $c = -2.313$ )  $L = 30$   $50$   $70$   $90$  และ  $110$  เมตร  $r = 0.5$  มิลลิเมตร  $v = 0.25$  มิลลิลิตร/นาที อุณหภูมิคงที่ 100 องศาเซลเซียส

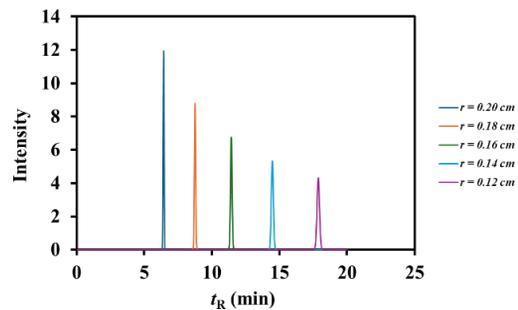
ตารางที่ 3 ค่า  $t_R$   $\sigma$  และ  $g(x)$  ที่ได้จากการจำลองเมื่อค่า  $L$  เป็น 30 50 70 90 และ 110 เมตร

$L$ (m)	$t_R$ (min)	$\sigma$	$g(x)$
30	4.468	0.023	17.222
50	7.447	0.030	13.305
70	10.425	0.035	11.215
90	13.404	0.040	9.938
110	16.382	0.044	9.016

จากการศึกษาผลของการปรับความยาวของคอลัมน์โดยการจำลองผลการวิเคราะห์ *n*-hexane ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (คอลัมน์ HP-5  $L = 30$   $50$   $70$   $90$  และ  $110$  เมตร  $r = 0.5$  มิลลิเมตร  $v = 0.25$  มิลลิลิตร/นาที อุณหภูมิคงที่ 100 องศาเซลเซียส) ได้ผลโครมาโทแกรมดังรูปที่ 1 พบว่าเมื่อความยาวของคอลัมน์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ารีเทนชันไทม์และความ

กว้างของฐานพีคมากขึ้น และยังความยาวของคอลัมน์มากขึ้นสารตัวอย่างจะใช้เวลาเคลื่อนที่ในคอลัมน์นานขึ้น ส่งผลให้ความกว้างของฐานพีคกว้างขึ้น แต่ความเข้มของพีคจะมีค่าลดลง เนื่องจากสมการเกาส์เซียนจะใช้คำนวณการกระจายตัวแบบปกติ (normal distribution) ทุกพีคจะมีพื้นที่ใต้กราฟเท่ากัน ดังนั้นเมื่อความยาวคอลัมน์มากขึ้น ฐานพีคจะกว้างขึ้น ส่งผลให้ความสูงของพีค  $g(x)$  ลดลง (ตารางที่ 3)

#### 3.2 ศึกษาผลของการปรับเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์



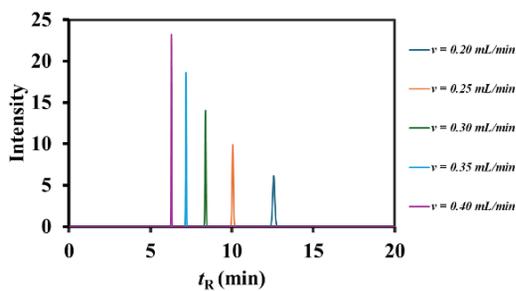
รูปที่ 2 การจำลองแก๊สโครมาโทแกรมของ *n*-hexane ( $E = 0.134$   $S = 0.100$   $A = 0$   $B = 0.098$  และ  $L = 2.763$ ) โดยใช้คอลัมน์ HP-5 ( $e = 0$   $s = 0.305$   $a = 0.260$   $b = 0$   $l = 0.561$  และ  $c = -2.313$ )  $L = 30$  เมตร  $r = 0.12$   $0.14$   $0.16$  และ  $0.20$  มิลลิเมตร.  $v = 0.25$  มิลลิลิตร/นาที อุณหภูมิคงที่ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4 ค่า  $t_R$   $\sigma$  และ  $g(x)$  ที่ได้จากการจำลองเมื่อค่า  $r$  เป็น 0.12 0.14 0.16 0.18 และ 0.20 มิลลิเมตร

$r$ (mm)	$t_R$ (min)	$\sigma$	$g(x)$
0.12	0.092	17.872	4.125
0.14	0.075	14.476	5.071
0.16	0.059	11.438	6.300
0.18	0.045	8.757	8.473
0.20	0.033	6.434	11.082

จากการศึกษาผลของการปรับปริมาตรของคอลัมน์โดยการจำลองผลการวิเคราะห์ *n*-hexane ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (คอลัมน์ HP-5  $L = 30$  เมตร  $r = 0.12$  0.14 0.16 0.18 และ 0.20 มิลลิเมตร  $v = 0.25$  มิลลิตร/นาที อุณหภูมิคงที่ 100 องศาเซลเซียส) ได้ผลโครมาโทแกรม ดังรูปที่ 2 พบว่าเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้รีเทนชันใหม่และความกว้างของฐานพีกลดลง เนื่องจากสัดส่วนปริมาตรสารตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยความยาวของคอลัมน์ที่เคลื่อนที่ในคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางกว้างจะมากกว่าคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางแคบ จึงทำให้ใช้เวลาที่เคลื่อนที่ในคอลัมน์น้อยลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์มากขึ้นและส่งผลให้ความกว้างของฐานพีกลดลง (ตารางที่ 4)

### 3.3 ศึกษาผลของการปรับอัตราการไหลของแก๊สพาที่มีต่อแก๊สโครมาโทแกรม



รูปที่ 3 การจำลองแก๊สโครมาโทแกรมของ *n*-hexane ( $E = 0.134$   $S = 0.100$   $A = 0$   $B = 0.098$  และ  $L = 2.763$ ) โดยใช้คอลัมน์ HP-5 ( $e = 0$   $s = 0.305$   $a = 0.260$   $b = 0$   $l = 0.561$  และ  $c = -2.313$ )  $L = 30$  เมตร  $r = 0.5$  มิลลิเมตร  $v = 0.20$  0.25 0.30 0.35 และ 0.40 มิลลิตร/นาที อุณหภูมิคงที่ 100 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาผลของการปรับอัตราการไหลของแก๊สพาโดยการจำลองผลการวิเคราะห์ *n*-hexane ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ( $L = 30$  เมตร  $r = 5$

มิลลิเมตร  $v = 0.20$  0.25 0.30 0.35 และ 0.40 มิลลิตร/นาที อุณหภูมิคงที่ 100 องศาเซลเซียส) ได้ผลเป็นโครมาโทแกรมดังรูปที่ 3 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของแก๊สพาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้รีเทนชันใหม่และความกว้างของฐานพีกลดลง เนื่องจากสารตัวอย่างจะถูกผลักดันโดยแก๊สพาให้เคลื่อนที่ในคอลัมน์ได้เร็วขึ้น จึงทำให้ใช้เวลาเคลื่อนที่ในคอลัมน์น้อยลงเมื่ออัตราการไหลของแก๊สพามากขึ้น ส่งผลให้ความกว้างของฐานพีกลดลงและความเข้มของพีคสูงขึ้น (ตารางที่ 5)

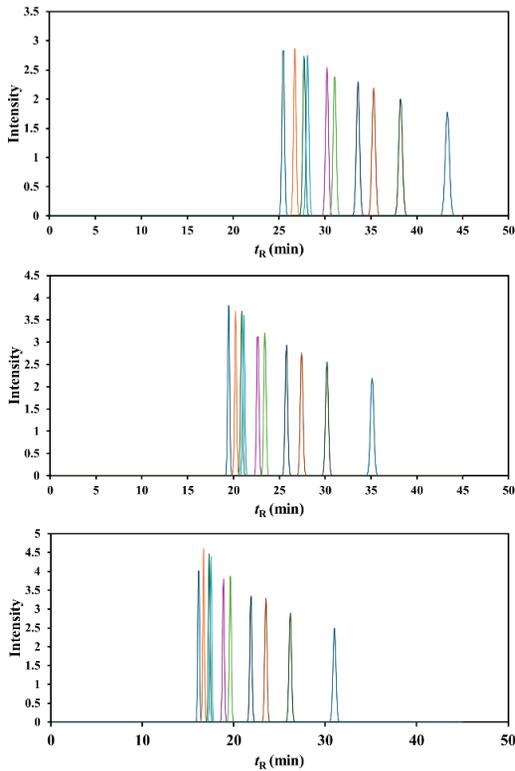
ตารางที่ 5 ค่า  $t_R$   $\sigma$  และ  $g(x)$  ที่ได้จากการจำลองเมื่อค่า  $v$  เป็น 0.20 0.25 0.30 0.35 และ 0.40 มิลลิตร/นาที

$v$ (mL/min)	$t_R$ (min)	$\sigma$	$g(x)$
0.20	12.566	0.065	6.137
0.25	10.053	0.040	9.896
0.30	8.377	0.028	14.027
0.35	7.181	0.021	18.627
0.40	6.283	0.017	23.169

### 3.4 ศึกษาผลของการปรับอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อแก๊สโครมาโทแกรม

จากการศึกษาผลของการปรับอัตราการไหลของคอลัมน์โดยการจำลองผลการวิเคราะห์ Chlorobiphenyl ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ( $L = 30$  เมตร  $r = 5$  มิลลิเมตร  $v = 1$  มิลลิตร/นาที  $\gamma = 6$  9 และ 12 องศาเซลเซียส/นาที) ได้ผลเป็นโครมาโทแกรมดังรูปที่ 4 พบว่าเมื่ออัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ารีเทนชันใหม่และความกว้างของฐานพีกลดลง จากรูปที่ 4 (ก) เมื่อให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 6 องศาเซลเซียส/นาที สารตัวอย่างจะใช้เวลาเคลื่อนที่ในคอลัมน์ 25-45 นาที แต่เมื่อเพิ่มอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 9 และ 12 องศาเซลเซียส/นาที ดังรูปที่ 4 (ข) และ (ค) ตามลำดับ สารตัวอย่างจะใช้เวลา

เคลื่อนที่ในคอลัมน์ลดลงเหลือ 20-35 และ 15-30 นาทีตามลำดับ เนื่องจากเมื่อสารตัวอย่างได้รับความร้อนจะกระตุ้นให้โมเลกุลของสารตัวอย่างมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น จึงเคลื่อนที่ในคอลัมน์ได้เร็วขึ้น เวลาที่เคลื่อนที่ในคอลัมน์จึงน้อยลงเมื่ออัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากขึ้นและส่งผลให้ความกว้างของฐานพีกแคบลง



**รูปที่ 4** การจำลองแก๊สโครมาโทแกรมของกลุ่มสารประกอบ Chlorobiphenyl โดยใช้คอลัมน์ SPB-Octyl ( $e = 0$   $s = 0.305$   $a = 0.260$   $b = 0$   $l = 0.561$  และ  $c = -2.313$ )  $L = 30$  เมตร  $r = 1.25$  มิลลิเมตร  $v = 1$  มิลลิลิตร/นาที  $\gamma = 6$  (ก) 9 (ข) และ 12 (ค) องศาเซลเซียส/นาที

### 3.5 เปรียบเทียบโครมาโทแกรมที่ได้จากการจำลองและการทดลองจริง

M.K. Zanjani et al. (2006) [8] ได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยการวิเคราะห์สารตัวอย่าง *n*-alkanes ในน้ำ โดยใช้เทคนิค headspace solvent microextraction gas chromatography โดยงานวิจัยนี้ นำโครมาโทแกรมที่ได้จากงานวิจัยดังกล่าวมา (รูปที่ 5 (ก)) เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองจริงและจากการจำลอง โดยมีสารตัวอย่างที่สนใจทั้งหมด 8 สาร ได้แก่ *n*-heptane *n*-octane *n*-methylbenzene *n*-nonane *n*-undecane *n*-hexadecane *n*-tetradecane และ *n*-octadecane (ค่าคงที่ของสารตัวอย่างจากสมการ LSER แสดงดังตารางที่ 6) โดยตัวอย่างน้ำถูกวิเคราะห์ด้วย Hewlett-Packard 5890 series II คอลัมน์ DB-5 (5% phenyl + 95% methylpolysiloxane) fused-silica capillary column (ค่าคงที่ LSER ของคอลัมน์  $e = 0$   $s = 0.294$   $a = 0.241$   $b = 0$   $l = 0.571$   $c = -1.927$ ) และได้ผลการจำลองโครมาโทแกรม ดังรูปที่ 5 (ข)

T. Sun et al. (2019) [9] ได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยการวิเคราะห์สารตัวอย่าง *n*-alkane โดยใช้เทคนิค GC-FID Agilent 7890A gas chromatograph คอลัมน์ HP-5 (ค่าคงที่ LSER ของคอลัมน์  $e = 0$   $s = 0.305$   $a = 0.260$   $b = 0$   $l = 0.561$   $c = -2.313$ ) โดยมีสารตัวอย่างที่สนใจทั้งหมด 8 สาร ได้แก่ *n*-hexane *n*-heptane *n*-octane *n*-methylbenzene *n*-nonane *n*-undecane *n*-dodecane และ *n*-tridecane (รูปที่ 6 (ก)) (ค่าคงที่ของสารตัวอย่างจากสมการ LSER แสดงดังตารางที่ 7) และได้ผลการจำลองโครมาโทแกรมดังรูปที่ 5 (ข)

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกับการทดลองจริงที่ได้รับการตีพิมพ์ พบว่าเมื่อเรียงลำดับ  $t_R$  ของแต่ละสารตัวอย่างที่ได้จากการจำลองตรงกับผลจากการทดลองจริงทั้งหมด (ตารางที่ 6 และ 7) ค่ารีเทนชันไทม์และสัดส่วนของ ความเข้มข้นของพีก ที่ได้จากการจำลองก็

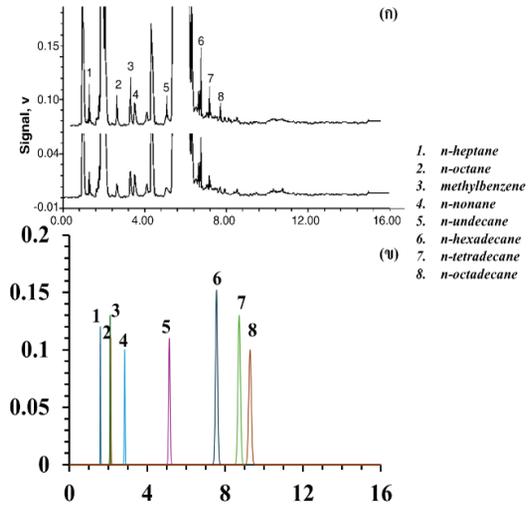
มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง เมื่อนำค่ารีเทนชันไทม์ที่ได้จากการทดลองและการจำลองมาวิเคราะห์ด้วย correlation plot ดังรูปที่ 7(ก) และ 7(ข) พบว่าได้ค่า  $R^2$  เป็น 0.9532 และ 0.9896 ตามลำดับ

**ตารางที่ 6** ค่าคงที่ LSER และ  $t_R$  จากการจำลองและการทดลองด้วยเทคนิค GC-FID Hewlett-Packard 5890 series II คอลัมน์ DB-5 (5% phenyl + 95% methylpolysiloxane) fused-silica capillary column  $L = 20$  เมตร  $r = 0.26$  มิลลิเมตร  $v = 5$  มิลลิลิตร/นาที  $T_0 = 40$  องศาเซลเซียส (เป็นเวลา 2 นาที)  $T_R = 120$  องศาเซลเซียส และ  $\gamma = 8$  องศาเซลเซียส/นาที ของสารตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์สารอินทรีย์ในน้ำ [8]

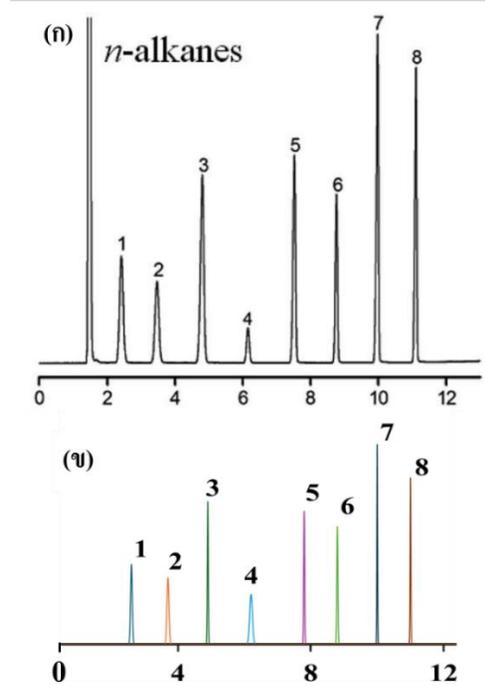
สารตัวอย่าง	$E$	$S$	$A$	$B$	$L$	$t_R$ จากการจำลอง	$t_R$ จากการทดลอง
<i>n</i> -heptane	0.135	0.097	0	0.102	3.251	1.60	1.50
<i>n</i> -octane	0.141	0.099	0	0.103	3.781	2.12	2.40
<i>n</i> -nonane	0.148	0.104	0	0.106	4.243	2.10	3.10
<i>n</i> -undecane	0.152	0.114	0	0.105	5.303	2.84	3.60
<i>n</i> -tetradecane	0.199	0.144	0	0.106	6.744	5.14	5.10
<i>n</i> -hexadecane	0.217	0.175	0	0.092	8.174	8.72	6.80
<i>n</i> -octadecane	0.226	0.235	0	0.111	9.445	7.56	7.20
methylbenzene	0.708	0.596	0	0.223	3.418	9.28	7.90

**ตารางที่ 7** ค่าคงที่ LSER และ  $t_R$  จากการจำลองและการทดลองด้วยเทคนิค GC-FID Agilent 7890A gas chromatograph คอลัมน์ HP-5  $L = 30$  เมตร  $i.d. = 0.25$  มิลลิเมตร  $v = 0.6$  มิลลิลิตร/นาที  $T_0 = 40$  องศาเซลเซียส (เป็นเวลา 1 นาที)  $T_R = 160$  องศาเซลเซียส และ  $\gamma = 10$  องศาเซลเซียส/นาที [9]

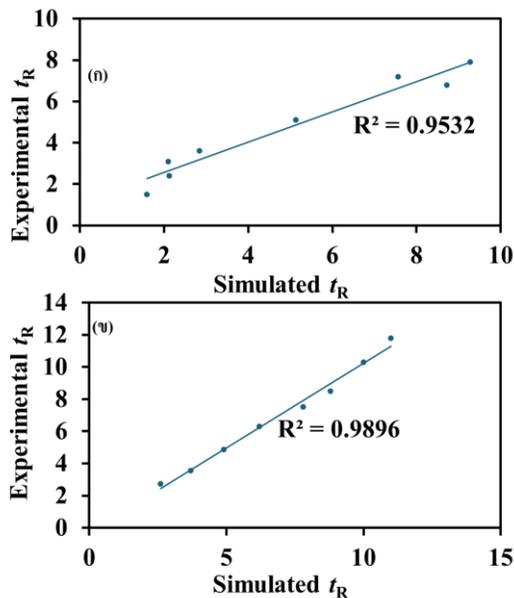
สารตัวอย่าง	$E$	$S$	$A$	$B$	$L$	$t_R$ จากการจำลอง	$t_R$ จากการทดลอง
<i>n</i> -hexane	0.134	0.100	0	0.098	2.763	2.60	2.74
<i>n</i> -heptane	0.135	0.097	0	0.102	3.251	3.70	3.55
<i>n</i> -octane	0.141	0.099	0	0.103	3.781	4.90	4.87
<i>n</i> -nonane	0.148	0.104	0	0.106	4.243	6.20	6.30
<i>n</i> -decane	0.148	0.109	0	0.105	4.805	7.80	7.52
<i>n</i> -undecane	0.152	0.114	0	0.105	5.303	8.80	8.50
<i>n</i> -dodecane	0.171	0.129	0	0.108	5.777	10.00	10.30
<i>n</i> -tridecane	0.187	0.146	0	0.109	6.293	11.00	11.8



รูปที่ 5 โครมาโทแกรมจากการวิเคราะห์สารตัวอย่าง *n*-alkane ที่ได้รับการตีพิมพ์ [8] ได้แก่ *n*-heptane *n*-octane *n*-methylbenzene *n*-nonane *n*-undecane *n*-hexadecane *n*-tetradecane และ *n*-octadecane ที่ได้จากทดลองจริง (ก) และการจำลอง (ข) โดยเทคนิค GC-FID Hewlett-Packard 5890 series II คอลัมน์ DB-5 (5% phenyl + 95% methylpolysiloxane) fused-silica capillary column  $L = 20$  เมตร  $i.d. = 0.26$  มิลลิเมตร  $v = 5$  มิลลิลิตร/นาที  $T_0 = 40$  องศาเซลเซียส (เป็นเวลา 2 นาที)  $T_R = 120$  องศาเซลเซียส และ  $\gamma = 8$  องศาเซลเซียส/นาที



รูปที่ 6 โครมาโทแกรมจากการวิเคราะห์สารตัวอย่าง *n*-alkane ที่ได้รับการตีพิมพ์ [9] ได้แก่ *n*-hexane *n*-heptane *n*-octane *n*-methylbenzene *n*-nonane *n*-undecane *n*-dodecane และ *n*-tridecane ที่ได้จากทดลองจริง (ก) และการจำลอง (ข) โดยเทคนิค GC-FID Agilent 7890A gas chromatograph คอลัมน์ HP-5  $L = 30$  เมตร  $i.d. = 0.25$  มิลลิเมตร  $v = 0.6$  มิลลิลิตร/นาที  $T_0 = 40$  องศาเซลเซียส (เป็นเวลา 1 นาที)  $T_R = 160$  องศาเซลเซียส และ  $\gamma = 10$  องศาเซลเซียส/นาที



รูปที่ 7 Correlation plot ระหว่าง  $t_R$  ที่ได้จากการทดลอง (Experimental  $t_R$ ) และ  $t_R$  ที่ได้จากการจำลอง (Simulated  $t_R$ ) ของงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ [8] (ก) และ [9] (ข) มี  $R^2 = 0.9532$  และ  $0.9896$  ตามลำดับ

#### 4. สรุป

จากการศึกษาผลของการปรับความยาวของคอลัมน์ รัศมีของคอลัมน์ อัตราการไหลของแก๊สพา และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ว่าส่งผลอย่างไรต่อเวลาในการเคลื่อนที่ของสารตัวอย่างในคอลัมน์ พบว่า โครมาโทแกรมที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำหรับจำลองฟิสิกโปรไฟล์ในเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีจะแสดงผลลัพธ์ออกมาตรงตามหลักการของโครมาโทกราฟีทุกประการ เมื่อเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างผลจากการจำลองและผลการทดลองจริงด้วย correlation plot พบว่ามีค่า  $R^2$  เป็น  $0.9532$  และ  $0.9896$  ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสามารถใช้ทฤษฎี LSER มาประยุกต์เพื่อพัฒนาโปรแกรมในการจำลองผลโครมาโทแกรม เมื่อต้องการปรับพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ในแต่ละครั้ง เช่น ชนิดของคอลัมน์ ความยาวคอลัมน์ อัตราการไหลของแก๊สพา และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ

ก่อนที่จะเริ่มทำการทดลองจริง เพื่อประหยัดเวลาสารเคมีต่างๆและต้นทุนในการวิเคราะห์

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณการสนับสนุนจากภาควิชาเคมี-ฟิสิกส์ กองวิชาวิทยาศาสตร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช และภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Bartle, P. Myers, "History of gas chromatography," *Trends in Analytical Chemistry*, vol. 21, pp. 547-557, Sep. 2002.
- [2] N. Grova, G. Salquèbre, H. Schroeder, B.M.R. Appenzeller, "Determination of PAHs and OH-PAHs in rat brain by gas chromatography tandem (triple quadrupole) mass spectrometry," *Chemical Research in Toxicology*, vol. 24, pp. 1653-1667, Oct. 2011.
- [3] S. Kurata, M. Nagai, "Rapid discrimination of counterfeit gas oil prepared by mixing fuel oil with sulfuric acid using gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-atomic emission detection," *Energy & Fuels*, vol. 18, pp. 1220-1225, Jul. 2004.
- [4] Y. Polyakova, K. Row, "Quantitative structure-retention relationships applied to reversed phase high-performance liquid chromatography," *Medicinal Chemistry Research*, vol.14, pp.488-522, Dec. 2008.
- [5] S. Pojjanapornpun, K. Aryasuk, S. Lilitchan, K. Krisnangkura, "Gibbs energy additivity

- approaches to QSRR in generating gas chromatographic retention time for identification of fatty acid methyl ester,” *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 409, pp. 2777-2789, Feb. 2017.
- [6] M.H. Abraham, A. Ibrahim, A.M. Zissimos, “Determination of sets of solute descriptors from chromatographic measurements,” *Journal of Chromatography A*, vol. 1037, pp. 29-47, May. 2004.
- [7] P. Kakanopas, P. Janta, S. Vimolmangkang, F. Hermatasia, C. Kulsing, “Retention index-based approach for simulation of results and application for validation of compound identification in comprehensive two-dimensional gas chromatography,” *Journal of Chromatography A*, vol. 1679, p. 463394, Aug. 2022.
- [8] M.K. Zanjani, Y. Yamini, S. Shariati, “Analysis of *n*-alkanes in water samples by means of headspace solvent microextraction and gas chromatography,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 136, pp. 714-720, Aug. 2006.
- [9] T. Sun, B. Li, X. Shuai, Y. Chen, W. Li, Z. Cai, X. Qiao, S. Hu and L. Ma, Performance and selectivity of lower-rim substituted calix[4]arene as a stationary phase for capillary gas chromatography, *RSC Advances*, vol. 9, pp. 21207-21214, Apr. 2019.
- [10] J. McLean, P.L. Pauson, “A gas chromatography demonstration apparatus,” *Journal of Chemical Education*, vol. 40, pp. 539, May. 1963.
- [11] Y. Nolvachai, C. Kulsing, P.J. Marriott, “In silico modeling of hundred thousand experiments for effective selection of ionic liquid phase combinations in comprehensive two-dimensional gas chromatography.” *Analytical Chemistry*, vol. 88, pp. 2125-2131, Feb. 2016.
- [12] B.d.A. Zellner, C. Bicchì, P. Dugo, P. Rubiolo, G. Dugo, L. Mondello, “Linear retention indices in gas chromatographic analysis: a review,” *Flavour and Fragrance Journal*, vol. 23, pp. 297-314, Aug. 2008.
- [13] C. Kulsing, Y. Nolvachai, A.X. Zeng, S.-T. Chin, B. Mitrevski, P.J. Marriott, “From molecular structures of ionic liquids to predicted retention of fatty acid methyl esters in comprehensive two-dimensional gas chromatography,” *ChemPlusChem*, vol. 79, pp. 790-797, Jun. 2014.
- [14] U.D. Neue, “Theory of peak capacity in gradient elution,” *Journal of Chromatography A*, vol. 1079, pp. 153-161, Jun. 2005.
- [15] S. Pojjanapornpun, C. Kulsing, P. Kakanopas, Y. Nolvachai, K. Aryasuk, K. Krisnangkura, P.J. Marriott, “Simulation of peak position and response profiles in comprehensive two-dimensional gas chromatography,” *Journal of Chromatography A*, vol. 1607, p. 460392, Dec. 2019.
- [16] E.V. Dose, “Simulation of gas chromatographic retention and peak width using thermodynamic retention indexes,”

*Analytical Chemistry*, vol. 59, pp. 2414-2419, Oct. 1987.

- [17] C. Kulsing, Y. Nolvachai, P. Rawson, D.J. Evans, P.J. Marriott, "Continuum in MDGC

technology: from classical multidimensional to comprehensive Two-dimensional gas chromatography," *Analytical Chemistry*, vol. 88, pp. 3529-3538, Mar. 2016.

# การประยุกต์ใช้เทคนิคการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเส้นโค้ง ควมคุมอ่างเก็บน้ำ กรณีศึกษาอ่างเก็บน้ำห้วยหลวง

นิวัตร ภูมิพันธ์\* นพรัตน์ ธรรมวงษา และ ญัฐพงศ์ บุตรธนู

คณะเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

234 หมู่ 12 ตำบลสามพร้าว อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี 41000

รับบทความ 2 กรกฎาคม 2567 แก้ไขบทความ 1 มีนาคม 2568 ตอรับบทความ 4 เมษายน 2568

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เน้นการประยุกต์ใช้เทคนิคการค้นหาค่าที่เหมาะสมร่วมกับแบบจำลองการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำ เพื่อค้นหาเส้นโค้งควบคุมที่เหมาะสมสำหรับอ่างเก็บน้ำ ซึ่งใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาค่าตอบ โดยคำตอบที่ค้นหา คือ ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ความถี่ของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด และค่าเฉลี่ยของนํ้าไหลล้นน้อยที่สุด งานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลนํ้าทำในอดีตแต่ละเดือนที่ไหลเข้าสู่อ่างนํ้า ที่เกี่ยวข้องกับอ่างเก็บนํ้าห้วยหลวง ตำบลโคกสะอาด อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี ในช่วงเวลาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2527 ถึง 2566 รวมถึงข้อมูลเกี่ยวกับความต้องการใช้นํ้า และข้อมูลทางอุทกวิทยา รวมถึงข้อมูลทางกายภาพของอ่างเก็บนํ้าด้วย โดยข้อมูลเหล่านี้ใช้เพื่อหาความสัมพันธ์และแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับสร้างเส้นโค้งควบคุมการไหลของนํ้าในอ่างเก็บนํ้า นอกจากนี้ยังมีการจำลองเหตุการณ์ของปริมาณนํ้าท่าที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บนํ้าแบบรายเดือน จำนวน 1,000 ชุดเหตุการณ์ เพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของเส้นโค้งควบคุมที่สร้างขึ้นจากแบบจำลอง ซึ่งจะแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของสถานการณ์ที่เกิดการขาดแคลนนํ้าและนํ้าไหลล้น โดยระบุช่วงเวลาของเหตุการณ์ ปริมาณนํ้าเฉลี่ย และปริมาณนํ้าสูงสุด การวิจัยนี้พบว่าเส้นโค้งควบคุมของอ่างเก็บนํ้ามีความคล้ายคลึงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แม้ว่ามีจุดที่มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย การทดสอบและเปรียบเทียบเส้นโค้งควบคุมที่ได้จากแบบจำลองด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงขับเคลื่อนด้วยลม (WDO) กับเส้นโค้งควบคุมปัจจุบัน พบว่าเส้นโค้งควบคุมที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเล็กน้อย โดย GA ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดและเหมาะสมกับสถานการณ์นํ้าปกติ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้แบบจำลอง GA เพื่อพัฒนาเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บนํ้ามีความเป็นไปได้สูง ซึ่งสามารถนำไปสู่การปรับปรุงประสิทธิภาพของเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บนํ้าอย่างมีนัยสำคัญ และช่วยให้การจัดการทรัพยากรนํ้าในอนาคตมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

**คำสำคัญ :** เส้นโค้งควบคุม; การค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด; ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม; การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงขับเคลื่อนด้วยลม; การบริหารจัดการนํ้า

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +666 5294 9145, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: niwat.bh@udru.ac.th

# Application of Optimal Value Search Technique for Reservoir Rule Curves: A Case Study of Huai Luang

Niwat Bhumiphan\* Nopparat Thamwongsa and Nuttapong Bootthanu

Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University

234 Village No. 12, Sam Phrao Subdistrict, Mueang District, Udon Thani Province 41000

---

*Received 2 July 2024; Revised 1 March 2025; Accepted 4 April 2025*

## Abstract

This research focuses on the application of optimum search techniques in combination with reservoir system simulation models to find appropriate rule curves for reservoirs. It uses the objective function of finding the answer. The answer searched for is the average of the least water shortage, the frequency of water shortages is minimal and the average of the least overflowing water. This research uses analysis of historical inflows data each month that flows into the reservoir. Related to Huai Luang Reservoir, Khok Sa-at Subdistrict, Mueang District, Udon Thani Province for the period from 1984 to 2023, including information on water demand. and hydrological information This also includes physical information about the reservoir. These data are used to find appropriate models for creating curve rules to control water flow in reservoirs. In addition, a series of 1,000 monthly inflows events into the reservoir are simulated to evaluate the effectiveness of the rule curves generated from the model. This results in situations of water shortages and overflow. by specifying the time period of the event average water volume and maximum water volume. This research found that the rule curves of the reservoirs are similar and tend in the same direction. Although there are points with slightly different values. Testing and comparing the rule curves obtained from the Genetic algorithm (GA) and Wind Driven Optimization (WDO) models with the current rule curves. It was found that the rule curves obtained from the model had slightly better performance, with GA giving the best results and being suitable for normal water situations. The results indicate that the feasibility of using GA models to develop reservoir rule curves is highly feasible. This can lead to a significant improvement in the efficiency of the reservoir rule curves. and help to make water resource management in the future more efficient.

**Keywords :** Rule curve; Optimal value search; Genetic algorithm; Wind Driven Optimization; Water management

---

*\* Corresponding Author. Tel.: +666 5294 9145, E-mail Address: niwat.bh@udru.ac.th*

## 1. บทนำ

การจัดการทรัพยากรน้ำจำเป็นต้องมีการวางแผนอย่างดีและเหมาะสมเพื่อให้ทรัพยากรน้ำที่มีอย่างจำกัดสามารถสอดคล้องกับความต้องการ ด้านอุปโภค-บริโภค ในขณะที่เดียวกันควรให้ความสำคัญกับการเก็บรักษาแหล่งน้ำเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการ ในปัจจุบันแหล่งน้ำมีการเสื่อมโทรมทั้งด้านปริมาณและคุณภาพ [1], [2] การวางแผนและการบริหารงานจึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการสนับสนุนการจัดการที่มีประสิทธิภาพ และการเลือกแนวทางแก้ไขปัญหาก็เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่ง การนำระบบสนับสนุนการตัดสินใจมาใช้ในการทำงานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้อย่างมีนัยสำคัญ ด้วยเงื่อนไขที่ทำให้ตัดสินใจได้เชิงคุณภาพและนำแนวทางการจัดการไปใช้ในด้านการจัดการน้ำ [3], [4]

การจัดการทรัพยากรน้ำควรเน้นไปที่การวางแผนอย่างรอบคอบและประหยัด การวางแผนทรัพยากรน้ำเป็นขั้นตอนสำคัญที่จะทำให้มีทรัพยากรน้ำที่เพียงพอในอนาคต แม้ว่าในสถานการณ์ปัจจุบันอาจจะบรรลุวัตถุประสงค์ แต่สถานการณ์ในอนาคตอาจส่งผลให้เกิดวิกฤตการณ์ในการจัดการตามวัตถุประสงค์ที่ผ่านมา ดังนั้นการจัดการทรัพยากรน้ำในปัจจุบันจึงมุ่งเน้นไปที่การจัดการน้ำอย่างประหยัด และความยั่งยืนต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด [5] นอกจากนี้การจัดการทรัพยากรน้ำยังต้องคำนึงถึงการสร้างและปรับปรุงโครงสร้างพื้นที่รวมถึงการระบายน้ำเพื่อลดการท่วมและการขาดแคลนน้ำ การสร้างการตัดสินใจที่มีความคิดริเริ่มและใช้ข้อมูลที่ใช้พร้อมใช้ในการจัดการทรัพยากรน้ำเป็นสิ่งสำคัญ [6] การบริหารจัดการน้ำจึงต้องมีความประหยัดและมีผลกระทบต่อด้านอื่นๆ น้อยที่สุด และเป็นแนวทางให้ทุกภาคส่วนเข้ามามีส่วนร่วมในการบริหารจัดการ

การจัดการอ่างเก็บน้ำถือเป็นมาตรการอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในการพัฒนาการจัดการ

ทรัพยากรน้ำแบบบูรณาการ การควบคุมน้ำท่วมและความแห้งแล้งทั้งหมดอยู่ภายใต้การดำเนินการของอ่างเก็บน้ำ การทำให้บรรลุเป้าหมายของอ่างเก็บน้ำจะใช้การจัดการด้านอุปทานและด้านอุปสงค์เข้าด้วยกัน ดังนั้นการวางแผนการดำเนินงานอ่างเก็บน้ำล่วงหน้าจึงเป็นเครื่องมือสำคัญ พื้นฐานการจัดการอ่างเก็บน้ำทั่วไปจะใช้เส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ ซึ่งเป็นเกณฑ์การปล่อยน้ำที่พัฒนามาจากฐานแบบจำลองด้วยข้อมูลที่สำคัญ เช่น ความต้องการน้ำ ปริมาณฝน ปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำ ลักษณะทางกายภาพของกลุ่มน้ำและอ่างเก็บน้ำ อย่างไรก็ตามข้อมูลเหล่านี้ควรได้รับการตรวจสอบความถูกต้องก่อนนำไปวิเคราะห์เพื่อพัฒนาแบบจำลองระบบปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำภายใต้สภาวะต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพในการจัดการอ่างเก็บน้ำในอนาคต ดังนั้นเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำจึงถือเป็นทางเลือกอีกชุดหนึ่งในการตัดสินใจเกี่ยวกับระบบการจัดการน้ำ และเป็นเครื่องมือที่สำคัญพื้นฐานสำหรับการปรับปรุงการดำเนินงานของอ่างเก็บน้ำ [7], [8]

เส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำซึ่งสร้างขึ้นจากการวิเคราะห์ข้อมูลอุทกวิทยาในอดีตที่มีเงื่อนไขแตกต่างกัน โดยความต้องการน้ำจะแสดงในรูปแบบของเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ ประกอบด้วยเส้นกราฟสองเส้นดังนี้ เส้นโค้งควบคุมน้ำสูงสุด (Upper Rule Curve, URC) มีไว้สำหรับใช้ในฤดูฝนเพื่อให้มีพื้นที่รับน้ำและกักเก็บน้ำสำหรับกิจกรรมทั้งหมดในแต่ละเดือนอย่างเพียงพอ รวมถึงปริมาณน้ำในป่าใต้ไป ส่วนในฤดูแล้งจะใช้ เส้นโค้งควบคุมน้ำต่ำสุด (Lower Rule Curves, LRC) เพื่อตัดสินใจปล่อยน้ำหรือควบคุมระดับน้ำกับระดับน้ำกักเก็บต่ำสุดสำหรับฤดูเพาะปลูกด้านการเกษตร เส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำเป็นเครื่องมือในการหลีกเลี่ยงการกักเก็บน้ำมากเกินไป เนื่องจากอาจทำให้น้ำล้นอ่างส่งผลทำให้เขื่อนแตก ในขณะที่ปริมาณน้ำที่น้อยเกินไปอาจทำให้เกิดการขาดแคลนน้ำในอนาคต เห็นได้ชัดว่าเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำด้านบนและเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บ

น้ำด้านล่างคือส่วนสำคัญที่สุดในการจัดการระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ อย่างไรก็ตามเพื่อปรับปรุงความแม่นยำของการจัดการน้ำและสามารถลดความเสี่ยงโดยรวม เส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำจะต้องมีความยืดหยุ่นและสอดคล้องกับทุกสถานการณ์ปัจจุบัน [9]

ในอดีตการกำหนดเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำอาศัยวิธีการลองผิดลองถูก ซึ่งเหมาะสำหรับระบบที่ซับซ้อนน้อยโดยอิงจากการคำนวณประสิทธิภาพในอดีต อย่างไรก็ตามสำหรับการจัดการอ่างเก็บน้ำที่ซับซ้อนและมีการขยายตัวของความต้องการน้ำอย่างต่อเนื่องวิธีการเหล่านี้อาจไม่เพียงพอ [10] เพื่อแก้ไขจำกัดเหล่านี้ การค้นหาแบบวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) [11], [12] การค้นหาแบบทาบ (TA) [13], [14] การเพิ่มประสิทธิภาพที่ขับเคลื่อนด้วยลม (WDO) [15], Atom Search Technique (AST) [16], [17] และอื่นๆ อัลกอริธึมเหล่านี้เป็นการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดอย่างมีประสิทธิภาพ การเพิ่มประสิทธิภาพอ่างเก็บน้ำโดยใช้เทคนิคการค้นหาที่เหมาะสมที่สุดมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุด และสามารถช่วยให้เกิดการตัดสินใจอย่างรอบรู้เพื่อการจัดการทรัพยากรน้ำอย่างคุ้มค่าและอย่างยั่งยืน [18] การพัฒนาเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำจะช่วยปรับปรุงการจัดการอ่างเก็บน้ำได้อย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ผู้มีอำนาจตัดสินใจมีทางเลือกที่ยืดหยุ่นซึ่งสอดคล้องกับความต้องการทางวิศวกรรมสามารถอำนวยความสะดวกในการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับการกักเก็บน้ำและความท้าทายอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง แนวทางในการจัดการกับปัญหาเหตุการณ์ที่มีอิทธิพลต่อทรัพยากรน้ำยังส่งผลกระทบต่อคน สัตว์ และพืช จำเป็นต้องมีการวางแผนอย่างเป็นระบบ และต้องพิจารณาองค์ประกอบข้อมูลหลายประการ เช่น ข้อมูลทางกายภาพ ข้อมูลอุทกวิทยา และปริมาณตะกอนในพื้นที่ ตลอดจนการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและเหมาะสมกับสถานการณ์ต่าง ๆ [19], [20] ระบบ

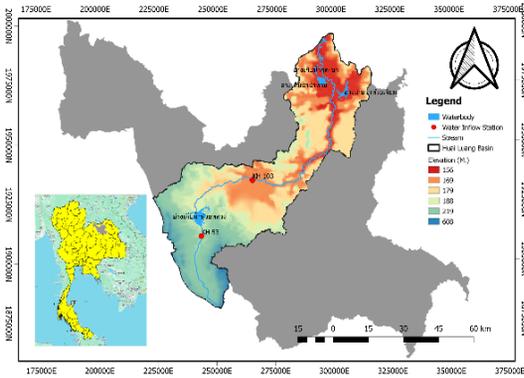
สนับสนุนการตัดสินใจในการจัดการทรัพยากรน้ำเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายประการโดยตรง เช่น ปัจจัยทางสังคม ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ปัจจัยทางเศรษฐกิจ และปัจจัยทางวิศวกรรม ตลอดจนการจัดการอ่างเก็บน้ำ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจเป็นระบบที่พัฒนาจากองค์ความรู้หลายด้าน รวมถึงองค์ความรู้ของแต่ละสาขาวิชาที่นำมาประยุกต์ใช้ การวิจัยก่อนหน้านี้เปิดเผยว่าการจัดการอ่างเก็บน้ำเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายประการ [16] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงคุณภาพในการตัดสินใจในการแก้ปัญหาการจัดการทรัพยากรน้ำ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำเพื่อสนับสนุนระบบการตัดสินใจสำหรับการจัดการอ่างเก็บน้ำเดียวโดยการตัดสินใจเลือกตามสถานการณ์ที่แตกต่างกันโดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) และการเพิ่มประสิทธิภาพที่ขับเคลื่อนด้วยลม (WDO) เชื่อมโยงกับแบบจำลองอ่างเก็บน้ำ สำหรับเกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน (SOR)

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 พื้นที่ศึกษา

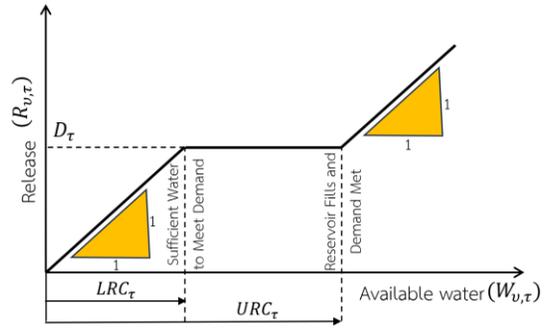
แบบจำลองที่นำเสนอจะถูกนำไปใช้กับอ่างเก็บน้ำห้วยหลวง ตำบลโคกสะอาด อำเภอเมืองอุดรธานี จังหวัดอุดรธานี ซึ่งตั้งอยู่ที่พิกัด 48 QTE455222 ระวาง 5543 IV เส้นละติจูดที่ 17.3 N ลองติจูด 102.4 E เป็นเขื่อนดินปิดกั้นลำห้วยหลวงและลำห้วยกระต๊อบ มีความจุ 118.362 ล้านลูกบาศก์เมตร มีพื้นที่รับน้ำรวมประมาณ 20,000 ไร่ ครอบคลุมพื้นที่การเกษตร 87,000 ไร่ ดังแสดงในรูปที่ 1 อ่างเก็บน้ำห้วยหลวงแม้จะมีจุดประสงค์เพื่อการเกษตร การประมง และอุตสาหกรรม แต่สิ่งสำคัญของอ่างเก็บน้ำห้วยหลวง คือ การจ่ายน้ำเพื่อการผลิตประปา และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเนื่องมาจากการขยายตัวของตัวเมืองและประชากร



รูปที่ 1 ลุ่มน้ำห้วยหลวง

## 2.2 แบบจำลองการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำ

การศึกษาการจำลองพฤติกรรมของระบบน้ำในลุ่มน้ำด้วยแบบจำลองการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำโดยใช้หลักการสมดุลน้ำ การสร้างแบบจำลองของระบบอ่างเก็บน้ำเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการนี้ นิยมใช้แบบจำลอง HEC-3, HEC-5 และ HEC-RAS [21], [22] การสมดุลน้ำในการศึกษานี้เป็นการสร้างแบบจำลองการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำโดยเรายึดหลักการเดียวกันกับแบบจำลองที่กล่าวมาเพื่อเพิ่มความสมบูรณ์ในการเชื่อมต่อกับ GA และ WDO แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้จะมีสามารถในการหาสถานการณ์ที่ขาดแคลนน้ำและสถานการณ์น้ำไหลล้นได้ รวมถึงความถี่ของการเกิดขึ้น ปริมาณน้ำ และช่วงเวลา โดยใช้หลักการเดียวกันกับแบบจำลองที่กล่าวมาเพื่อการวางแผนและการจัดการทรัพยากรน้ำในอนาคต เริ่มต้นการคำนวณระบบการจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำต้องสำรวจปริมาณน้ำเริ่มต้นที่อ่างเก็บน้ำสามารถรองรับได้เต็มที่ (Full capacity) เพื่อหาปริมาณที่เก็บสูงสุด จากนั้นจะคำนวณปริมาณน้ำที่ควรปล่อยระบายออกในแต่ละเดือนจะต้องเป็นไปตามเกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน (SOR) แสดงในรูปที่ 2 การกำหนดปริมาณน้ำนี้จะใช้สมการ (1) เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอในการวางแผนการจัดการน้ำ ในระบบนี้จะต้องคำนวณเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่จะปล่อยระบายในแต่ละเดือนตามที่กำหนดไว้



รูปที่ 2 เกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน

$$R_{v,t} = \begin{cases} D_{\tau} + W_{v,t} - URC_{\tau} & \text{For } W_{v,t} \geq URC_{\tau} + D_{\tau} \\ D_{\tau} & \text{For } LRC_{\tau} \leq W_{v,t} < URC_{\tau} + D_{\tau} \\ D_{\tau} + W_{v,t} - LRC_{\tau} & \text{for } LRC_{\tau} - D_{\tau} \leq W_{v,t} < LRC_{\tau} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

โดยที่

$R_{v,t}$  = ปริมาณน้ำที่ระบายออกจากอ่างเก็บน้ำ (หน่วย ล้าน ลบ.ม.) ในช่วงปี  $n$  ของเดือน  $\tau$  ( $\tau = 1$  ถึง 12 แทน เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม)

$D_{\tau}$  = ความต้องการใช้น้ำทำอ่างของเดือน  $\tau$  (หน่วย ล้าน ลบ.ม.)

$LRC_{\tau}$  = ขอบเขตล่างของเส้นโค้งควบคุมของแต่ละเดือน  $\tau$

$URC_{\tau}$  = ขอบเขตบนของเส้นโค้งควบคุมของเดือน  $\tau$

$W_{v,t}$  = ปริมาณน้ำต้นทุนที่มีอยู่ของอ่างในเดือน  $\tau$  (หน่วย ล้าน ลบ.ม.)

$$W_{v,t+1} = S_{v,t} + Q_{v,t} - R_{v,t} - E_{\tau} - DS \quad (2)$$

โดยที่

$S_{v,t}$  = ปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเมื่อสิ้นสุดเดือน  $\tau$  (หน่วย ล้าน ลบ.ม.)

$Q_{v,t}$  = ปริมาณน้ำท่ารายเดือนที่ไหลเข้าอ่างในเดือน  $\tau$  ปี  $n$  (หน่วย ล้าน ลบ.ม.)

$E_{\tau}$  = ค่าการระเหยรายเดือนเฉลี่ยเดือน  $\tau$  (หน่วย ล้าน ลบ.ม.)

$DS$  = ปริมาตรเก็บกักที่ไม่ได้ใช้การ (หน่วย ล้าน ลบ.ม.)  
 เมื่อทำการจำลองสภาพสมมูลน้ำโดยใช้แบบจำลองการ  
 เลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำที่สร้างขึ้นจนครบจำนวนปีที่มี  
 ข้อมูลแล้ว ผลการจำลองจะแบ่งออกเป็นสถานการณ์การ  
 ขาดแคลนน้ำและสถานการณ์การน้ำไหลล้น โดยจะถูก  
 บันทึกข้อมูลตามความถี่และช่วงเวลาของเหตุการณ์ต่างๆ  
 เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดต่อไป

**2.2.1 การประยุกต์วิธีเชิงพันธุกรรมกับแบบจำลอง  
 การเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำ**

การประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด  
 ด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) เพื่อค้นหาเส้นโค้งควบคุมอ่าง  
 เก็บน้ำที่เหมาะสม สามารถเรียบเรียงได้ดังนี้ ขั้นตอนที  
 หนึ่ง การเตรียมข้อมูลเริ่มต้น GA มีความต้องการ  
 รูปแบบการเข้ารหัส เพื่อปรับเปลี่ยนตัวแปรสำหรับการ  
 ตัดสินใจให้อยู่ในรูปแบบของโครโมโซม โดยปริมาณน้ำ  
 ที่เก็บกักเฉลี่ยในแต่ละเดือนของเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บ  
 น้ำจะถูกกำหนดขอบเขตบน (Upper Rule Curves)  
 และขอบเขตล่าง (Lower Rule Curves) ตามเส้นโค้ง  
 ควบคุมที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน (Existing Rule Curve)  
 ขั้นตอนที่สองจะเป็นการสร้างประชากรต้นกำเนิด  
 หลังจากการเข้ารหัสตัวแปรการตัดสินใจเสร็จสิ้น จะมี  
 การดำเนินการทางพันธุกรรม หรือการผสมพันธุ์ โดย  
 ประกอบด้วย การคัดเลือกโครโมโซมที่มีความเหมาะสม  
 สูงสุดจากประชากรต้นกำเนิดเพื่อนำมาใช้ในกรรมวิธี  
 ต่อไป การข้ามสายพันธุ์จะทำการผสมพันธุ์ระหว่าง  
 โครโมโซมสองตัวเพื่อสร้างโครโมโซมลูกใหม่ การกลาย  
 พันธุ์จะทำการเปลี่ยนแปลงบางส่วนของโครโมโซมใน  
 ระดับย่อยเพื่อสร้างความหลากหลายในประชากร  
 ขั้นตอนที่สาม การคำนวณปริมาณการปล่อยน้ำหลังจาก  
 ประชากรต้นกำเนิดได้ถูกสร้างขึ้นแล้ว ปริมาณน้ำที่ถูก  
 ปล่อยจะถูกคำนวณโดยใช้เส้นโค้งควบคุมใหม่ที่ได้จาก

โครโมโซมที่ถูกเลือก โดยใช้วิธีการแบบจำลองเลียนแบบ  
 สถานการณ์ ขั้นตอนที่สอง การคำนวณค่าความเหมาะสม  
 (fitness) ปริมาณน้ำที่ถูกปล่อยจะถูกนำไปใช้เพื่อ  
 คำนวณค่าความเหมาะสมของโครโมโซมที่เลือกใน  
 ขั้นตอนการคัดเลือก ค่าความเหมาะสมนี้จะใช้ใน  
 กระบวนการคัดเลือกต่อไปเพื่อสร้างประชากรในรุ่น  
 ถัดไปของ GA ขั้นตอนที่สุดท้ายเป็นกระบวนการทาง  
 พันธุกรรมที่ประกอบด้วย การคัดเลือก การข้ามสาย  
 พันธุ์ และการกลายพันธุ์ จะดำเนินการสร้างโค้งควบคุม  
 ขึ้นมาใหม่ในรุ่นถัดไป โดยขั้นตอนนี้จะมีการกระทำซ้ำ  
 จนกระทั่งได้เส้นโค้งควบคุมจำนวน 24 ค่าที่เหมาะสม  
 ที่สุด ดูตัวอย่างการทำงานในรูปที่ 3 โดยมีสมการ  
 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ที่ใช้ในการ  
 ค้นหาค่าตอบเส้นโค้งควบคุมที่เหมาะสม คือ ปริมาณน้ำ  
 ขาดแคลนเฉลี่ยน้อยที่สุด ดังแสดงในสมการ (3)

$$Min_{(avr)} = \frac{1}{n} \sum_{v=1}^n Sh_v \tag{3}$$

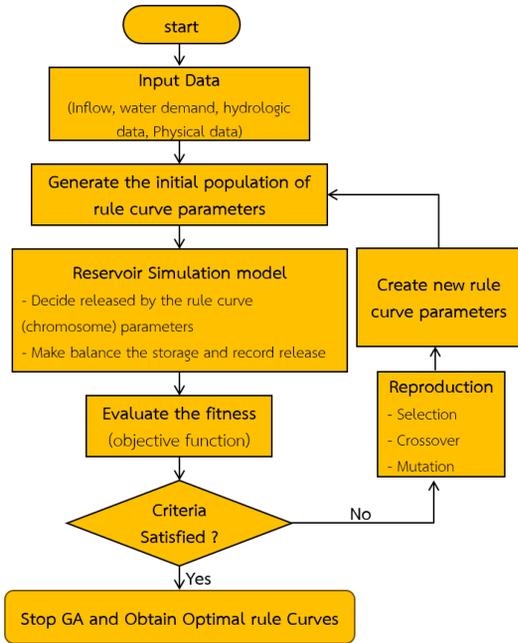
โดยที่

$n$  = ความยาวของชุดข้อมูลปริมาณน้ำต้นทุน  
 $Sh_v$  = ปริมาณน้ำที่ขาดในปี  $v$  (ปริมาณน้ำที่ปล่อยย  
 น้อยกว่าเป้าหมายความต้องการใช้น้ำ) กรณีความถี่ของ  
 การขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดจะเปลี่ยนฟังก์ชัน  
 วัตถุประสงค์ในการค้นหาค่าตอบเป็นความถี่ของการ  
 ขาดแคลนดังสมการ (4)

$$\frac{Y_n}{\sum Y_{in}} \tag{4}$$

โดยที่

$Y_n$  = จำนวนปีที่ขาดแคลนนํ้า  
 $\sum Y_{in}$  = จำนวนปีของข้อมูลปริมาณน้ำทั้งหมด

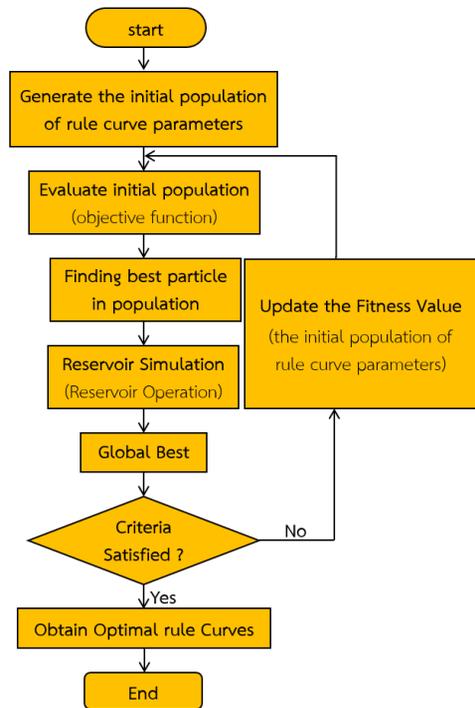


รูปที่ 3 การประยุกต์ใช้วิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับการค้นหาเส้นโค้งควบคุมที่เหมาะสมที่สุด

### 2.2.2 การประยุกต์ใช้วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพที่ขับเคลื่อนด้วยลมกับแบบจำลองการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำ

การคำนวณหาค่าเส้นโค้งควบคุมในแบบจำลองการเพิ่มประสิทธิภาพที่ขับเคลื่อนด้วยลม (WDO) กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการทำงานและจำนวนรอบการทำงานที่ต้องการ สร้างประชากรเริ่มต้นโดยการสร้างเซตของคำตอบเริ่มต้น เลือกค่าเส้นโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำแต่ละเดือนทั้ง 12 เดือน (รวม 24 ค่า) เป็นเส้นโค้งควบคุมเริ่มต้น จากนั้นเป็นการปรับปรุงประชากรด้วยการสร้างเซตของคำตอบใกล้เคียงที่เป็นไปได้ โดยการเลือกเซตคำตอบใกล้เคียงที่ดีที่สุดตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ทำการตรวจสอบเงื่อนไขการพิจารณา (Aspiration Criteria) ตรวจสอบเงื่อนไขสำหรับพิจารณาเซตของคำตอบข้างเคียง ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด (Stopping Criteria) หากผลลัพธ์ที่ได้ไม่เป็นไปตามตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ กระบวนการนี้จะ

ทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ผลลัพธ์ที่ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดและได้ค่าเส้นโค้งควบคุมที่เหมาะสมที่สุด และจะนำค่าเส้นโค้งควบคุมที่ได้มาใช้ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation Simulation) คำนวณปริมาณน้ำตามความต้องการของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการค้นหาคำตอบแต่ละรอบการทำงาน การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นการใช้ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดและค่าเฉลี่ยของน้ำไหลล้นน้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันหลักในการค้นหาคำตอบ โดยคำตอบจะถูกค้นหาในกรณีที่มีการใช้นํ้าปกติและกรณีที่มีความต้องการใช้นํ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะแสดงดังสมการ (3) การทำงานของเทคนิคนี้จะเป็นแบบวนซ้ำจนกว่าจะประสบความสำเร็จตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ และจะสิ้นสุดเมื่อครบรอบที่กำหนด ซึ่งจะได้รับค่าเส้นโค้งควบคุมที่เหมาะสมที่สุดในที่สุด ดูตัวอย่างการทำงานในรูปที่ 4



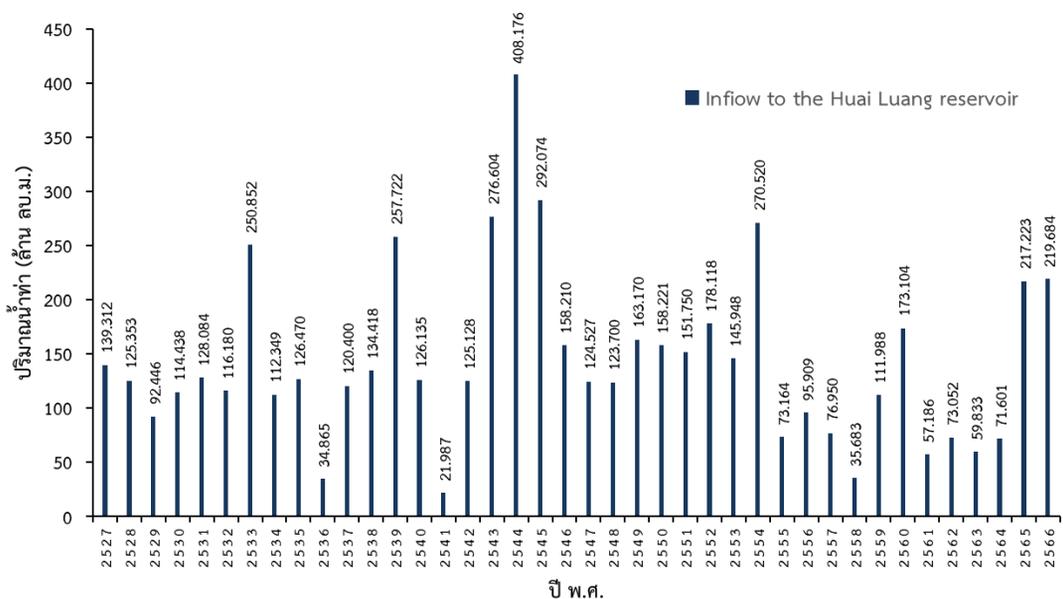
รูปที่ 4 การประยุกต์ใช้การเพิ่มประสิทธิภาพที่ขับเคลื่อนด้วยลมสำหรับการค้นหากฎโค้งควบคุมที่เหมาะสมที่สุด

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง เทคนิคการค้นหาแบบ GA และ WDO จะดำเนินการ โดยใช้ค่าเส้นโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้สามารถปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในระยะยาวได้ ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินจะได้อาจจากการสังเคราะห์ จำลองสถานการณ์ 1,000 ชุดเหตุการณ์ จากข้อมูล ปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำในระยะเวลา 40 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2527–2566 แสดงในรูปที่ 5 การประเมิน จะครอบคลุมเหตุการณ์ที่คาดการณ์ว่าจะเกิดขึ้นทั้งหมด รวมถึงเหตุการณ์ในอดีตที่เคยเกิดขึ้นแล้ว เพื่อศึกษา พฤติกรรมของระบบจากเกณฑ์ของการจัดการและ ควบคุม จากนั้นจะคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องปล่อยในแต่ละ เดือนตามเส้นโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำ และจะนำ ผลลัพธ์มาแสดงเป็นสถานการณ์ขาดแคลนน้ำและน้ำ ไหลล้นอ่างเก็บน้ำ รวมถึงความถี่ของเหตุการณ์ ปริมาณ และช่วงเวลาที่เกิดขึ้น

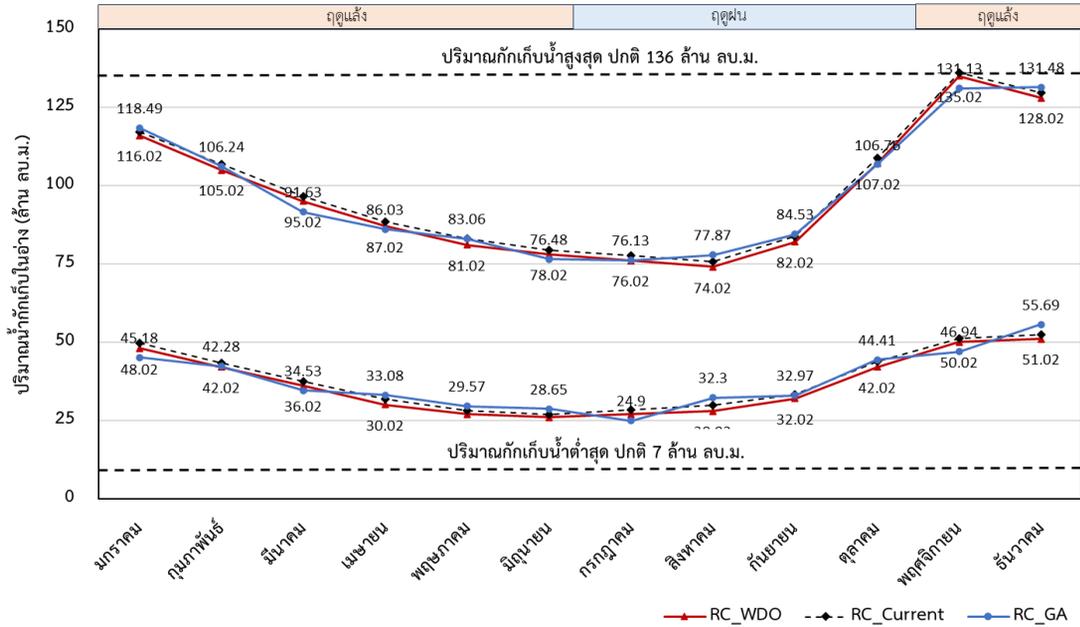
### 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลจากการสร้างเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำจาก แบบจำลองการเลียนแบบรวมกับการค้นหาด้วย GA และ WDO ถูกนำมาเปรียบเทียบกับเส้นโค้งควบคุมที่ใช้ใน

ปัจจุบัน (Current) โดยใช้ข้อมูลปริมาณความต้องการใช้น้ำแบบรายเดือนซึ่งเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำที่ได้จะใช้ สำหรับกรณีที่สถานการณ์น้ำปกติทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 6 จากภาพจะเห็นได้ว่าเส้นโค้งควบคุมใหม่ตามฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ที่ได้จากการค้นหาด้วย GA และ WDO มี แนวโน้มไม่ไปในทิศทางเดียวกันแต่มีหลายจุดที่ได้ค่าแตกต่างกัน ในเดือนกรกฎาคม เส้นโค้งควบคุมจากแบบจำลอง WDO จะเป็นการพร่องน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำที่คล้ายคลึงกัน ในช่วงฤดูฝนของเส้นโค้งควบคุมที่ได้จากการค้นหาด้วย GA จะเป็นการพร่องน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำน้ำมากที่สุดในเดือนสิงหาคมซึ่งจะคล้ายคลึงกับเส้นโค้งควบคุมปัจจุบัน เพื่อให้ทำให้อ่างเก็บน้ำมีปริมาตรเพียงพอที่จะรับน้ำฝน หรือรองรับปริมาณน้ำท่าเพื่อป้องกันการเกิดน้ำไหลล้นอ่างได้ ช่วงฤดูแล้งตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมิถุนายนเส้น โค้งควบคุมทั้งสามมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะเป็นการลดการปล่อยน้ำออกจากอ่าง เพื่อกักเก็บน้ำในอ่างไว้ใช้ตามวัตถุประสงค์ ส่งผลให้มีน้ำเหลืออยู่ในอ่างเก็บน้ำ มากขึ้น ช่วยลดการขาดแคลนน้ำในช่วงหน้าแล้งได้ดี และ เส้นโค้งควบคุมทั้งสามจะค่อยๆ สูงขึ้นในเดือนกันยายนถึง เดือนพฤศจิกายน ซึ่งทำให้การกักเก็บน้ำไว้ได้มากขึ้นและเป็นช่วงสิ้นสุดฤดูการเพาะปลูกในหลายพื้นที่



รูปที่ 5 ข้อมูลน้ำท่าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2527–2566



รูปที่ 6 Optimal rule curves of the Huai Luang reservoir

ตารางที่ 1 ผลประเมินเส้นโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำ จากข้อมูลปริมาณน้ำทำในอดีตย้อนหลัง จำนวน 40 ปี

Rule curves	Frequency (Time/year)	Volume (MCM/year)		Time period (year)	
		Average	Maximum	Average	Maximum
<b>Shortage</b>					
RC_Current	0.08	0.40	7.00	1.50	2.00
RC_GA	0.08	0.26	5.00	1.50	2.00
RC_WDO	0.08	0.37	6.00	1.50	2.00
<b>Overflow</b>					
RC_Current	0.87	92.67	356.24	8.25	16.00
RC_GA	0.87	92.27	358.51	8.25	16.00
RC_WDO	0.87	92.31	356.03	8.25	16.00

ตารางที่ 2 ผลประเมินเส้นโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำ จากข้อมูลการสังเคราะห์เหตุการณ์ จำนวน 1,000 ชุดเหตุการณ์

Rule curves	Frequency (Time/year)	Volume (MCM/year)		Time period (year)	
		Average	Maximum	Average	Maximum
<b>Shortage</b>					
RC_Current	$\mu$	0.00	0.00	0.03	0.03
	$\sigma$	0.01	0.03	0.20	0.20
RC_GA	$\mu$	0.00	0.00	0.02	0.03
	$\sigma$	0.01	0.02	0.21	0.21
RC_WDO	$\mu$	0.00	0.00	0.03	0.03

Rule curves		Frequency	Volume (MCM/year)		Time period (year)	
		(Time/year)	Average	Maximum	Average	Maximum
	$\sigma$	0.01	0.03	0.75	0.19	0.20
Overflow						
RC_Current	$\mu$	0.99	91.71	285.16	30.03	33.88
	$\sigma$	0.02	11.06	63.12	10.08	6.59
RC_GA	$\mu$	0.99	91.33	285.86	30.43	33.67
	$\sigma$	0.02	11.07	63.45	10.20	6.74
RC_WDO	$\mu$	0.99	91.34	285.55	31.77	34.03
	$\sigma$	0.02	11.06	63.13	9.96	6.50

$\mu$  = ค่าเฉลี่ย,  $\sigma$  = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตารางที่ 1 พบว่าผลลัพธ์สถานการณ์ขาดแคลนน้ำของเส้นโค้งควบคุมทั้ง 3 มีค่าความถี่เท่ากัน คือ 0.08 ครั้ง/ปี ปริมาณการขาดแคลนน้ำเฉลี่ย พบว่าการค้นหาด้วย GA และ WDO สามารถลดปริมาณการขาดแคลนน้ำได้ดีว่าเส้นโค้งควบคุมปัจจุบัน คือ 0.26 0.37 และ 0.4 ล้าน ลบ.ม./ปี ตามลำดับ และเส้นโค้งควบคุมทั้ง 3 มีช่วงเวลาการเกิดการขาดแคลนน้ำเฉลี่ยเท่ากัน คือ 1.50 ปี ผลลัพธ์สถานการณ์น้ำไหลล้น มีค่าความถี่ของน้ำไหลล้นอ่างเท่ากันทั้ง 3 เส้นโค้งควบคุม คือ 0.87 ครั้ง/ปี ปริมาณน้ำไหลล้นพบว่าเส้นโค้งควบคุมที่ได้จากการค้นหาด้วย GA และ WDO สามารถลดปริมาณน้ำไหลล้นได้ดีว่าเส้นโค้งควบคุมปัจจุบัน คือ 92.27 92.31 และ 92.67 ล้าน ลบ.ม./ปี ตามลำดับ และเส้นโค้งควบคุมทั้ง 3 มีช่วงเวลาการเกิดน้ำไหลล้นเฉลี่ยเท่ากัน คือ 8.25 ปี จากผลลัพธ์เหล่านี้สามารถอธิบายได้ว่าเส้นโค้งควบคุมที่ได้จากการค้นหาด้วย GA และ WDO ให้ประสิทธิภาพดีกว่าเส้นโค้งควบคุมปัจจุบันเล็กน้อย โดยการค้นหาด้วย GA ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเหมาะสมกับสถานการณ์น้ำปกติ

จากตารางที่ 2 ผลลัพธ์จากการประเมินประสิทธิภาพของเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำทั้ง 3 จากข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการค้นหาด้วย GA และ

WDO เปรียบเทียบกับเส้นโค้งควบคุมปัจจุบัน จากการสังเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำในอดีต ตั้งแต่ พ.ศ. 2527-2566 มาจำลองสถานการณ์ 1,000 ชุดเหตุการณ์ พบว่าผลลัพธ์ของเส้นโค้งควบคุมทั้ง 3 ไม่เกิดสถานการณ์ขาดแคลนน้ำ มีช่วงเวลาการเกิดการขาดแคลนน้ำเฉลี่ยโดยเส้นโค้งควบคุมจากการค้นหาด้วย GA และ WDO ให้ประสิทธิภาพดีกว่าเส้นโค้งควบคุมปัจจุบันเล็กน้อย คือ 0.02 0.03 และ 0.03 ปี ตามลำดับ ผลลัพธ์ของสถานการณ์น้ำไหลล้นอ่างของเส้นโค้งควบคุมทั้ง 3 พบว่ามีค่าความถี่เท่ากัน คือ 0.99 ครั้ง/ปี ปริมาณน้ำไหลล้นพบว่ากฎโค้งควบคุมที่ได้จากการค้นหาด้วย GA และ WDO สามารถลดปริมาณน้ำไหลล้นได้ดีว่าเส้นโค้งควบคุมปัจจุบัน คือ 91.33 91.34 และ 91.71 ล้าน ลบ.ม./ปี ตามลำดับ ช่วงเวลาการเกิดน้ำไหลล้นเฉลี่ย พบว่าเส้นโค้งควบคุมจากการค้นหาด้วย GA และ WDO สามารถช่วงเวลาการเกิดน้ำไหลล้นเฉลี่ยได้ดีกว่าเส้นโค้งควบคุมปัจจุบัน คือ 31.43 30.77 และ 31.03 ปี ตามลำดับ จากผลการประสิทธิภาพของเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำทั้ง 3 พบว่าเส้นโค้งควบคุมจากการค้นหาด้วย GA และ WDO ให้ประสิทธิภาพดีกว่าเส้นโค้งควบคุมปัจจุบันเล็กน้อย โดยการค้นหาด้วย GA ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเหมาะสมกับสถานการณ์น้ำปกติ

#### 4. สรุป

การประยุกต์ใช้เทคนิคการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสร้างเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำห้วยหลวงจากแบบจำลองการเลียนแบบร่วมกับการค้นหาด้วย GA และ WDO โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 กรณี คือ ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ความถี่ของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด และค่าเฉลี่ยของน้ำไหลล้นน้อยที่สุด พบว่าเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำมีหลายจุดที่ได้ค่าแตกต่างกันแต่มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน และผลประเมินสถานการณ์ขาดแคลนนํ้า พบว่าเส้นโค้งควบคุมที่ได้จากการค้นหาด้วย GA และ WDO ให้ประสิทธิภาพดีกว่าเส้นโค้งควบคุมปัจจุบันเล็กน้อย โดยการค้นหาด้วย GA ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเหมาะสมกับสถานการณ์น้ำปกติ นอกจากนี้เส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำที่ได้การค้นหาด้วย GA และ WDO ถูกนำมาเปรียบเทียบกับเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำที่ใช้ในปัจจุบัน โดยการสังเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำในอดีต ตั้งแต่ พ.ศ. 2527-2566 มาจำลองสถานการณ์ 1,000 ชุดเหตุการณ์ พบว่าเส้นโค้งควบคุมใหม่ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากการค้นหาด้วย GA และ WDO มีหลายจุดที่ได้ค่าแตกต่างกันแต่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ในช่วงฤดูฝนของเส้นโค้งควบคุมจากการค้นหาด้วย GA จะพร่องน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำมากที่สุดในเดือนกรกฎาคม แต่เส้นโค้งควบคุมจากแบบจำลอง WDO จะพร่องน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำมากที่สุดในเดือนสิงหาคมซึ่งจะคล้ายคลึงกับเส้นโค้งควบคุมปัจจุบัน ทำให้อ่างเก็บน้ำสามารถรองรับปริมาณน้ำท่าและป้องกันการเกิดน้ำไหลล้นอ่างเก็บน้ำ ช่วงฤดูแล้งตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมิถุนายนเส้นโค้งควบคุมทั้งสามมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เพื่อลดการปล่อยน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำ ส่งผลให้มีปริมาณน้ำเหลืออยู่ในอ่างเก็บน้ำมากพอที่จะใช้ตามวัตถุประสงค์ สามารถช่วยลดการขาดแคลนนํ้าในช่วงหน้าแล้งได้ดี และในเดือนกันยายนถึงเดือนพฤศจิกายนเส้นโค้งควบคุมทั้งสามจะค่อยๆ สูงขึ้น ซึ่งทำให้การกัก

เก็บน้ำได้มากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการใช้นํ้า จากผลการประเมินประสิทธิภาพของเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำทั้ง 3 แบบ พบว่าเส้นโค้งควบคุมจากการค้นหาด้วย GA และ WDO ให้ประสิทธิภาพดีกว่าเส้นโค้งควบคุมปัจจุบันเล็กน้อย โดยการค้นหาด้วย GA ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเหมาะสมกับสถานการณ์น้ำปกติ เส้นโค้งควบคุมจากการค้นหาด้วย GA และ WDO สามารถนำมาบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำห้วยหลวง เพื่อให้สามารถจัดสรรน้ำให้เพียงพอต่อความต้องการใช้นํ้าที่เพิ่มขึ้น ทั้งในภาคอุปโภค-บริโภคและภาคอุตสาหกรรม ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นจากการขยายตัวของเมืองและประชากร เพื่อพัฒนาแผนการจัดการน้ำที่เหมาะสมยิ่งขึ้น ควรมีระบบเชื่อมต่อเพื่อแจ้งหน่วยงานที่รับผิดชอบให้ดำเนินการแก้ไขสถานการณ์เหล่านี้ อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพในอนาคต

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่ให้การสนับสนุนทุนต่างๆ ในการใช้ในการวิจัยครั้งนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Kangrang, H. Prasanchum, R. Hormwichian, R. Techarungruengsakul, R. Ngamsert, N. Phookinghin and J. Wangthken, "Improvement of water management project by correcting irrigation water requirement in farmer participation and optimization," *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, vol. 25, no. 5, pp. 852-863, 2019.
- [2] Z. Unnisa, A. Govind, B. Lasserre and M. Marchetti, "Water Balance Trends along Climatic Variations in the Mediterranean Basin over the Past Decades," *Water*, vol. 15, no. 10, May. 2023.

- [3] S.K. Ahmad, and F. Hossain, "A web-based decision support system for smart dam operations using weather forecasts," *Journal of Hydroinformatics*, vol. 21, no. 5, pp. 687-707, 2019.
- [4] J. M. B. dos Santos Amorim, S. D. T. M. Bezerra, M. M. Silva and L. C. O. de Sousa, "Multicriteria decision support for selection of alternatives directed to integrated urban water management," *Water Resources Management*, vol. 34, pp. 4253-4269, 2020.
- [5] T. Kojiri, T. Hamaguchi and M. Ode, "Assessment of global warming impacts on water resources and ecology of a river basin in Japan," *Journal of Hydro-environment Research*, vol. 1, no. 3-4, pp. 164-175, Apr. 2008.
- [6] Y. Guo, S. Huang, Q. Huang, H. Wang, W. Fang, Y. Yang and L. Wang, "Assessing socioeconomic drought based on an improved Multivariate Standardized Reliability and Resilience Index," *Journal of Hydrology*, vol. 568, pp. 904-918, Jan. 2019.
- [7] G. Zhao, H. Gao, B.S. Naz, S.C. Kao and N. Voisin, "Integrating a reservoir regulation scheme into a spatially distributed hydrological model," *Advances in Water Resources*, vol. 98, pp. 16-31, Dec. 2016.
- [8] M. Daus, K. Koberger, K. Koca, F. Beckers, J. E. Fernández, B. Weisbrod, D. Dietrich, S. U. Gerbersdorf, R. Glaser, S. Haun, H. Hofmann, D. Martin-Creuzburg, F. Peeters and S. Wieprecht, "Interdisciplinary reservoir management— a tool for sustainable water resources management," *Sustainability*, vol. 13, no. 8, pp. 4498, Apr. 2021.
- [9] P. Mensik and D. Marton, "Hybrid optimization method for strategic control of water withdrawal from water reservoir with using support vector machines," *Procedia Engineering*, vol. 186, pp. 491-498, 2017.
- [10] C. Chaleeraktragoon and A. Worawiwat, "Dynamic rule curves for multipurpose reservoir operation for different floods," *Journal of Water and Climate Change*, vol. 11, no. 4, Dec. 2020.
- [11] T.A. Ngoc, K. Hiramatsu and M. Harada, "Optimizing the rule curves of multi-use reservoir operation using a genetic algorithm with a penalty strategy," *Paddy and Water environment*, vol. 12, pp. 125-137, Mar. 2014.
- [12] A. Tayebian, T. A. M. Ali, A. H. Ghazali and M. A. Malek, "Optimization of exclusive release policies for hydropower reservoir operation by using genetic algorithm," *Water Resources Management*, vol. 30, pp. 1203-1216, Jan. 2016.
- [13] T. Thongwan, A. Kangrang and H. Prasanchum, "Multi-objective future rule curves using conditional tabu search algorithm and conditional genetic algorithm for reservoir operation," *Heliyon*, vol. 5, no. 9, Sep. 2019.

- [14] N. Bhumiphan, "Improvement of Optimal Reservoir Operation Rule Curve by Tabu Search: A Case Study of Huai Luang," *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 31, on. 3, pp. 461-470, Jul.-Sep. 2021.
- [15] A. Kangrang, R. Techarungruengsakul, R. Hormwichian and O. Sriwanpheng, "Alternative approach of wind driven optimization for flood control rule curves," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 14, no. 16, pp. 8026-8033, 2019.
- [16] S. Kosasaeng, N. Yamoat, S.M. Ashrafi and A. Kangrang, "Extracting Optimal Operation Rule Curves of Multi- Reservoir System Using Atom Search Optimization, Genetic Programming and Wind Driven Optimization," *Sustainability*, vol. 14, no. 23, Dec. 2022.
- [17] N. Bhumiphan, B. Boribum, C. Phukapak and S. Kosasaeng, "Improvement of Optimal Reservoir Rule Curve by Atom Search Technique: A Case Study of Huai Luang Reservoir," *Journal of Science and Technology, Rajabhat Maha Sarakham University*, vol. 6, no. 1, pp. 31-44, Jan.-Apr. 2023.
- [18] A. Dinar, A. Tieu and H. Huynh, "Water scarcity impacts on global food production," *Global Food Security*, vol. 23, pp. 212-226, 2019.
- [19] A. Phumiphan and A. Kangrang, "Development of decision-making support tools for future reservoir management under climate and land cover variability: A case study," *International Review of Civil Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 271-283, 2021.
- [20] A.A. Zamani, H.R. Abbasi, V. Alipour, M. Peyravi, P. Shojaei, A. Goli and L. Mohammadinia, "Alternative water resources selection to supply drinking water in flood disasters by multicriteria decision- making techniques ( DANP and VIKOR)," *Journal of Environmental and Public Health*, vol. 2022, no. 1, Jun. 2022.
- [21] L.B. Rodriguez, P.A. Cello, C.A. Vionnet and D. Goodrich, "Fully conservative coupling of HEC-RAS with MODFLOW to simulate stream-aquifer interactions in a drainage basin," *Journal of Hydrology*, vol. 353, no. 1, pp. 129-142, May. 2008.
- [22] N. Kaewthong, P. Ditthakit, S. Nakrod and C. Buathongkhue, "The Application of HEC-HMS and HEC-RAS Mathematical Models for Study of Flood Mitigation in Cha-Uat, Nakhon Si Thammarat," *Journal of Science & Technology MSU*, vol. 39, no. 3, pp. 264-272, Sep. 2020.

## จลนศาสตร์การดูดซับสารหนูของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกกล้วย

นำพร ปัญญาใหญ่<sup>1</sup> ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย<sup>1</sup> จิระพล กลิ่นบุญ<sup>2</sup> และ ทิพาพร คำแดง<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

<sup>2</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

<sup>1</sup>63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

<sup>2</sup> ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

---

รับบทความ 18 มิถุนายน 2567 แก้ไขบทความ 5 เมษายน 2568 ตอรับบทความ 6 มิถุนายน 2568

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกกล้วยด้วย กระบวนไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบการดูดซับ นำถ่านชีวภาพจากเปลือกกล้วยไปอบในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทดสอบการดูดซับ โดยใช้สารละลายสารหนู 50 มิลลิลิตร ผสมกับถ่านชีวภาพ 10 กรัม และเขย่าสารละลายกับถ่านชีวภาพเป็นเวลา 0.5 1 2 4 6 12 และ 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที จากผลการทดสอบพบว่า ถ่านชีวภาพจากเปลือกกล้วยที่ อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 องศาเซลเซียส เวลาเขย่าที่ 24 ชั่วโมงมีค่าการดูดซับสารหนูสูงสุดที่ 34.57 เปอร์เซ็นต์ ที่ อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส เวลาเขย่าที่ 24 ชั่วโมงมีค่าการดูดซับสารหนูสูงสุดที่ 30.77 เปอร์เซ็นต์ และที่ อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส เวลาเขย่าที่ 12 ชั่วโมงมีค่าการดูดซับสารหนูสูงสุดที่ 98.71 เปอร์เซ็นต์ จลนศาสตร์การดูดซับสารหนูของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกกล้วย ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order) และมีปริมาณการดูดซับของ สารหนู ณ สมดุล เท่ากับ 98.04 78.12 และ 238.10 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** การดูดซับ; ถ่านชีวภาพ; โลหะหนัก; สารหนู

# Arsenic Adsorption Kinetics of Biochar Derived from Longan Peel

Numpon Panyoyai<sup>1</sup> Thanasit Wongsiriamnuay<sup>1</sup> Jirapol Klinbun<sup>2</sup> and  
Tipapon Khamdaeng<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University

<sup>2</sup>Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

<sup>1</sup>63 Moo 4, Nong Han, San Sai, Chiang Mai, 50290

<sup>2</sup>2 Nang Linchi Road, Thung Maha Mek, Sathon, Bangkok 10120

---

*Received 18 June 2024; Revised 5 April 2025; Accepted 6 June 2025*

## Abstract

This research aims to study the arsenic adsorption ability and kinetics of biochar made from longan peel. The biochar made from longan peel was pyrolysed at 300 500 700 °C for 4 h and then was dehydrated in a hot air oven at 105 °C for 24 h and was put in a desiccant jar for 24 h. For the adsorption experiment, 50 ml arsenic solution was mixed with 10 g of biochar and was shaken for 0.5 1 2 4 6 12 and 24 h using speed of 200 rpm. The experimental results showed that the biochar made from longan peel at pyrolysis temperature of 300 °C and 500 °C at 24 h had the maximum adsorption value of 34.57% and 30.77%, respectively, and at pyrolysis temperature of 700 °C at 12 h had the maximum adsorption value of 98.71%. Furthermore, at pyrolysis temperature of 300 500 700 °C, the arsenic adsorption kinetics of biochar made from longan peel were consistent with the Pseudo-second order equation and the arsenic adsorption quantities at the equilibrium point were found to be equal to 98.04, 78.12 and 238.10 mg/g, respectively.

**Keywords :** Adsorption; Biochar; Heavy metal; Arsenic

## 1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีพื้นที่การเกษตรเป็นอันดับที่ 2 ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยมีพื้นที่การเกษตร 47 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งประเทศ ปัญหาดินเสื่อมในระดับรุนแรงมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้น ทำให้ผลผลิตทางการเกษตรมีปริมาณและคุณภาพอยู่ในระดับต่ำ เป็นผลจากการใช้ปุ๋ยและสารเคมีในการเกษตร นอกจากนี้ การปล่อยน้ำทิ้งปนเปื้อนสารเคมีของโรงงานอุตสาหกรรมทำให้เกิดมลพิษทางน้ำและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปนเปื้อนสารหนูซึ่งเป็นโลหะหนักที่มีอัตราการสลายตัวช้าและอาจเข้าสู่แหล่งน้ำได้ผ่านทางน้ำที่ปนเปื้อนหรือการชะล้างจากพื้นที่ที่มีการสะสมของสารหนูในดิน ทำให้สัตว์น้ำดูดซึมเข้าไปและดินบริเวณรอบข้างแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนก็มีโอกาสปนเปื้อนด้วยเช่นกัน ก่อให้เกิดการสะสมสารพิษและตกค้างในดิน [1] ทำให้ดินกลายเป็นแหล่งสะสมสารเคมีและโลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศเกิดการเสื่อมสภาพของดินและสูญเสียแร่ธาตุหรือสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช เมื่อปลูกข้าว ธัญพืช และผักจะทำให้มีการดูดซับสารพิษเข้าไปสะสมอยู่ในลำต้น [2]

โลหะหนักเป็นสารเคมีอันตรายที่มีอัตราการสลายตัวช้า ทำให้สะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นานและสารหนูก็เป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มีกพบปะปนอยู่ในสายแร่ต่าง ๆ หลายชนิด จากการสำรวจหินโดยกรมทรัพยากรธรณี พบว่าพื้นที่ราว 20-30% ของประเทศไทยมีสารหนูปะปนอยู่ตามธรรมชาติ อาจทำให้เกิดการแพร่กระจายเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร เกิดการสะสมในร่างกาย ตามมาตรฐานการปนเปื้อนสารหนูในน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (WHO) กำหนดให้มีปริมาณสารหนูไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร หากระดับสารหนูในน้ำสูงกว่ามาตรฐานนี้อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพหากได้รับสารหนูเข้าสู่ร่างกายเกินกว่ามาตรฐาน

ติดต่อกันเป็นระยะเวลาาน โดยเฉพาะเมื่อมีการบริโภคอาหารที่มีการปนเปื้อนหรือการบริโภคสัตว์และพืชที่ได้รับสารหนู

จากปัญหาดังกล่าว ประเทศไทยมีการทำการเกษตรและมีวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรเป็นจำนวนมาก จึงมีการนำวัสดุเหล่านั้นมาแปรรูปเป็นถ่านชีวภาพ (Biochar) ซึ่งมีธาตุคาร์บอนอยู่จำนวนมาก ผลิตจากชีวมวล (Biomass) เช่น เศษใบไม้ เปลือกกล้วย และชีวมวลอื่น ๆ เป็นต้น โดยนำมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) [3] ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 300-700 องศาเซลเซียส คุณสมบัติของถ่านชีวภาพจะต่างกันไปตามวัสดุที่ใช้ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส [4]-[6] ซึ่งถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติในการปรับปรุงคุณภาพของดินที่เสื่อมสภาพให้ดีขึ้น และสามารถดูดซับสารพิษ รวมถึงโลหะหนักในดินด้วย [7]-[10] จึงมีการนำถ่านชีวภาพมาช่วยแก้ไขปัญหาดินปนเปื้อน และลดปริมาณโลหะหนักที่จะไปสะสมในพืชและสัตว์ โดยถ่านชีวภาพจะทำหน้าที่ดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน ทำให้สามารถลดปริมาณโลหะหนักที่พืชจะดูดซับเข้าไปในลำต้น ช่วยในการลดความเสี่ยงจากการบริโภคพืชผักที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้ในระยะยาว อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีการศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงคุณภาพดิน แต่ยังคงขาดการศึกษาเฉพาะเจาะจงเกี่ยวกับการใช้เปลือกกล้วยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรในประเทศไทย โดยเปลือกกล้วยเป็นแหล่งที่มีคุณภาพในการผลิตถ่านชีวภาพและมีศักยภาพในการดูดซับโลหะหนัก โดยเฉพาะสารหนูที่เป็นปัญหาสำคัญในประเทศ การเลือกใช้เปลือกกล้วยเป็นวัสดุดิบในงานวิจัยนี้มีแรงผลักดันจากความเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีอยู่มากในพื้นที่จังหวัดลำพูนและเชียงใหม่ ซึ่งการใช้วัสดุดังกล่าวสามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการเผาทิ้ง และช่วยในการบริหารจัดการทรัพยากรเกษตรของประเทศไทย

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรในการดูดซับสารหนู โดยการนำถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกลำไย [10] ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส มาทดสอบ เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับสารหนูของถ่านชีวภาพ ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงความสามารถของถ่านชีวภาพในการลดการปนเปื้อนโลหะหนักในดินและเสริมสร้างองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการใช้วัสดุเหลือใช้จากการเกษตรให้เกิดประโยชน์อย่างยั่งยืน

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

วัสดุ อุปกรณ์ และรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงานและการทดลองของงานวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้

### 2.1 การผลิตถ่านชีวภาพ

เตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเตาขนาดบรรจุ 50 ลิตร [11] (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 เตาเผาถ่านชีวภาพ ขนาด 50 ลิตร

มีความสูง 500 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 380 มิลลิเมตร แกนกลางทำจากเหล็กกล้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร สูง 610 มิลลิเมตร และมีความหนา 2.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ติดตั้งฮีตเตอร์ให้ความร้อนรอบผิววนนอกของเตา และภายในเตา ขนาด 15

กิโลวัตต์ ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิที่ฮีตเตอร์แบบแทงเหล็ก เพื่อแสดงผลอุณหภูมิภายในเตา และปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับฮีตเตอร์ โดยสามารถปรับระยะเวลาในการไพโรไลซิสและปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับฮีตเตอร์รอบผิววนนอกเตาและแบบแทงเหล็กที่ติดตั้งอยู่ภายในเตาได้

วัสดุชีวมวลที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อนำไปทดสอบจลนศาสตร์การดูดซับสารหนูในงานวิจัยนี้คือเปลือกลำไย โดยมีวิธีการเตรียมและผลิตถ่านชีวภาพดังนี้คือ นำเปลือกลำไยไปลดความชื้นในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จนมีความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 10% หลังจากนั้น นำออกมาเทใส่เตาเผาถ่านชีวภาพแบบควบคุมอุณหภูมิด้วยไฟฟ้า ตั้งค่าอุณหภูมิในการไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และใช้เวลาการไพโรไลซิส 4 ชั่วโมง ทดลอง 3 ซ้ำ ปริมาณถ่านชีวภาพที่ได้แสดงดังตารางที่ 1 หลังจากนั้น ทำการบดถ่านชีวภาพให้ละเอียด แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 24 ชั่วโมง เมื่ออบเสร็จแล้วนำไปใส่โถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำออกมาใช้ในการทดลองในขั้นตอนถัดไป

ตารางที่ 1 ปริมาณถ่านชีวภาพที่ได้จากเปลือกลำไย

อุณหภูมิ (°C)	300	500	700
น้ำหนักเฉลี่ยก่อนไพโรไลซิส (kg)	6±0.01	6±0.01	6±0.11
น้ำหนักเฉลี่ยหลังไพโรไลซิส (kg)	2.4±0.2	2.1±0.12	2.0±0.3
ร้อยละน้ำหนักของถ่านชีวภาพ	40±2.51	35±1.61	33.3±2.1

ตารางที่ 1 พบว่าปริมาณถ่านชีวภาพจากเปลือกลำไยที่ผลิตได้ มีปริมาณ 33-40% และมีคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติถ่านชีวภาพที่ได้จากเปลือกกล้วย

อุณหภูมิ (°C)	300	500	700
ค่าความเป็นกรด-ต่าง (pH)	7.69±0.04	9.15±0.03	12.37±0.16
ค่าการนำไฟฟ้า (EC) (µS)	924.3±1.1	1409.7±0.6	2140±10
ค่าการดูดซับน้ำ (g/g)	106±18.4	224±3.5	222.4±5.0

จากตารางที่ 2 พบว่าคุณสมบัติที่สำคัญของถ่านชีวภาพจากเปลือกกล้วยที่ผลิตได้คือ มีค่า pH สูงขึ้นตามอุณหภูมิในการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เพิ่มการดูดซับสารหนู โดยการเกิดพันธะไอออนิกระหว่างประจุบวกและลบ

## 2.2 การทดสอบการดูดซับ

โลหะหนักที่นำมาใช้ในการทดสอบการดูดซับในงานวิจัยนี้คือ สารหนู ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาเจือจางกับ HNO<sub>3</sub> 2 เปอร์เซ็นต์ ให้เหลือความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ก่อนนำไปทดสอบการดูดซับ

### 2.2.1 ขั้นตอนการทดสอบ

จำลองสัดส่วนการใช้จริงในพื้นที่การเกษตรที่มีการปรับปรุงดิน โดยใช้สารละลายสารหนูความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ผสมกับถ่านชีวภาพปริมาณ 10 กรัม นำไปใส่เครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ใช้เวลา 0.5 1 2 4 6 12 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายมากรองด้วยกระดาษกรองที่มีรูขนาด 0.45 ไมโครเมตร และนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุหลังการดูดซับโดยใช้เครื่อง XRF รุ่น Olympus Vanta VCA (รูปที่ 2) จากนั้นคำนวณหาปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับ ตามลำดับ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ในแต่ละช่วงเวลา (0.5, 1, 2, 4, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง) บันทึกเป็นค่าเฉลี่ย



รูปที่ 2 เครื่อง XRF รุ่น Olympus Vanta VCA

### 2.2.2 การหาปริมาณการดูดซับ

ปริมาณการดูดซับสารหนูที่เวลาใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) [12]

$$q_t = \frac{(C_t - C_0) \times V}{M} \tag{1}$$

โดยที่

$q_t$  = ปริมาณการดูดซับของโลหะหนัก ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$V$  = ปริมาตรของสารละลายสารหนู (ลิตร)

$M$  = น้ำหนักของถ่านชีวภาพ (กรัม)

$C_0$  = ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายสารหนู ณ เวลาเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_t$  = ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายสารหนู ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

### 2.2.3 การหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับ

เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารหนูที่เวลาใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\% \text{removal} = \frac{(C_0 - C_t) \times 100}{C_0} \tag{2}$$

## 2.3 สมการจลนศาสตร์การดูดซับ

จลนศาสตร์การดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย มี 2 สมการคือ สมการอัตราการดูดซับ

อันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) และสมการอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order) [12]

### 2.3.1 สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order)

สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งอธิบายว่า แรงแม่เหล็กไฟฟ้าในกระบวนการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic Interaction) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t}) \tag{3}$$

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e + \left( \frac{-k_1 t}{2.303} \right) \tag{4}$$

โดยที่

$q_e$  = ปริมาณการดูดซับของโลหะหนัก ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$k_1$  = ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับหนึ่ง (ต่อนาที)

$t$  = เวลา (นาที)

### 2.3.2 สมการอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order)

สมการอัตราการดูดซับอันดับสองอธิบายว่า แรงแม่เหล็กไฟฟ้าในกระบวนการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีการแลกเปลี่ยนหรือแบ่งปันประจุอิเล็กตรอน การดูดซับจะขึ้นอยู่กับจำนวนตำแหน่งที่ว่างต่อปฏิกิริยา ซึ่งมีสมการดังนี้

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \tag{5}$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \tag{6}$$

โดยที่

$k_2$  = ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที)

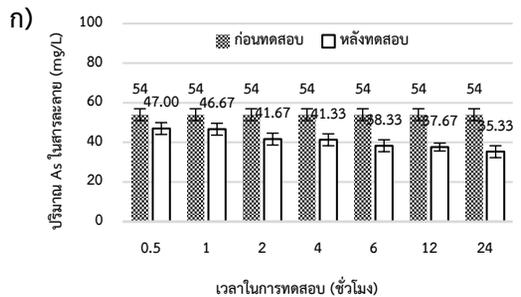
## 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

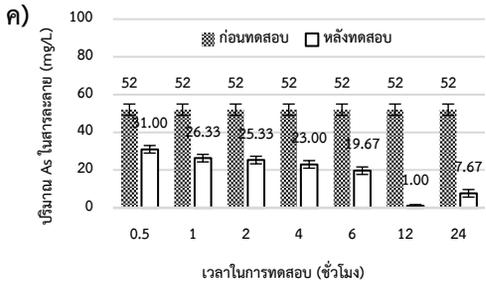
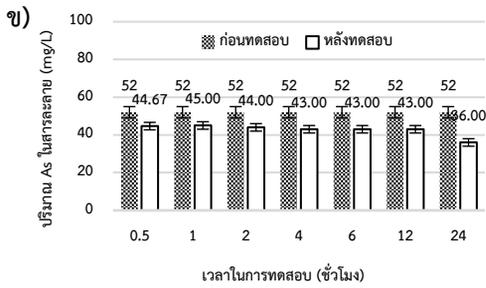
งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับโลหะหนักของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยใช้วัสดุในการผลิตถ่านชีวภาพคือ เปลือกกล้วย จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส โดยมีการนำถ่านชีวภาพมาทดสอบดูดซับในสารละลายสารหนู เพื่อคำนวณหาปริมาณการดูดซับ เปอร์เซ็นต์การดูดซับ และจลนศาสตร์การดูดซับ

### 3.1 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับ

รูปที่ 3 (ก) (ข) และ (ค) แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณสารหนูในสารละลายก่อนและหลังการดูดซับโดยใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกกล้วยที่อุณหภูมิ 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน

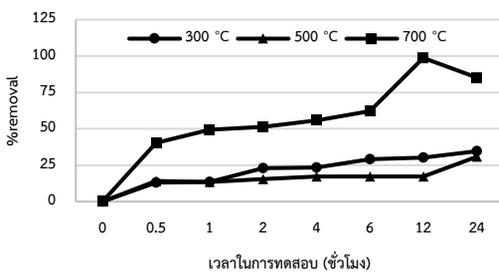
จากการทดสอบพบว่า เวลาและอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการดูดซับสารหนูคือที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส ที่เวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งมีปริมาณสารหนูเหลืออยู่ในสารละลาย  $1.00 \pm 0.67$  มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมด  $52 \pm 3$  มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากมีโครงสร้างรูพรุนเพิ่มขึ้น และพื้นที่ผิวที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารหนู ค่า pH ที่สูงขึ้น ทำให้สารหนูเปลี่ยนเป็น  $H_2AsO_3^-$  ซึ่งเป็นประจุลบ และสามารถเกิดพันธะไอออนิกกับถ่านชีวภาพที่มีประจุบวกได้ดี ส่งผลให้การดูดซับเพิ่มขึ้น [13]





รูปที่ 3 ปริมาณสารหนูในสารละลายก่อนและหลังทดสอบการดูดซับที่อุณหภูมิไพโรไลซิส (ก) 300 (ข) 500 และ (ค) 700 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับสารหนู (%removal) ที่เวลาแตกต่างกัน โดยใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกกล้วยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารหนู (%removal) ที่อุณหภูมิ 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส

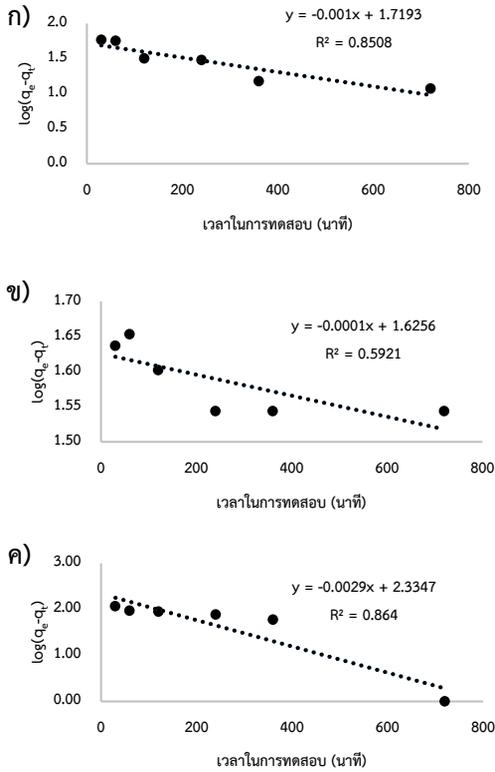
จากการทดสอบพบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทดสอบ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส

700 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทดสอบมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 300 และ 500 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 700 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เวลา 0.5 1 2 4 6 12 และ 24 ชั่วโมง เท่ากับ 40.38 49.36 51.28 55.76 62.17 98.71 และ 85.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [14] จากการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากฟางข้าวที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส ใช้ดูดซับสารละลายโลหะหนักทองแดง ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับโลหะหนักได้มากที่สุดที่ 98.7 เปอร์เซ็นต์ โดยถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีค่า pH เท่ากับ 12.37 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนนี้ [4] ส่งผลทำให้สารหนูแตกตัวเป็นประจุลบและจับกับพื้นผิวที่เป็นประจุบวกได้มากกว่า และมีโครงสร้างอะโรมาติกที่พัฒนาขึ้นดีกว่า กล่าวคือ มีโครงสร้างพื้นที่ผิวที่มากกว่าและจำนวนรูพรุนที่มากขึ้น [15] ทำให้เกิดการดูดซับได้ดีกว่า

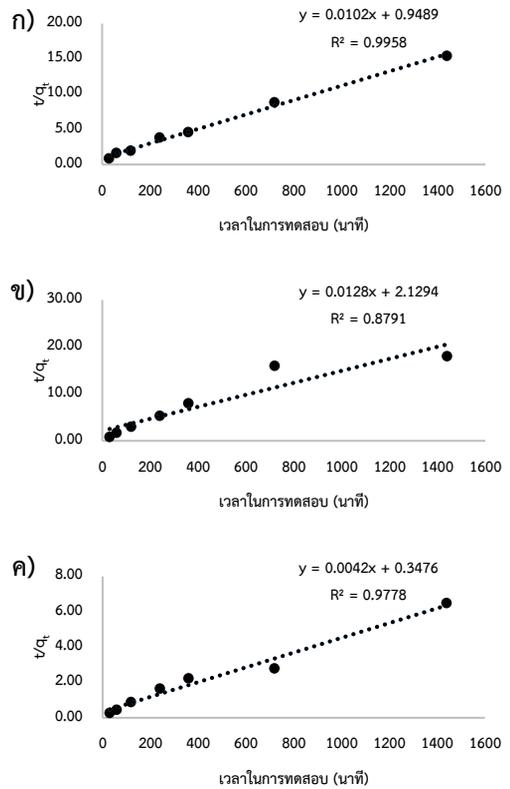
### 3.2 จลนศาสตร์การดูดซับ

รูปที่ 5 (ก) (ข) และ (ค) แสดงจลนศาสตร์การดูดซับจากสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกกล้วยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(q_e - q_t)$  และเวลา  $t$  สามารถหาค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับหนึ่ง  $k_1$  จากความชันกราฟเท่ากับ  $k_1/2.303$  และสามารถคำนวณปริมาณการดูดซับของโลหะหนัก ณ สมดุล  $q_e$  จากจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log q_e$  ได้ค่าแสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 5 จลนศาสตร์การดูดซับจากสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกกล้วยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส (ก) 300 (ข) 500 และ (ค) 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6 จลนศาสตร์การดูดซับจากสมการอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order) ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกกล้วยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส (ก) 300 (ข) 500 และ (ค) 700 องศาเซลเซียส

รูปที่ 6 (ก) (ข) และ (ค) แสดงจลนศาสตร์การดูดซับจากสมการอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order) ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกกล้วยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $t/q_t$  และเวลา  $t$  สามารถคำนวณปริมาณการดูดซับของโลหะหนัก ณ สมดุล  $q_e$  จากความชันกราฟเท่ากับ  $1/q_e$  และสามารถหาค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับสอง  $k_2$  จากจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/k_2 q_e^2$  ได้ค่าแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับหนึ่งและอันดับสองที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

Model	Temp (°C)	$k_1$ (/min)	$q_e$ (mg/g)	$R^2$
Pseudo-first Order	300	0.0023	52.40	0.851
	500	0.00023	42.23	0.592
	700	0.00668	216.12	0.864
		$k_2$ (g/mg/min)	$q_e$ (mg/g)	$R^2$
Pseudo-second Order	300	0.00011	98.04	0.996
	500	0.00008	78.12	0.879
	700	0.00005	238.10	0.978

จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ในตารางที่ 3 พบว่าค่า  $R^2$  ที่ได้จากสมการอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order) มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) ในทุกอุณหภูมิการทดสอบ ดังนั้นถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกกล้วยมีลักษณะการดูดซับแบบอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order) ซึ่งมีค่าการดูดซับที่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งสมดุล [16], [17] และเป็นประเภทการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) อธิบายได้ว่าเป็นกระบวนการดูดซับที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของถ่านชีวภาพกับสารหนู ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นคือ พันธะเคมี โดยจะมีการแชร์อิเล็กตรอนร่วมมาใช้ร่วมกันของคู่โมเลกุล (สร้างพันธะโคเวเลนต์) ทำให้การดูดซับทางเคมีไม่สามารถผันกลับได้ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณที่เฉพาะเจาะจงเท่านั้น และสารหนูจะจับที่พื้นผิวของถ่านชีวภาพแบบชั้นเดียว (Monolayer) การเกิดพันธะเคมีจะทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและที่อุณหภูมิสูงพันธะเคมีสามารถเกิดขึ้นได้ดี [13]

#### 4. สรุป

การดูดซับสารหนูด้วยถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกกล้วย ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส มีค่าแปรผันตรงกับเวลา และพบว่าที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส เหมาะสมที่สุดในการนำมาดูดซับสารหนู โดยสามารถดูดซับสารหนูได้มากที่สุดเท่ากับ 98.7 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 12 ชั่วโมง

จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกกล้วย ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นไปตามสมการอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order) อธิบายได้ว่าระหว่างตัวดูดซับกับสารละลายมีการแลกเปลี่ยนหรือแบ่งปันประจุอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถระบุได้ว่าเป็นประเภทการดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

การดูดซับสารหนูด้วยถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกกล้วยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการดูดซับสารปนเปื้อน เช่น สารหนู ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการเผาทิ้งวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหล่านี้

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (RDG6250016) และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกและสนับสนุนการวิจัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] F. A. Jan, M. Ishaq, I. Ihsanullah, and S. M. Asim, "Multivariate statistical analysis of heavy metals pollution in industrial area and its comparison with relatively less polluted area: a case study from the City of Peshawar and district Dir Lower," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 176, no. 1-3, pp. 609-16, Apr. 2010.
- [2] R. Xiao, S. Wang, R. Li, J. J. Wang, and Z. Zhang, "Soil heavy metal contamination and health risks associated with artisanal gold mining in Tongguan, Shaanxi, China," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 141, pp. 17-24, Jul. 2017.
- [3] M. I. Al-Wabel, A. Al-Omran, A. H. El-Naggar, M. Nadeem, and A. R. Usman, "Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus

- wastes," *Bioresource technology*, vol. 131, pp. 374-379, Jan. 2013.
- [4] W. Somparn, N. Panyoyai, T. Khamdaeng, N. Tippayawong, S. Tantikul, and T. Wongsiriamnuay, "Effect of process conditions on properties of biochar from agricultural residues," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 463, no. 1, pp. 012005, 2020.
- [5] M. Srisophon, T. Khamdaeng, N. Panyoyai, and T. Wongsiriamnuay, "Characterization of thermal distribution in 50-Liter biochar kiln at different heating times," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 463, no. 1, pp. 012079, 2020.
- [6] J. Zhang, J. Liu, and R. Liu, "Effects of pyrolysis temperature and heating time on biochar obtained from the pyrolysis of straw and lignosulfonate," *Bioresource Technology*, vol. 176, pp. 288-291, Jan. 2015.
- [7] Y. Liu, Y. Wang, H. Lu, L. Lonappan, S. K. Brar, L. He, J. Chen, and S. Yang., "Biochar application as a soil amendment for decreasing cadmium availability in soil and accumulation in *Brassica chinensis*," *Journal of Soils and Sediments*, vol. 18, no. 7, pp. 2511-2519, Feb. 2018.
- [8] M. Wu, B. Pan, D. Zhang, D. Xiao, H. Li, C. Wang, and P. Ning, "The sorption of organic contaminants on biochars derived from sediments with high organic carbon content," *Chemosphere*, vol. 90, no. 2, pp. 782-788, Jan. 2013.
- [9] D. Zhou, D. Liu, F. Gao, M. Li, and X. Luo, "Effects of Biochar-Derived Sewage Sludge on Heavy Metal Adsorption and Immobilization in Soils," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 14, no. 7, pp. 681, Jun. 2017.
- [10] T. Rinkam, T. Wongsiriamnuay, N. Panyoyai, N. Tippayawong, T. Khamdaeng, "Heavy metal adsorption by biochar made from longan seeds and peels," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2681, no. 1, pp. 020052, Nov. 2022.
- [11] C. Sittioad, S. Tantikul, T. Wongsiriamnuay, T. Khamdaeng, N. Tippayawong, and N. Panyoyai, "Temperature distribution and properties of biochar from a two-heating-stage kiln," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2681, no. 1, pp. 020046, Nov. 2022.
- [12] H. Jin, S. Capareda, Z. Chang, J. Gao, Y. Xu, and J. Zhang, "Biochar pyrolytically produced from municipal solid wastes for aqueous As (V) removal: adsorption property and its improvement with KOH activation," *Bioresource technology*, vol. 169, pp. 622-629, Oct. 2014.
- [13] S. Q. Hashimi, S.-H. Hong, C.-G. Lee and S.-J. Park, "Adsorption of Arsenic from Water Using Aluminum-Modified Food Waste Biochar: Optimization Using Response Surface Methodology," *Water*, vol. 14, no. 17, pp. 2712, Aug. 2022.
- [14] Y. Mei, B. Li, and S. Fan, "Biochar from Rice Straw for Cu<sup>2+</sup> Removal from Aqueous

- Solutions: Mechanism and Contribution Made by Acid-Soluble Minerals," *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 231, no. 420, Jul. 2020.
- [15] A. Shaaban, S.-M. Se, N. M. M. Mitan, and M. F. Dimin, "Characterization of Biochar Derived from Rubber Wood Sawdust through Slow Pyrolysis on Surface Porosities and Functional Groups," *Procedia Engineering*, vol. 68, pp. 365-371, 2013.
- [16] Q. Li, W. Liang, F. Liu, G. Wang, J. Wan, W. Zhang, C. Peng, and J. Yang., "Simultaneous immobilization of arsenic, lead and cadmium by magnesium-aluminum modified biochar in mining soil," *Journal of Environmental Management*, vol. 310, no. 15, pp. 114792, May. 2022.
- [17] J.-H. Park, J.-H. Lee, S.-L. Lee, S.-W. Hwang, and D.-C. Seo, "Adsorption behavior of arsenic onto lignin-based biochar decorated with zinc," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 626, pp. 127095, 2021.

# การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่

กมลพรรณ เมืองมา<sup>1</sup> จิราภรณ์ ปุณยวิวัฒน์พรกุล<sup>1</sup> และ ประจักษ์ ปุณยวิวัฒน์พรกุล<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

<sup>2</sup>คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

<sup>1</sup>180 ถนนโชตนา ตำบลศรีเหล็ก อำเภอแมริม จังหวัดเชียงใหม่ 50180

<sup>2</sup>239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

---

รับบทความ 29 สิงหาคม 2567 แก้ไขบทความ 24 เมษายน 2568 ตอรับบทความ 6 มิถุนายน 2568

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถชาร์จพลังงานได้จากทั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้าในบ้าน (AC) และระบบโซลาร์เซลล์ (DC) อุปกรณ์ต้นแบบมีลักษณะกะทัดรัดพกพาสะดวก และสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับแบบ คลื่นไซน์บริสุทธิ์ (Pure Sine Wave) รวมถึงอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น สมาร์ทโฟนและคอมพิวเตอร์พกพา ผลการศึกษาพบว่า แหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานเฉลี่ย ร้อยละ  $78.70 \pm 1.79$  สำหรับการชาร์จด้วยไฟฟ้าในบ้าน และ ร้อยละ  $77.92 \pm 2.05$  สำหรับการชาร์จผ่านระบบโซลาร์เซลล์ โดยภายใต้เงื่อนไขการใช้งานวันละประมาณ 1 กิโลวัตต์ชั่วโมง สามารถใช้งานได้ต่อเนื่องสูงสุดถึง 3 วัน ในด้านต้นทุนการใช้งาน พบว่าระบบไฮบริดแบบเคลื่อนที่มีค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำกว่าการใช้เครื่องปั่นไฟแบบใช้น้ำมันเชื้อเพลิง โดยเฉพาะเมื่อใช้งานร่วมกับแผงโซลาร์เซลล์ จะช่วยลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ผลการศึกษาจุดคุ้มทุนแสดงให้เห็นว่าการลงทุนในระบบดังกล่าวมีความคุ้มค่าสูง โดยสามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลาเพียง 9.8 ถึง 11.9 เดือน ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของการชาร์จจากระบบไฟฟ้าในบ้านและโซลาร์เซลล์ และในกรณีที่ใช้พลังงานจากโซลาร์เซลล์ 100% จะสามารถลดต้นทุนค่าไฟฟ้าได้สูงสุดถึง ประมาณ 7,998 บาทต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องปั่นไฟทั่วไป

**คำสำคัญ :** แหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่; โซลาร์เซลล์; ประสิทธิภาพ; จุดคุ้มทุน; พลังงานหมุนเวียน

---

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1288 7812, อีเมล: prajak.p@cmu.ac.th

# Development and Efficiency Evaluation of Mobile Hybrid Power Supply

Kamonpun Mungma<sup>1</sup> Jiraporn Poonyawatpornkul<sup>1</sup> and  
Prajak Poonyawatpornkul<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University

<sup>2</sup>Faculty of Science, Chiang Mai University

<sup>1</sup>180 Chotana Road, Khilek Subdistrict, Mae Rim District, Chiang Mai 50180

<sup>2</sup>239 Huay Kaew Road, Suthep Subdistrict, Mueang Chiang Mai District, Chiang Mai 50200

---

*Received 29 August 2024; Revised 24 April 2025; Accepted 6 June 2025*

## Abstract

This research focuses on the development and performance evaluation of a portable hybrid power supply, which can be charged from both household electricity (AC) and solar power systems (DC). The prototype is compact, portable, and capable of delivering electrical energy to both alternating current (AC) appliances with pure sine wave output and various electronic devices such as smartphones and laptops. The findings reveal that the hybrid power supply achieved an average energy conversion efficiency of  $78.70 \pm 1.79\%$  when charged using household electricity and  $77.92 \pm 2.05\%$  when charged via a solar power system. Under the condition of daily energy consumption of approximately 1 kilowatt-hour (kWh), the system can operate continuously for up to three days. Regarding operating costs, the hybrid system proves to be more economical than conventional fuel-based generators, particularly when integrated with solar panels. The cost of electricity production is significantly reduced. Furthermore, a cost-benefit analysis indicates that the investment in this hybrid power system is highly cost-effective, with a payback period of only 9.8 to 11.9 months, depending on the proportion of charging from household electricity and solar power. In the case of using 100% solar energy for charging, the system can reduce annual electricity costs by up to approximately 7,998 THB, compared to using a conventional gasoline generator.

**Keywords :** Mobile hybrid power station; solar cell; efficiency; break-even point; renewable energy

---

\* *Corresponding Author. Tel.: +668 1288 7812, E-mail Address: prajak.p@cmu.ac.th*

## 1. บทนำ

ในภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของโลกปัจจุบัน ซึ่งเป็นยุคที่อุปกรณ์ไอที และอุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญ ในการดำรงชีวิตประจำวัน [1] ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ต้องการ แหล่งจ่ายไฟฟ้าในการชาร์จแบตเตอรี่ เมื่อประชาชนหรือ เกษตรกรต้องไปดูแลเรือสวนไร่นา หรือไปสถานที่ที่ระบบ ส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้าเข้าไม่ถึงจำเป็นต้องใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า เพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ เกี่ยวข้องโดยตรงหรือโดยอ้อมทางการเกษตร หรือการ ติดต่อสื่อสารกับบุคคลอื่น ตลอดจนความปลอดภัยต่อชีวิต และทรัพย์สิน ดังนั้นแหล่งจ่ายไฟที่มีกำลังไฟฟ้าเหมาะสม และจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ยาวนานต่อเนื่องจึงมีความจำเป็น อย่างยิ่งในสถานที่ที่ระบบส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้าเข้าไม่ถึง [2]-[4] ผู้วิจัยเล็งเห็นความสำคัญตรงจุดนี้ จึงมีความ ประสงค์ที่จะพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่ที่สามารถ พกพาเคลื่อนย้ายได้ตามที่ผู้ใช้ต้องการ สามารถชาร์จ กระแสไฟฟ้าคืนกลับมาทั้งผ่านระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้า และโซลาร์เซลล์ อีกทั้งเก็บพลังงานสูงกว่า Power Bank ทั่วไป ประหยัดค่าใช้จ่าย และไม่ก่อมลพิษดังเช่นเครื่อง บันไฟ [5]-[8]

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อพัฒนาแหล่งจ่าย ไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ ประเมินประสิทธิภาพและ จุดคุ้มทุนของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่

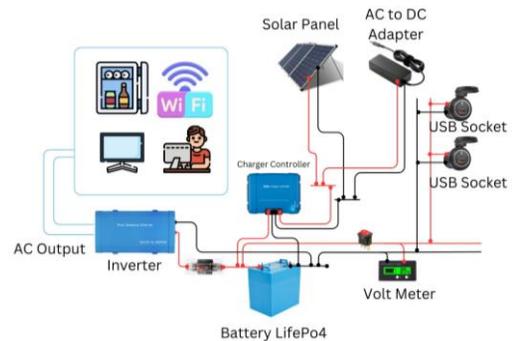
## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

การดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย การออกแบบ และสร้างต้นแบบ การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของชุด แหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ การเก็บข้อมูล การชาร์จไฟเข้า การนำไปใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้า และ การศึกษาจุดคุ้มทุน โดยรายละเอียดมีดังนี้

### 2.1 การพัฒนาแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบ เคลื่อนที่

การพัฒนาแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบ เคลื่อนที่ได้ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งเก็บและจ่ายพลังงาน

ให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยสามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้จาก แหล่งพลังงานสองแหล่ง ได้แก่ ระบบไฟฟ้าในบ้านและ โซลาร์เซลล์ อย่างไรก็ตามกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก แบตเตอรี่ต้องสามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า กระแสตรงและสลับ จึงต้องมีการเชื่อมต่อแบตเตอรี่กับ inverter เพื่อแปลงไฟฟ้า การออกแบบต้นแบบชุด แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเคลื่อนที่จึงประกอบด้วย 3 ส่วน หลัก ได้แก่ แบตเตอรี่และวงจรควบคุม ระบบชาร์จ แบตเตอรี่ และระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ เครื่องใช้ไฟฟ้า โดยแสดงวงจรดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรต้นแบบแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบ เคลื่อนที่

#### 2.1.1 แบตเตอรี่และวงจรควบคุม

แบตเตอรี่ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดลิเทียม ฟอสเฟตเนื่องจากมีความปลอดภัยสูง อายุการใช้งาน ยาวนาน และเสถียรภาพทางเคมีที่ดี [9], [10] แต่ละ เซลล์มีแรงดัน 3.2 V 120 Ah งานวิจัยนี้เลือกใช้ระบบ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ เนื่องจากสามารถรองรับการจ่าย ไฟฟ้า กระแสตรงผ่านช่อง USB-C แบบ Power Delivery (PD) ซึ่งจำเป็นต้องใช้แรงดันสูงถึง 20 โวลต์ เพื่อให้อุปกรณ์สามารถจ่ายกระแสได้เพียงพอในการ ชาร์จอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ เช่น คอมพิวเตอร์ พกพาและแท็บเล็ต ระบบแบตเตอรี่ที่ออกแบบจึงต้องมี แรงดันรวมไม่น้อยกว่า 20 โวลต์ เพื่อให้สอดคล้องกับ ข้อกำหนดของระบบ PD อีกทั้ง Inverter ที่มีจำหน่าย ทั่วไปในท้องตลาดนิยมผลิตในระบบแรงดันมาตรฐาน

ได้แก่ 12V, 24V และ 48V ดังนั้นในการออกแบบระบบต้นแบบ จึงพิจารณาเลือกใช้ระบบ 24V เพื่อความสอดคล้องกับทั้งมาตรฐานของอุปกรณ์แปลงไฟฟ้า (Inverter) และเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการคำนวณขนาดของชุดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมในการจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ สามารถคำนวณจำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่ได้จากสมการที่ (1) โดยพิจารณาจากแรงดันรวมของระบบที่ต้องการเทียบกับแรงดันของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ ซึ่งในกรณีนี้กำหนดให้ระบบมีแรงดันไฟฟ้ารวม 24 โวลต์ ( $V_{system}$ ) และแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มีแรงดัน 3.2 โวลต์ ( $V_{1-cell}$ ) ดังนั้น จำนวนเซลล์ที่ต้องใช้สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{หรือ } n = \frac{V_{system}}{V_{1-cell}} = \frac{24V}{3.2V} = 7.5 \approx 8 \quad (1)$$

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้แบตเตอรี่จำนวน 8 เซลล์ต่ออนุกรม เพื่อให้ได้ระบบแรงดันไฟฟ้ารวม 24 โวลต์ ความจุ 120 Ah ซึ่งคิดเป็นพลังงานรวม 3,072 Wh แต่ละเซลล์ถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบการจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System, BMS) ซึ่งในที่นี้เลือกใช้ บอร์ด BMS แบบสำเร็จรูปชนิด JK BMS เพื่อทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดจากการใช้งาน เช่น การดึงกระแสเกิน หรือการชาร์จเกินค่าที่กำหนด ทั้งนี้ BMS ดังกล่าวยังสามารถเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือผ่านระบบ Bluetooth เพื่อให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบพารามิเตอร์สำคัญของแบตเตอรี่ได้แบบเรียลไทม์ โดยระบบ BMS นี้ใช้เทคโนโลยี Active Balancing เพื่อปรับและควบคุมแรงดันของแต่ละเซลล์ให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่โดยรวม และเพิ่มเสถียรภาพในการจ่ายพลังงานของระบบ [11], [12]

## 2.1.2 ระบบชาร์จแบตเตอรี่

ในการศึกษานี้ต้องการชาร์จแบตเตอรี่ จากระบบการไฟฟ้าและโซลาร์เซลล์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) การชาร์จแบตเตอรี่ด้วยระบบไฟฟ้าในบ้าน ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ จึงต้องใช้ adaptor เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงสำหรับเก็บไว้ในแบตเตอรี่ โดย adaptor ที่ใช้มีขนาดแรงดัน 29.2 V จ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 20 A ได้กำลังไฟฟ้า 584 W ทำให้ในทางทฤษฎีการชาร์จจนแบตเตอรี่เต็มใช้เวลาประมาณ 5.26 ชั่วโมง (5 ชั่วโมง 9 นาที) อ้างอิงจากระบบแบตเตอรี่ที่ใช้คือ 24 V 120 Ah (3,072 Wh)

2) การชาร์จแบตเตอรี่ด้วยระบบโซลาร์เซลล์ ผ่านเครื่องควบคุมการชาร์จโซลาร์เซลล์ (solar charge controller) ที่ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์เข้าสู่แบตเตอรี่ให้คงที่ โดยแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้มีกำลัง 800 W จึงเลือกเครื่องควบคุมการชาร์จมีความแรงดัน 28.8 V และกำหนดการจ่ายกระแสไฟฟ้าไม่เกิน 30 A หรือมีกำลังไฟฟ้าประมาณ 800 W ทำให้ในทางทฤษฎีการชาร์จแบตเตอรี่จนเต็มจะใช้เวลาประมาณ 3.85 ชั่วโมง (3 ชั่วโมง 51 นาที)

## 2.1.3 ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า

แหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ที่พัฒนาขึ้นสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมา 2 ระบบ ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ ดังนี้

1. ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ออกจากแบตเตอรี่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง แหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่นี้จึงต้องมี inverter เพื่อแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยเลือกใช้ inverter ขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้า (input DC) 24 V กระแสสลับขาออก (Output AC) 220 V สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 2,000 W (เนื่องจากเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้พร้อมกันมีกำลัง

ไฟไม่เกินนี้) และต่อพ่วงกับปลั๊กตัวเมียเพื่อความสะดวกในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า

2. ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าที่ออกจากแบตเตอรี่ของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงอยู่แล้วจึงสามารถจ่ายไฟผ่านวงจร USB ได้โดยตรง ซึ่งวงจรนี้ออกแบบให้รองรับการจ่ายไฟ PD และให้กำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 65 W ผ่านช่องเสียบ USB

## 2.2 ขั้นตอนการหาประสิทธิภาพ

เมื่อพัฒนาแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่สำเร็จแล้ว คณะผู้วิจัยได้หาประสิทธิภาพดังนี้

### 2.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือในการประเมินประสิทธิภาพ

#### ประสิทธิภาพ

อุปกรณ์ และ เครื่องมือ สำหรับ ประเมินประสิทธิภาพของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ ประกอบด้วย

1. แหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่
2. แบบบันทึกค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ เวลา กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า และอุณหภูมิของระบบชาร์จแบตเตอรี่และระบบจ่ายไฟ

### 2.2.2 ขอบเขตของงานวิจัย

1. แหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ ใช้แหล่งชาร์จแบตเตอรี่จาก 2 แหล่ง คือ ระบบส่งไฟจากการไฟฟ้า (ระบบไฟบ้าน) และระบบโซลาร์เซลล์
2. เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยมีทั้งแบบใช้ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ ขณะใช้งานมีกำลังไฟฟ้ารวมไม่เกิน 2,000 W
3. กำหนดให้ขณะใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้า ไม่มีการต่อแหล่งให้พลังงานร่วมด้วย
4. เก็บข้อมูลการชาร์จแบตเตอรี่ 10 รอบชาร์จ
5. กำหนดให้ความต่างศักย์ต่ำสุดสำหรับเก็บข้อมูล คือ มีแบตเตอรี่คงเหลือ (remained battery) ร้อยละ 2

### 2.2.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลแบ่งเป็น ข้อมูลการชาร์จแบตเตอรี่ทั้งระบบไฟฟ้าในบ้านกับโซลาร์เซลล์ และการใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้มาจากมิเตอร์วัดค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้า และแอปพลิเคชันชื่อ JK-BMS ซึ่งเป็นแอปพลิเคชันสำหรับติดตามการทำงานของระบบการจัดการแบตเตอรี่ ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลมีดังนี้

1. การชาร์จแบตเตอรี่ด้วยระบบไฟฟ้าในบ้าน แต่ละรอบชาร์จบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในช่วงเวลาตั้งแต่ 17.00 น. – 23.00 น. ทำการเก็บข้อมูล 7 ครั้ง ห่างกันครั้งละ 1 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้ในเช้าวันถัดไป
2. การชาร์จแบตเตอรี่ด้วยระบบโซลาร์เซลล์ แต่ละรอบชาร์จบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในช่วงเวลากลางวันเริ่มต้นที่ 7.00 น. จนแบตเตอรี่เต็ม (แบตเตอรี่คงเหลือร้อยละ 100) ซึ่งอาจจะใช้เวลาในแต่ละรอบไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับปริมาณแสงแดดในแต่ละวัน
3. การใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ เก็บข้อมูลแต่ละวันในช่วงเวลาตั้งแต่ 8:00 – 17:00 น. แต่ละรอบห่างกัน 1 ชั่วโมง ซึ่งเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ประกอบด้วย เต้าอบ (1,000W จำนวน 1 เครื่อง) คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ (210W จำนวน 1 เครื่อง) พัดลม (45W จำนวน 2 เครื่อง) และคอมพิวเตอร์พกพา (40W จำนวน 2 เครื่อง) เมื่อใช้งานพร้อมกันมีกำลังไฟฟ้ารวมเท่ากับ 1,380 W
4. การใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งประกอบไปด้วย MacBook Air (30 W จำนวน 1 เครื่อง) iPad Pro (27W จำนวน 3 เครื่อง) iPhone 13 และ 13 Pro (20W จำนวน 2 เครื่อง) Apple Watch (5W จำนวน 2 เครื่อง) Xiaomi Pad 5 Pro (67W จำนวน 1 เครื่อง) และ Vivo V30 Pro (80W จำนวน 1 เครื่อง) เมื่อใช้งานพร้อมกันมีกำลังไฟฟ้ารวมเท่ากับ 328 W ในแต่ละวันมีการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาที่เท่ากันกับเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ

### 2.2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลจากค่าพารามิเตอร์ที่บันทึกขณะชาร์จแบตเตอรี่ และใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยใช้สถิติ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อนำไปสู่การประเมินประสิทธิภาพและความคุ้มค่า [13] ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การหาประสิทธิภาพ ของการกักเก็บพลังงาน ต่อรอบชาร์จ (Cycle Efficiency, *eff*) สามารถคำนวณได้จาก ร้อยละของอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่เก็บได้ในแบตเตอรี่ (Discharging Energy) หรือพลังงานที่สามารถใช้งานได้จากแบตเตอรี่จนกระทั่งแบตเตอรี่หมดพลังงาน เทียบกับพลังงานที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ (Charging Energy) [14] จากพลังงานต่ำสุดจนถึงพลังงานเต็ม ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ (2)

$$eff = \frac{\text{Discharging Energy}}{\text{Charging Energy}} \times 100 \% \quad (2)$$

2) การประเมินจุดคุ้มทุนของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ที่ได้สร้างขึ้น มีการเปรียบเทียบกับเครื่องปั่นไฟ ที่ใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้ากำลังรวมเท่ากัน โดยเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต้นทุนและการชาร์จแบตเตอรี่จากอัตราส่วนการชาร์จด้วยระบบไฟฟ้าในบ้านต่อโซลาร์เซลล์ของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดที่ได้สร้างขึ้น กับต้นทุนเครื่องปั่นไฟและน้ำมันเชื้อเพลิง

## 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

### 3.1 ประสิทธิภาพแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่

แหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ที่ได้พัฒนาขึ้น สามารถชาร์จจากระบบไฟฟ้าในบ้านและระบบโซลาร์เซลล์ มีลักษณะเป็นกล่องขนาด 28x60x40 ซม. มีที่จับและล้อสำหรับความสะดวกในการเคลื่อนย้ายและการใช้งาน แสดงดังรูปที่ 2



(ก)

(ข)

รูปที่ 2 (ก) แหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ที่ได้พัฒนาขึ้น (ข) การนำไปใช้งาน

ภายในประกอบด้วย 1) แบตเตอรี่ลิเธียมฟอสเฟต จำนวน 8 ก้อน ความต่างศักย์ไฟฟารวมเท่ากับ 25.6 V ให้กระแสไฟฟ้า 120 Ah พลังงานรวมเท่ากับ 3.072 kWh โดยต่อเข้ากับระบบการจัดการแบตเตอรี่ (BMS) 2) inverter สามารถจ่ายกำลังได้สูงสุด 2,000 W 3) เครื่องควบคุมการชาร์จจากไฟบ้าน (AC-DC adaptor) ขนาดแรงดัน 29.2 V จ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 20 A 4) มิเตอร์วัดค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้า 5) ปลั๊กตัวเมียสำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V จำนวน 2 ช่อง 6) USB-A จำนวน 2 ช่อง และ USB-C จำนวน 4 ช่อง สำหรับให้พลังงานกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง และ 7) สวิตช์ ปิด-เปิด การทำงานของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่

เมื่อเปรียบเทียบกับการพัฒนาแหล่งพลังงานแบบเคลื่อนที่จากระบบอื่น เช่น งานของ Pangan et al. [3] ซึ่งใช้โซลาร์เซลล์ร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก (TEG) โดยให้พลังงานประมาณ 1,200 Wh งานของภาคิน มณีโชติและคณะ [15] ที่ใช้แผงโซลาร์เซลล์ขนาด 10 วัตต์ ให้พลังงานประมาณ 91 Wh พบว่าระบบในงานวิจัยนี้มีความสามารถในการจ่ายพลังงานสูงกว่าอย่างชัดเจน โดยให้พลังงานได้ถึง 3,072 Wh

#### 3.1.1 การชาร์จแบตเตอรี่ของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่

การทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่ศึกษาจากความเสถียรของระบบชาร์จ ประกอบด้วยเวลาในการชาร์จ

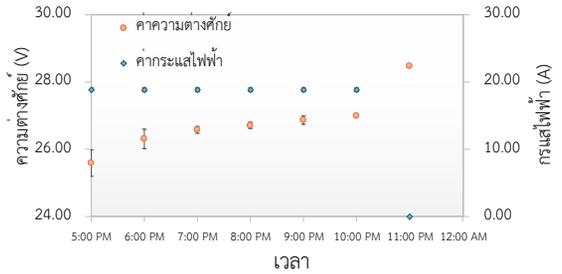
ค่าความต่างศักย์ และอุณหภูมิของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ จากทั้งระบบไฟฟ้าในบ้านและระบบโซลาร์เซลล์ ผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

1. การชาร์จด้วยระบบไฟฟ้าในบ้าน มีการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาตั้งแต่ 17.00 น. - 23.00 น. ผลการประเมินเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่จนเต็มมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $6.50 \pm 0.14$  ชั่วโมง (6 ชั่วโมง 30 นาที  $\pm$  8.11 นาที) หรือคลาดเคลื่อนจากค่าทางทฤษฎีร้อยละ 23.50 จะเห็นว่าเวลาในการชาร์จตามการใช้งานจริงใช้เวลานานกว่าทฤษฎี เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าระหว่างการชาร์จไปกับระบบชาร์จ เช่น adaptor และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

อุณหภูมิของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ขณะชาร์จค่อนข้างเสถียร มีค่าอยู่ในช่วง  $31.72 \pm 1.15$  ถึง  $33.98 \pm 1.10$  องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศขณะทำการชาร์จแบตเตอรี่ เช่น เป็นวันปกติหรือมีฝนตก

ความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดขณะชาร์จ แสดงดังรูปที่ 3 จะเห็นว่าช่วงเริ่มต้นค่าความต่างศักย์มีค่าต่ำที่สุด คือ 25.60 V และช่วงกลาง (เวลา 18.00 น. - 22.00 น.) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตั้งแต่ 26.32 V จนถึง 26.98 V และช่วงสุดท้ายที่แบตเตอรี่เต็ม มีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น 28.47 V เป็นสมบัติทั่วไปของแบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟต

ค่ากระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่แบตเตอรี่ขณะชาร์จมีค่าค่อนข้างคงที่ ประมาณ  $18.85 \pm 0.32$  A จนถึงช่วงสุดท้ายที่แบตเตอรี่เต็ม กระแสไฟฟ้าหยุดจ่ายเข้าแบตเตอรี่ จึงทำให้ค่าของกระแสไฟฟ้ามักเป็นศูนย์สอดคล้องกับความเป็นจริงคือเมื่อแบตเตอรี่เต็มจะหยุดการจ่ายกระแสเข้าไปยังแบตเตอรี่

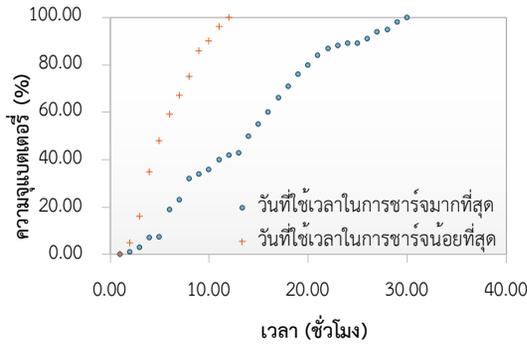


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา

2. การชาร์จแบตเตอรี่ของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่จากระบบโซลาร์เซลล์ ผลการศึกษาพบว่าเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่ในแต่ละรอบแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง เนื่องจากขณะเก็บข้อมูลเป็นช่วงฤดูฝนทำให้ในแต่ละวันมีการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงแดดไม่คงที่ บางวันฝนตกไม่มีแสงแดด บางวันมีแสงแดดตลอดทั้งวัน โดยเวลาที่ใช้ในการชาร์จน้อยที่สุดคือ 10 ชั่วโมง 18 นาที และเวลาที่ใช้ในการชาร์จมากที่สุดคือ 28 ชั่วโมง 35 นาที แตกต่างจากค่าทางทฤษฎีเป็นอย่างมาก (3 ชั่วโมง 51 นาที) เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงแดดที่ไม่สม่ำเสมอ คุณภาพของแผงที่ผ่านการใช้งานอย่างต่อเนื่อง และเครื่องควบคุมการชาร์จที่มีการใช้พลังงานระหว่างการชาร์จ เป็นต้น ความสัมพันธ์ระหว่างความจุของแบตเตอรี่กับเวลาในการชาร์จในวันที่ใช้เวลาน้อยที่สุดและมากที่สุดแสดงดังรูปที่ 4 จะเห็นว่าทั้งสองวันมีอัตรา ความจุของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นแตกต่างกันอย่างชัดเจน

อุณหภูมิของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ขณะชาร์จแบตเตอรี่ด้วยระบบโซลาร์เซลล์ค่อนข้างเสถียรเช่นกัน มีค่าอยู่ในช่วง  $28.20 \pm 1.84$  ถึง  $33.56 \pm 0.57$  โดยวันที่ใช้เวลาในการชาร์จน้อยเป็นวันที่ร้อนกว่า มีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ  $32.89 \pm 0.57$

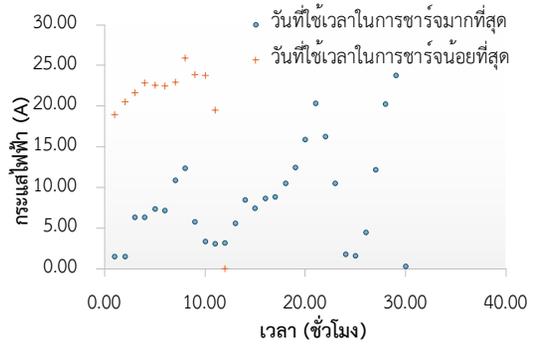
องศาเซลเซียส สูงกว่าวันที่ใช้เวลาในการชาร์จมากกว่า ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ  $30.11 \pm 1.41$  องศาเซลเซียส



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของความจุของแบตเตอรี่กับเวลาในการชาร์จโดยระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์

การประเมินความต่างศักย์ไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5 จะเห็นว่าในวันที่ใช้เวลาในการชาร์จน้อยที่สุดซึ่งเป็นวันที่แสงแดดแรงเกือบทั้งวัน แบตเตอรี่จะมีความต่างศักย์เพิ่มขึ้นในอัตรา 0.37 Vต่อชั่วโมง และเต็มภายในช่วงเวลา 10 ชั่วโมง 18 นาที สำหรับวันที่ใช้เวลาในการชาร์จมากที่สุด ความต่างศักย์ของแบตเตอรี่มีขึ้นลงบางช่วงแล้วแต่ช่วงเวลาที่มิแสงแดดมากกระทบแผงโซลาร์เซลล์ แต่แนวโน้มของความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ก็มีค่าเพิ่มขึ้นในอัตรา 0.13 V ต่อชั่วโมง และเต็มในเวลา 28 ชั่วโมง 35 นาที

สำหรับกระแสไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ เมื่อชาร์จโดยระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์จากรูปที่ 6 จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่แบตเตอรี่ในวันที่ใช้เวลาในการชาร์จน้อยที่สุดอยู่ในช่วง 18.9 – 25.9 A ซึ่งค่อนข้างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่แสงแดดจ้า และลดลงเมื่อแสงกระทบแผงโซลาร์เซลล์น้อยลง แต่สำหรับวันที่ใช้เวลาในการชาร์จมากที่สุด การผลิตกระแสไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ไม่สม่ำเสมอ และน้อยกว่าวันที่ใช้เวลาในการชาร์จน้อยที่สุดอย่างเห็นได้ชัด โดยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ อยู่ในช่วง 1.40 – 23.7 A



รูปที่ 6 กระแสไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ เมื่อชาร์จโดยระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์

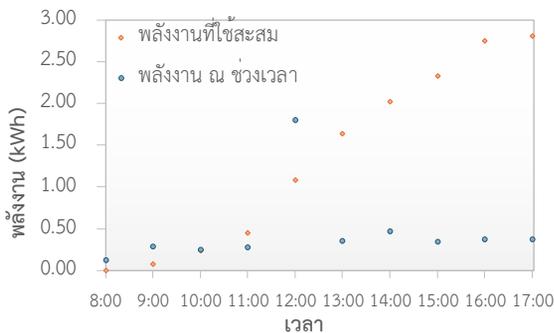
### 3.1.2 การใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้า

เมื่อพัฒนาแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่สำเร็จแล้ว ได้มีชาร์จไฟเข้าจนแบตเตอรี่เต็ม หลังจากนั้นได้ทดสอบโดยนำไปให้พลังงานกับเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ และอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยรายละเอียดของแต่ละระบบมีดังนี้

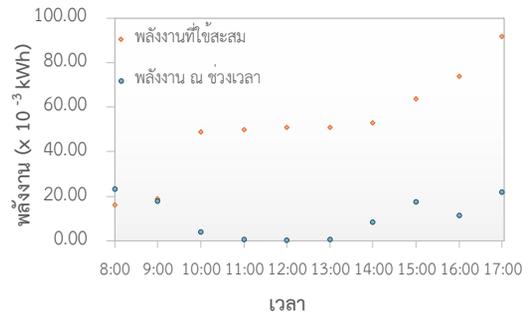
1. การใช้งานแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่กับเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่าในแต่ละวันมีการใช้พลังงานใกล้เคียงกันโดยมี อยู่ในช่วง 2.865 – 2.904 kWh ค่าเฉลี่ยวันละ  $2.890 \pm 0.01$  kWh ตัวอย่างการใช้ไฟในหนึ่งวัน ตั้งแต่เวลา 8.00 น. – 17.00 น. โดยกราฟแสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าสะสมและการใช้พลังงานไฟฟ้า ณ ช่วงเวลานั้น ๆ แสดงดังรูปที่ 7 พบว่าโดยเฉลี่ยเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ในวันและเวลาดังกล่าว ประมาณ  $0.474 \pm 0.51$  kWh ส่วนใหญ่ใช้ไฟฟ้าในช่วง 0.126 – 0.468 kWh แต่ในช่วงประมาณ 12.00 น. มีการใช้ไฟฟ้ากระโดดไปถึง 1.80 kWh และการใช้พลังงานสะสมตั้งแต่เริ่มต้นเก็บข้อมูลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งใช้พลังงานถึง 2.879 kWh เป็นช่วงที่แหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่หยุดจ่ายไฟ

2. เมื่อนำแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ไปทดสอบให้พลังงานกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง ผ่านช่องเสียบ USB-A และ USB-C ณ สถานปฏิบัติการวิจัย ตั้งแต่เวลา 8.00 น. – 17.00 น. โดยต่อพ่วงกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีกำลังไฟฟ้าขณะใช้งานรวมเท่ากับ 328 W

ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง พบว่าในแต่ละวันมีการใช้พลังงานในช่วง 0.070 – 0.095 kWh โดยมีค่าเฉลี่ย  $0.084 \pm 0.007$  kWh เป็นค่าที่ค่อนข้างน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ ที่อยู่ในช่วง 2.865 – 2.904 kWh ดังนั้นเมื่อชาร์จแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่จนเต็ม 1 รอบ สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงในห้องปฏิบัติการนี้ได้ถึง 34.28 วัน (คิดจากการใช้พลังงานเฉลี่ยที่  $0.084 \pm 0.007$  kWh) กราฟแสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าสะสม และการใช้พลังงานไฟฟ้า ณ ช่วงเวลานั้น ๆ แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 กราฟการใช้พลังงานไฟฟ้าสะสมและการใช้พลังงานไฟฟ้า ณ ช่วงเวลานั้น ๆ ของเครื่องใช้ไฟฟ้า AC จากแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่



รูปที่ 8 กราฟตัวอย่างการใช้พลังงานไฟฟ้าสะสมและการใช้พลังงานไฟฟ้า ณ ช่วงเวลานั้น ๆ ของอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง จากแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ ในหนึ่งวัน

จากกราฟตัวอย่างการใช้งานในระบบนี้พบว่าโดยเฉลี่ยอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง ได้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ในวันและเวลาดังกล่าว  $0.06 \times 10^{-3} - 23.3 \times 10^{-3}$  kWh และการใช้พลังงานสะสมตั้งแต่เริ่มต้นเก็บข้อมูลมีแนวโน้มสูงขึ้นจนกระทั่งใช้พลังงานถึง  $92 \times 10^{-3}$  kWh

กล่าวได้ว่าเมื่อใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ที่สามารถใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเวลา 10 ชั่วโมงต่อวัน ใช้กำลังไฟฟารวมเพียง 92 W และใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 10.58 W

### 3.1.3 ประสิทธิภาพโดยรวมของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่

การศึกษานี้ได้เก็บข้อมูลเป็นเวลา 10 รอบชาร์จสำหรับการชาร์จจากระบบไฟฟ้าในบ้าน และระบบโซลาร์เซลล์ โดยบันทึกพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการชาร์จแบตเตอรี่จนเต็ม แล้วนำไปใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้าจนแบตเตอรี่คงเหลือตามเกณฑ์ที่กำหนด

การชาร์จด้วยระบบไฟฟ้าในบ้านในแต่ละรอบ แบ่งเป็น 1) การชาร์จแบตเตอรี่จนเต็มในระยะเวลาตั้งแต่ 17.00 น. – 23.00 น. ก่อนนำมาใช้ในวันถัดไป 2) การใช้ งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้า ณ สถานที่ปฏิบัติงาน โดยเก็บข้อมูล

ในเวลาเดียวกันเริ่มที่ 8.00 น. ถึง 17.00 น. สำหรับการ ชาร์จด้วยระบบโซลาร์เซลล์จะมีการชาร์จในตอนกลางวัน ตั้งแต่เวลา 7.30 – 18.00 น. และนำไปใช้งานกับ เครื่องใช้ไฟฟ้าตอนกลางคืนตั้งแต่เวลา 18.00 – 23.00 น.

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่จากระบบไฟฟ้าในบ้านและระบบโซลาร์เซลล์

รอบ ชาร์จที่	ระบบไฟฟ้าในบ้าน			ระบบโซลาร์เซลล์		
	Charging (kWh)	Discharging (kWh)	ประสิทธิภาพ (%)	Charging (kWh)	Discharging (kWh)	ประสิทธิภาพ (%)
1	3.651	2.886	79.05	3.625	2.877	79.37
2	3.678	2.894	78.68	3.798	2.852	75.09
3	3.557	2.865	80.55	3.722	2.875	77.24
4	3.597	2.874	79.90	3.651	2.901	79.46
5	3.801	2.879	75.74	3.725	2.894	77.69
6	3.660	2.893	79.04	3.602	2.883	80.04
7	3.590	2.904	80.89	3.658	2.855	78.05
8	3.842	2.901	75.51	3.642	2.875	78.94
9	3.661	2.888	78.89	3.675	2.922	79.51
10	3.672	2.890	78.70	3.895	2.875	73.81
เฉลี่ย	3.670±0.090	2.890±0.010	78.70±1.79	3.699±0.090	2.881±0.021	77.92±2.05

ประสิทธิภาพผลของของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ ที่ชาร์จากระบบไฟฟ้าในบ้านและระบบโซลาร์เซลล์หาได้จากร้อยละของอัตราส่วนพลังงานที่ให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า (Discharging) กับพลังงานที่กักเก็บได้ (Charging) แสดงดังตารางที่ 1 ผลการศึกษาพบว่า การชาร์จด้วยทั้งสองระบบมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันโดยมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 78.70±1.79 และ 77.92±2.05 สำหรับการชาร์จด้วยระบบไฟฟ้าในบ้านและระบบโซลาร์เซลล์ ตามลำดับ

### 3.2 จุดคุ้มทุนของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่

การประเมินจุดคุ้มทุนของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่เป็นการเปรียบเทียบกับเครื่องปั่นไฟที่ใช้กับค่าโหลดเดียวกัน เนื่องจากเป็นแหล่งจ่าย

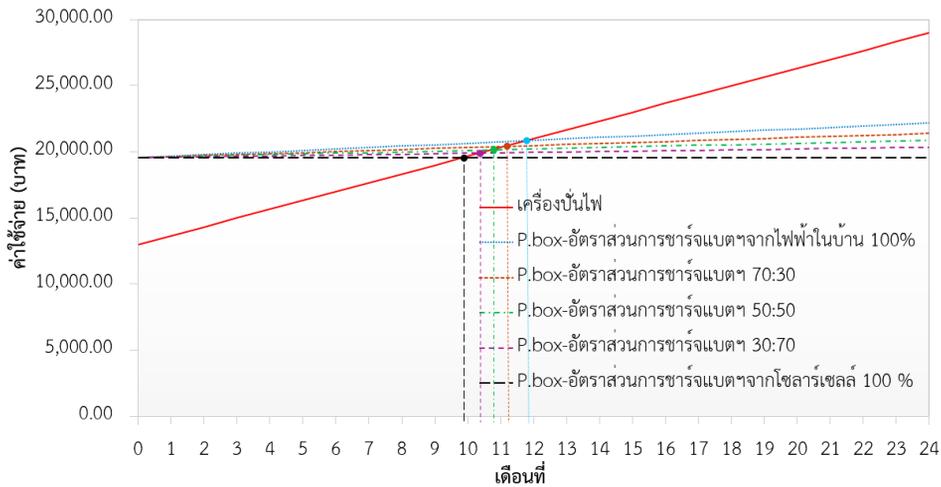
พลังงานไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่โดยผู้ใช้งานสามารถนำไปใช้ใน พื้นที่ที่ไม่มีสายส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงได้เช่นกัน เพียงแต่แตกต่างกันที่แหล่งพลังงานที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง รายละเอียดการประเมินจุดคุ้มทุนมีดังนี้

1. การประเมินราคาแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่และค่าไฟฟ้า พบว่าเมื่อใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่กับเครื่องใช้ไฟฟ้า 1,000 w วันละ 1 ชั่วโมง จะเสียค่าไฟฟ้าจากการชาร์จไฟฟ้าในบ้านของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ รวมทั้งหมดเท่ากับ 108.70 บาทต่อเดือน หรือประมาณ 1,304.41 บาทต่อปี เมื่อรวมกับราคาต้นทุนแบบของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่จะได้ราคาต้นทุนอยู่ที่ 20867.41 บาท

2. การประเมินราคาเครื่องปั่นไฟและค่าเชื้อเพลิง โดยทั่วไปเครื่องปั่นไฟใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง

สมมติว่าเลือกใช้เครื่องปั่นไฟที่ใช้งานได้ต่อเนื่องยาวนาน และราคาเหมาะสม คือ เครื่องปั่นไฟยี่ห้อ HERO รุ่น S2000is 2.0KW Inverter มีความจุถังน้ำมันอยู่ที่ 3.5 ลิตร และสามารถใช้งานต่อเนื่องได้ 7.5 ชั่วโมง ราคา 12,990 บาท โดยผู้ขายแนะนำให้ใช้น้ำมันเบนซิน 95 เพื่อรักษาอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ที่ยาวนานกว่า ซึ่งเครื่องปั่นไฟนี้มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันอยู่ที่ 0.47

ลิตรต่อชั่วโมง โดยค่าน้ำมันเบนซิน 95 ณ วันที่ 12 ก.ค. 2567 อยู่ที่ 47.24 บาท ดังนั้นเครื่องปั่นไฟมีอัตราการใช้น้ำมันวันละ 22.23 บาท หรือ 666.51 บาทต่อเดือน (7,998.08 บาทต่อปี) เมื่อรวมค่าเชื้อเพลิงน้ำมันกับราคาเครื่องปั่นไฟ จะได้ราคาต้นทุนของการใช้เครื่องปั่นไฟอยู่ที่ 20,988.08 บาทต่อปี



รูปที่ 9 กราฟแสดงการใช้พลังงานเชื้อเพลิง และอัตราส่วนการชาร์จไฟฟ้าบ้านโซลาร์เซลล์

3. เปรียบเทียบจุดคุ้มทุนและอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของต้นแบบชุดพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ที่ชาร์จแบตเตอรี่กับไฟฟ้าในบ้านและโซลาร์เซลล์ กับเครื่องปั่นไฟที่ใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของต้นแบบชุดพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ที่ชาร์จแบตเตอรี่กับไฟฟ้าในบ้านต่อการชาร์จด้วยระบบโซลาร์เซลล์ ด้วยอัตราส่วน 100:0 70:30 50:50 30:70 และ 0:100 กับเครื่องปั่นไฟที่ใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง ได้จุดคุ้มทุน ประมาณเดือนที่ 11.9 11.3 10.8 10.4 และ 9.8 ตามลำดับ

#### 4. สรุป

จากการศึกษาผลการพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของแหล่งพลังงานไฟฟ้าไฮบริดแบบ

เคลื่อนที่ พบว่า ชุดต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะเป็นกล่องขนาด 28 × 60 × 40 เซนติเมตร ติดตั้งที่จับและล้อสำหรับความสะดวกในการเคลื่อนย้าย สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้จากทั้งระบบไฟฟ้าในบ้านและระบบโซลาร์เซลล์ โดยมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 78.70 ± 1.79 สำหรับระบบไฟฟ้าในบ้าน และร้อยละ 77.92 ± 2.05 สำหรับระบบโซลาร์เซลล์

แหล่งพลังงานดังกล่าวให้กำลังไฟฟ้า 120 Ah ที่แรงดัน 24 โวลต์ คิดเป็นพลังงานรวม 3.072 kWh รองรับการใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งกระแสตรง (ผ่านพอร์ต USB-A และ USB-C) และกระแสสลับ (ผ่านปลั๊กไฟ 220 โวลต์) เหมาะสำหรับการใช้งานนอกเคหสถาน เช่น หลอดไฟ สมาร์ทโฟน แท็บเล็ต และคอมพิวเตอร์พกพา โดยสามารถใช้งานได้ต่อเนื่องสูงสุดถึง 3 วัน (ในกรณีใช้งานวันละไม่เกิน 1,000 วัตต์)

ในการศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่า หากใช้งานโดยชาร์จจากระบบไฟฟ้าในบ้านเพียงอย่างเดียว จะมีค่าใช้จ่ายเฉลี่ย 108.70 บาทต่อเดือน หรือ ประมาณ 1,304.41 บาทต่อปี รวมกับต้นทุนต้นแบบ ทั้งหมดเป็น 20,867.41 บาทต่อปี ขณะที่เครื่องปั่นไฟ แบบใช้น้ำมันมีต้นทุนรวมเฉลี่ยอยู่ที่ 20,988.08 บาทต่อปี เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับจุดคุ้มทุน พบว่าระบบพลังงาน ไฟฟ้าไฮบริดแบบเคลื่อนที่ที่สามารถคืนทุนได้ภายใน ระยะเวลา ประมาณ 11.9 ถึง 9.8 เดือน ขึ้นอยู่กับสัดส่วน การชาร์จจากไฟฟ้าในบ้านต่อระบบโซลาร์เซลล์ในสัดส่วน 100:0, 70:30, 50:50, 30:70 และ 0:100 ตามลำดับ

ทั้งนี้ เพื่อต่อยอดการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพ สูงขึ้นในอนาคต งานวิจัยนี้เสนอแนวทางเพิ่มเติมด้าน การปรับปรุงระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่ โดย อาจพิจารณาใช้วิธี ระบายความร้อนแบบพาสซีฟ (passive cooling) หรือ ระบบพัดลมควบคุมอัตโนมัติ (automatic fan control) เพื่อช่วยลดอุณหภูมิสะสม ภายในชุดอุปกรณ์ และยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ให้ยาวนานยิ่งขึ้น

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย ราชภัฏเชียงใหม่ที่ให้การสนับสนุน

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Onchawiang, "The use of smartphone technology for instruction," *Journal of Education and Social Development*, vol. 13, pp. 31–45, Jul-Dec. 2017.
- [2] A. Tewata and Y. Sriudom, "An experimental study on increasing efficiency of solar cell modules by flat heat pipe cooling," *RMUTP Research Journal*, vol. 12, pp. 83–94, Jul-Dec. 2018.
- [3] J. M. A. Pangan, T. R. M. Cayanan, R. J. R. Cordon, J. E. Mangalus, and J. P. M. Ruado, "Design and development of a mobile power charging station via solar and thermoelectric harvesting," *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, vol. 6, no. 6, pp. 1004–1012, Jun. 2024.
- [4] B. N. Abramovich, D. A. Ustinov, and W. J. Abdallah, "Development and design of a mobile power plant in the form of a standalone power supply," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1753, pp. 012006(1-29), 2021.
- [5] K. S. Krishna and K. S. Kumar, "A review on hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp.907-916, Dec. 2015.
- [6] C. J. Lee, S.-C. Chen, and M.-C. Shie, "A portable multifunctional power box," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 39, no. 5, pp.565-573, Jan. 2016.
- [7] S. Ma, T. Xiang, K. Hou, Z. Liu, P. Tang, and N. Qi. "Spatial-temporal optimal dispatch of mobile energy storage for emergency power supply," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 322-329, Sep. 2022.
- [8] M. Saisho, T. Okamura, M. Kanazawa, T. Okuyama, and H. Morikawa, "Development of portable power supply units applying Li-ion batteries". in *Proceedings of the IEEE*

- Japan Series*, Kitakyushu, Japan, 2013, pp. 793 – 798.
- [9] Y. Zhang, S. Cheng, W. Mei, L. Jiang, Z. Jia, Z. Cheng, J. Sun, and Q. Wang, “Understanding of thermal runaway mechanism of LiFePO<sub>4</sub> battery in-depth by three-level analysis,” *Applied Energy*, Vol. 336, no. 15, pp. 120695, Apr. 2023.
- [10] Battery University. (n.d.). *BU-205: Types of Lithium-ion*. [Online]. <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion> [Accessed: Apr. 22, 2025].
- [11] R. B. M. Nor, Advancing Electric Vehicle Battery Management: Innovative Strategies for Enhanced Performance and Longevity Practices,” *AI, IoT and the Fourth Industrial Revolution Review*, vol. 13, no. 2, pp.1-14, Dec. 2023.
- [12] J. Garche and A. Jossen, “Battery management systems (BMS) for increasing battery life time,” in *Proceedings of the IEEE TELESCON 2000*, Dresden, Germany, 2000.
- [13] S. Thongsuk and A. Ngaopitakkul, “Performance and economic analysis on rooftop PV system,” *Srinakharinwirot University Journal of Sciences and Technology*, vol. 10, no. 19, pp.157-169, Jan.-Jun. 2018.
- [14] M. Schimpe, M. Naumann, N. Truong, H. C. Hesse, S. Santhanagopalan, A. Saxon, and A. Jossen, “Energy efficiency evaluation of a stationary lithium-ion battery container storage system via electro-thermal modeling and detailed component analysis,” *Applied Energy*, vol. 210, no. 15, pp.211-229, Jan. 2018.
- [15] P. Maneechote, T. Kueataveekul, W. Yimyong, and K. Khambanlue, “Design and deployment of Portable Multi-purpose Box by using Solar Energy” in *Proceeding of 12th Thailand Renewable Energy for Community Conference*, Naresuan University, Thailand, 2019, pp. 473–482.

# การศึกษาเชิงตัวเลขของการระบายอากาศแบบธรรมชาติภายในอาคาร ด้วยระบบหลังคาแสงอาทิตย์แบบหนึ่งช่องทางไหล

ณัฐพงษ์ วงศ์บัวพา<sup>1</sup> ทวีศิลป์ เล็กประดิษฐ์<sup>2</sup> ศิวกร ศรีธัญญากร<sup>2</sup> และ พรสวรรค์ ทองใบ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

<sup>2</sup>สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

<sup>1,2</sup>744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 3 เมษายน 2566 แก้ไขบทความ 29 เมษายน 2568 ตอรับบทความ 4 มิถุนายน 2568

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากความเข้มของแสงอาทิตย์และตัวแปรเชิงเรขาคณิต ของหลังคาแสงอาทิตย์แบบหนึ่งช่องทางไหลต่อการระบายอากาศแบบธรรมชาติด้วยวิธีเชิงตัวเลข ตัวแปรบ่งชี้ค่าการระบายอากาศในที่นี้ คืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ทำการสอบเทียบโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation ด้วยการจำลองปัญหาการไหลผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้งเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำ จากนั้นจำลองปัญหาการไหลผ่านอาคารใน 3 มิติ โดยให้การไหลของอากาศในตัวอาคารเป็นการไหลแบบธรรมชาติที่เกิดจากแรงลอยตัว กำหนดขนาดของอาคารจำลองเป็น กว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร สูง 1 เมตร ผนัง พื้น และเพดานถูกกำหนดให้เป็นฉนวนสมบูรณ์ ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มของแสงอาทิตย์ ความกว้างของช่องทางเข้า ความกว้างของช่องทางไหลอากาศใต้ห้องหลังคา มุมเอียงของหลังคา ความสูงของปล่อง และมุมบานตัวของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคา ผลลัพธ์จากการจำลองพบว่าทุกตัวแปรส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอย่างมีนัยสำคัญดังนี้ กรณีมีปล่องด้านบนของหลังคาที่ความสูง 25 เซนติเมตร สามารถเพิ่มอัตราการไหลของอากาศได้ถึง 62 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับกรณีไม่มีปล่อง กรณีหลังคาเอียง 30 องศา สามารถเพิ่มอัตราการไหลของอากาศได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับกรณีหลังคาเอียง 15 องศา กรณีความกว้างของช่องทางไหลของอากาศ 15 เซนติเมตร มีค่าอัตราการไหลของอากาศสูงกว่ากรณี 5 เซนติเมตรถึง 47 เปอร์เซ็นต์ และกรณีมุมบานตัวของหลังคา 9 องศา สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ 29 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศสูงขึ้นตามไปด้วย การยืนยันความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองนี้นอกจากที่ได้ทำการสอบเทียบโปรแกรมกับปัญหาการไหลผ่านร้อนในแนวตั้งแล้ว ทีมผู้วิจัยยังทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองที่เคยทำไว้ในอดีต โดยเลือกผลลัพธ์จากกรณีศึกษาที่ความสูงปล่องและความกว้างของช่องทางเข้าของอาคารต่าง ๆ ซึ่งพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และจากการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำให้มั่นใจในความถูกต้องของผลลัพธ์สำหรับการวิจัยในครั้งนี้

**คำสำคัญ :** ระบบหลังคาแสงอาทิตย์แบบหนึ่งช่องทางไหล; การระบายอากาศแบบธรรมชาติ; มุมบานตัวของช่องทางไหลของอากาศ

# A Numerical Study of Natural Ventilation in Building by Using Roof Solar Collector with Single-Air Channel (RSC-SC)

Nuttapong Wongbubpa<sup>1</sup> Taveesin Lekpradit<sup>2</sup> Siwakorn Sritunyakorn<sup>2</sup> and Pornsawan Tongbai<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of mechatronics engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

<sup>2</sup>Department of mechanical engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

<sup>1, 2</sup>744 Suranarai Road, Mueang, Nakhon Ratchasima, 30000

---

*Received 3 April 2023; Revised 29 April 2025; Accepted 4 June 2025*

## Abstract

This study investigates the impact of solar radiation intensity and the geometrical parameters of a roof solar collector with a single-air channel (RSC-SC) on natural ventilation performance through numerical simulations. The mass flow rate of air was selected as the primary indicator of ventilation effectiveness. SolidWorks Flow Simulation was calibrated using the classical vertical heated plate problem, and three-dimensional airflow simulations were conducted for a model building sized 1x1x1 m, with perfectly insulated walls, floor, and ceiling. Key parameters examined include solar radiation intensity, inlet width, under-roof channel width, roof tilt angle, chimney height, and diffuser angle. The results revealed that all variables significantly enhanced the mass flow rate. For example, a 25 cm chimney increased airflow by 62% compared to no chimney; a 30-degree roof tilt improved airflow by 90% compared to a 15-degree tilt; increasing the under-roof channel width to 15 cm enhanced airflow by 47%; and a 9-degree diffuser angle increased airflow by 29%. Higher solar radiation intensity also corresponded to greater mass flow rates. The validity of the simulation results was confirmed through comparisons with both calibrated benchmark solutions and experimental data from previous studies. Consistent trends between simulations and experiments underscore the reliability of the simulation approach adopted in this research.

**Keywords :** Roof solar collector with a single air channel; Natural ventilation; Expansion angle of the air channel

## 1. บทนำ

การประยุกต์ใช้หลังคาแสงอาทิตย์หรืออุปกรณ์เก็บรังสีอาทิตย์เพื่อช่วยระบายอากาศแบบธรรมชาติในอาคาร เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ ประกอบกับประเทศไทยอยู่ในเขตร้อน ความเข้มของแสงอาทิตย์เฉลี่ยต่อปีมีค่าค่อนข้างสูงจึงยิ่งช่วยส่งเสริมอัตราการระบายอากาศ อีกทั้งพลังงานแสงอาทิตย์ยังเป็นพลังงานทางเลือกรูปแบบหนึ่งที่เป็นพลังงานสะอาดไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อช่วยในการระบายอากาศแบบธรรมชาติจึงสามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ โดยอาจใช้ร่วมกับระบบระบายอากาศแบบใช้พลังงานไฟฟ้า เช่น เครื่องปรับอากาศและทำความเย็นหรือพัดลม เป็นต้น

ระบบหลังคาแสงอาทิตย์แบบหนึ่งช่องทางไหลในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3 หนึ่งคือหลังคาชั้นนอก ทำจากวัสดุโปร่งใส (Transparent Roof) จึงมีค่าการส่งผ่านความร้อนสูงทำให้แสงอาทิตย์ทะลุผ่านได้มาก สองคือช่องทางไหลของอากาศ (Air Channel) สามคือหลังคาชั้นในหรือแผ่นดูดกลืนแสงอาทิตย์ (Absorber Plate) ทำหน้าที่ดูดกลืนความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ทะลุผ่านหลังคาชั้นนอกเข้ามาก่อนที่จะถ่ายเทความร้อนนี้ให้กับอากาศที่อยู่ในช่องทางไหล และส่วนที่ 4 คือปล่อง (Chimney) ติดตั้งที่ด้านบนสุดของหลังคาเอียงซึ่งเป็นปล่องธรรมชาติมีหน้าที่เพิ่มความสูงในแนวตั้งให้กับระบบเพื่อช่วยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ (Stack Effect) โดยไม่ได้ทำหน้าที่รับแสงแดดแต่อย่างใด ซึ่งแตกต่างจากปล่องในงานวิจัยอื่น ๆ ที่ถูกออกแบบให้ปล่องมีหน้าที่หลักในการรับแสงอาทิตย์ ความร้อนที่ผ่านหลังคาโปร่งใสเข้ามาจะถูกกักให้อยู่ในช่องทางไหลของอากาศโดยพฤติกรรมเรือนกระจก (Greenhouse Effect) อากาศภายในช่องทางไหลจะได้รับความร้อนจากแผ่นดูดกลืนแสงอาทิตย์ เมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นความ

หนาแน่นจึงลดลง อากาศในช่องทางไหลที่มีน้ำหนักเบา นี้จะลอยตัวขึ้นผ่านช่องทางไหล และไหลออกสู่บรรยากาศผ่านปล่องที่อยู่ด้านบนของหลังคา หากประยุกต์ระบบหลังคาแสงอาทิตย์เข้ากับบ้านหรืออาคารทั่วไป ระบบนี้ก็จะสามารถเหนี่ยวนำอากาศจากด้านนอกซึ่งถือว่าเป็นอากาศบริสุทธิ์ (Fresh Air) เข้าสู่อาคารผ่านช่องเปิดที่เตรียมไว้ทางด้านล่าง ทำหน้าที่ระบายอากาศและ/หรือทำความเย็นไปพร้อมกัน หลักการทำงานของระบบนี้ค่อนข้างง่ายแต่การออกแบบให้ได้ประสิทธิภาพสูงนั้นมีความยุ่งยากพอสมควร เพราะต้องมีทั้งทฤษฎีการคำนวณและการทดสอบที่ดีเป็นเครื่องมือในการทำงาน

งานวิจัยในอดีตที่พบว่ามีการใช้ระบบหลังคาแสงอาทิตย์หรือระบบปล่องแสงอาทิตย์เพื่อการระบายอากาศมีทั้งการศึกษาเชิงทฤษฎี การศึกษาเชิงตัวเลข และการทดลอง ดังต่อไปนี้ งานวิจัยของ N.K. Bansal et al [1], [2] เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการระบายอากาศแบบธรรมชาติด้วยการใช้ปล่องแสงอาทิตย์ พบว่าปล่องแสงอาทิตย์สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดอัตราการไหลต่อพื้นที่ 50-165 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ผลลัพธ์ที่สำคัญจากงานวิจัยหลายงานวิจัยพบว่าพารามิเตอร์ทางเรขาคณิต (ความกว้าง ความสูง มุมเอียง) ของปล่องส่งผลต่ออัตราการระบายอากาศ แต่ขนาดที่เหมาะสมของแต่ละพารามิเตอร์ยังมีความหลากหลาย [3]-[8] ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของปล่องด้วย โดยปี 2022 N. Goa et al [9] เสนอการออกแบบปล่องแสงอาทิตย์บนหลังคาที่ผสมพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ในการเพิ่มประสิทธิภาพระบายอากาศภายในอาคารโดยทำการศึกษาเชิงตัวเลขพบว่ามุมเอียงของปล่องช่วยเพิ่มอัตราการระบายอากาศอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบการศึกษาการระบายอากาศภายในบ้านพักอาศัยที่อยู่ในพื้นที่ของกรุงเทพมหานคร ซึ่งออกแบบให้ปล่องเป็นส่วนหนึ่งของหลังคา หรือ

เรียกว่า หลังคาสองชั้น ซึ่งแนะนำขนาดที่เหมาะสมของความยาวปล่องคือ 1-2 เมตร ความกว้างของช่องอากาศ 10-14 เซนติเมตร และมุมเอียงของหลังคา 20-45 องศา โดยคำนึงถึงความสวยงาม ต้นทุนและความสะดวกในทางปฏิบัติ [10]-[14]

P. Tongbai et al [15] เสนอวิธีการระบายอากาศด้วยห้องหลังคาและปล่องแสงอาทิตย์ที่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการระบายอากาศในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของผู้อาศัย นอกจากนี้ยังพบว่าความสูงและขนาดของปล่องตลอดจนความเข้มของแสงแสงอาทิตย์ต่างส่งผลต่ออัตราการระบายอากาศ มุมเอียงที่ควรนำไปใช้ในทางปฏิบัติของหลังคาคือ 45 องศา จากผลลัพธ์ในงานวิจัยของ A. Koonsrisuk et al [16] ซึ่งศึกษาการไหลของอากาศผ่านปล่องแสงอาทิตย์เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า พบว่าการทำให้ช่องทางไหลของอากาศบานตัวออกสามารถเพิ่มอัตราการไหลของอากาศในปล่องได้ P. Tongbai et al [17], [18] จึงนำแนวคิดนี้ไปใช้กับปล่องแสงอาทิตย์เพื่อการระบายอากาศ พบว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกือบจะเป็นเชิงเส้นที่มุมบานตัวของหลังคาในช่วง 1-5 องศา โดยที่มุมบานตัว 6 องศา อัตราการไหลเพิ่ม 30 เปอร์เซ็นต์ (เทียบกับกรณีไม่มีมุมบานตัว) เมื่อเพิ่มมุมบานตัวไปจนถึง 12 องศา อัตราการไหลยังคงเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มด้วยอัตราที่ลดลง จากนั้นศึกษาอัตราการเพิ่มขึ้นของการระบายอากาศเมื่อต่อปล่องแนวตั้งเข้ากับทางออกของห้องหลังคา โดยปล่องนี้เป็นปล่องแบบธรรมดาที่ช่วยเพิ่มความสูงระหว่างช่องทางเข้าและออกของระบบเท่านั้น ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มอัตราการไหลได้ถึง 38 เปอร์เซ็นต์ ที่ความสูงปล่อง 0.75 เมตร นอกจากนี้ P. Tongbai et al [19] ยังศึกษาเปรียบเทียบผลของลักษณะของหลังคาเอียงกับหลังคาแบบราบที่ต่อปล่องให้มีความสูงในแนวตั้งเท่ากัน ซึ่งพบว่าหลังคาแบบเอียงให้ค่าอัตราการไหลสูงกว่าหลังคาแบบราบที่มีปล่อง

นับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถนำไปช่วยตัดสินใจในการสร้างอาคารเพื่อยู่อาศัยต่อไป จากนั้น P. Tongbai et al [20] ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขใน 3 มิติ และพบว่าตำแหน่งของปล่องบนหลังคาไม่มีผลอย่างมีนัยต่ออัตราการไหลที่เกิดขึ้นแต่อย่างใด ต่อมา P. Tongbai et al [21] ได้ทำการทดลองศึกษาตัวแปรทางโครงสร้างต่ออัตราการไหลเชิงมวล และอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (Air Change per Hour, ACH) ซึ่งคืออัตราการไหลที่ถูกแปลงเป็นปริมาตรของอากาศที่ไหลผ่านอาคารในเวลา 1 ชั่วโมง โดยคิดเป็นจำนวนเท่าของปริมาตรห้อง พบว่าตัวแปรทางโครงสร้างของหลังคาแสงอาทิตย์ต่างมีผลต่ออัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมงทั้งสิ้น

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation ถึงผลกระทบจากความเข้มของแสงแสงอาทิตย์ และตัวแปรเชิงเรขาคณิตต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับผลการทดลองของ P. Tongbai et al [21] ซึ่งพบว่าทั้งความเข้มของแสงแสงอาทิตย์และตัวแปรเชิงเรขาคณิตต่าง ๆ นั้น ต่างมีผลต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้งสิ้น ซึ่งหมายถึงย่อมส่งผลต่ออัตราการระบายอากาศที่จะเกิดขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลการทดลองในอดีต พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้มั่นใจได้ว่าการจำลองปัญหาการไหลเพื่อศึกษาการระบายอากาศภายในอาคารด้วยหลังคาแสงอาทิตย์แบบหนึ่งช่องทางไหลด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation นี้ มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ ซึ่งจะสามารถช่วยลดเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการศึกษาได้อีกทั้งผลลัพธ์ที่ได้ยังสามารถช่วยให้ได้แนวทางในการออกแบบอาคารหรือบ้านพักอาศัยเพื่อการระบายอากาศแบบธรรมชาติได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้เป็นอย่างมาก

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

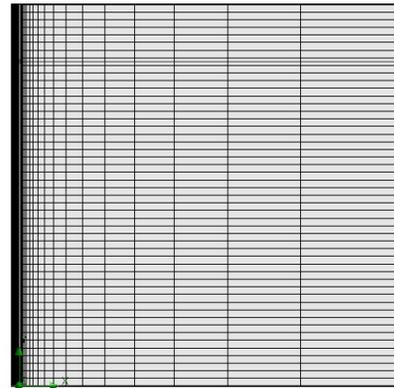
ทำการจำลองการไหลใน 3 มิติ ด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation ผ่านบ้านจำลองขนาดเล็ก ทำการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมกับปัญหาการไหลผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง ซึ่งเป็นปัญหาที่มีรูปแบบคล้ายคลึงกับปัญหาการไหลผ่านอาคารที่จะทำการศึกษาในครั้งนี้ และเป็นปัญหาที่สามารถผลเฉลยแม่นยำตรงได้ จากนั้นจึงทำการจำลองการไหลผ่านบ้านจำลองที่ใช้ในการศึกษา และทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองกับผลลัพธ์จากการทดลองของงานวิจัยในอดีต [21] ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

### 2.1 การทดสอบโปรแกรม

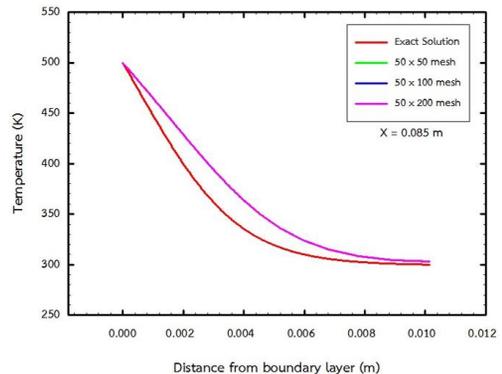
ทำการทดสอบโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation ด้วยปัญหาการไหลแบบการพาอิสระ (Free Convection) ผ่านแผ่นร้อนแนวตั้งใน 2 มิติ ที่มีอุณหภูมิ 500 เคลวิน อากาศแวดล้อมมีอุณหภูมิ 300 เคลวิน ความดัน 1 บรรยากาศ เปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลเฉลยแม่นยำตรงที่คำนวณจากกรรมวิธีความเสมือน (Similarity Method) ซึ่งใช้ Boussinesq Model ในการจัดจำลองความหนาแน่นของอากาศ ในการจำลองกำหนดขนาดของโดเมนเป็น 0.1x0.1 เมตร เมช (Mesh) ที่ใช้เป็นเมชสี่เหลี่ยมจำนวน 50x50 เมช ซึ่งจำนวนเมชนี้ได้ผ่านการปรับแต่งเมชให้เหมาะสม (Mesh Optimization) เรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 1

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองที่จำนวนเมชต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลเฉลยแม่นยำตรง (ทฤษฎี) นั่นคือลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงตามระยะทางจากแผ่นร้อน ทำการคำนวณค่าผิดพลาดสูงสุดได้ประมาณ 5.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าค่อนข้างน้อยและอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ อนึ่งพึงเข้าใจว่าผลเฉลยแม่นยำตรงนี้เป็นผลเฉลยของสมการในชั้นขีตผิวซึ่งเป็นสมการ

ประมาณการของสมการเต็มรูป จึงมีความผิดพลาดในตัวอยู่ระดับหนึ่ง (แม้จะเรียกว่าผลเฉลยแม่นยำตรงก็ตาม) นอกจากนี้จะเห็นว่าเส้นกราฟอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองที่จำนวนเมช 50x50, 50x100 และ 50x200 ซ้อนทับกันพอดี ซึ่งหมายถึงสามารถใช้เมชจำนวน 50x50 ก็เพียงพอแล้วนั่นเอง



รูปที่ 1 เมชที่ใช้ในการทดสอบโปรแกรม

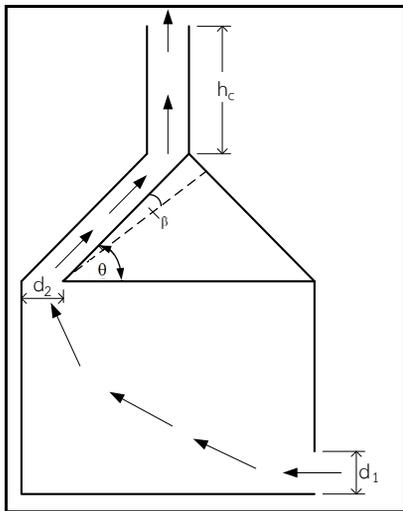


รูปที่ 2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

### 2.2 ลักษณะของบ้านที่ใช้ในการจำลอง

กำหนดให้ขนาดของบ้านต้นแบบที่ใช้ในการจำลองมีขนาดเดียวกันกับบ้านที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยในอดีต [21] นั่นคือ กว้างxยาวxสูง เท่ากับ 1x1x1 เมตร มุมเอียงของหลังคา 45 องศา ช่องเปิดด้านล่างถูกเปิดตลอดความกว้างของตัวบ้าน ขนาดพื้นที่หน้าตัดการไหลของปล่องมีค่าคงที่ กว้าง และยาว คือ 15 เซนติเมตร และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ

หลังคาด้านทิศใต้จะเป็นหลังคาสองชั้น ชั้นนอกเป็นหลังคาโปร่งใส ลักษณะของบ้านจำลองและตัวแปรเชิงเรขาคณิตต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาแสดงในรูปที่ 3 โดยได้จำลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ดังนี้ 1) ความเข้มของแสงอาทิตย์ (I): 500, 600, 700 และ 800 วัตต์ต่อตารางเมตร (ซึ่งเป็นช่วงความเข้มของแสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยของประเทศไทย) 2) มุมเอียงของหลังคา ( $\theta$ ): 15, 30, 45 และ 60 องศา 3) ความสูงของปล่อง ( $h_c$ ): 0, 25, 50, 75 และ 100 เซนติเมตร 4) ความกว้างของช่องทางเข้าของอากาศ ( $d_1$ ): 5, 10 และ 15 เซนติเมตร 5) ความกว้างของช่องทางไหลของอากาศ ( $d_2$ ): 5, 10 และ 15 เซนติเมตร และ 6) มุมบานตัวของช่องทางไหลของอากาศ ( $\beta$ ): 0, 3, 6 และ 9 องศา



รูปที่ 3 ตัวแปรเชิงเรขาคณิตของอาคาร

### 2.3 สมมุติฐานที่ใช้ในการจำลอง

สมมุติฐานที่ใช้ในการจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลขมีดังนี้

1. เป็นปัญหาการไหลแบบ 3 มิติ ภายในอาคาร (Internal Flow)
2. ไม่พิจารณาการไหลที่เกิดจากแรงลมภายนอก (Wind Effect) โดยการไหลของอากาศผ่านอาคารเกิดจากแรงลอยตัว (Buoyancy-Driven Flow) เท่านั้น

3. แหล่งความร้อนกำหนดด้วยค่าความเข้มของแสงแดด โดยกำหนดเป็นค่าพลังความร้อนที่พื้นผิวของหลังคาชั้นในบริเวณช่องทางไหลของอากาศ

4. เป็นการไหลแบบมีความหนืดที่สภาวะคงตัว

5. สมมุติให้ผนัง พื้น และเพดาน เป็นผนังแบบฉนวนสมบูรณ์ (Adiabatic Wall)

6. อากาศภายนอกอาคารเป็นอากาศที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศในฤดูร้อนของประเทศไทย) ที่ความดันบรรยากาศ

### 2.4 สมการควบคุมของแบบจำลองเชิงตัวเลข

สมการควบคุมของปัญหาการไหลแบบหนืดภายใต้สภาวะคงตัวใน 3 มิติ ประกอบด้วยสมการอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน [22] ตามลำดับ ดังนี้

$$\dot{m} = \rho AV \tag{1}$$

$$\frac{dM_{CV}}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \tag{2}$$

$$\frac{d(M\vec{V})_{CV}}{dt} = \vec{F}_{CV} + \dot{m}_{in} \vec{V}_{in} - \dot{m}_{out} \vec{V}_{out} \tag{3}$$

$$\frac{d(Me)_{CV}}{dt} = \dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \dot{m}_{in} e_{in} - \dot{m}_{out} e_{out} \tag{4}$$

โดยที่

$\dot{m}$  = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)

$\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$A$  = พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)

$V$  = ความเร็วของอากาศ (เมตรต่อวินาที)

$$\frac{dM_{CV}}{dt} = \text{อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตร}$$

ควบคุม (กิโลกรัมต่อวินาที)

$$\dot{m}_{in} = \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขาเข้า}$$

(กิโลกรัมต่อวินาที)

$$\dot{m}_{out} = \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขาออก}$$

(กิโลกรัมต่อวินาที)

$$\frac{d(M\bar{V})_{CV}}{dt} = \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมใน}$$

ปริมาตรควบคุม (กิโลกรัม-เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

$$\bar{F}_{CV} = \text{แรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม (กิโลกรัม-}$$

เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

$$\bar{V}_{in} = \text{ความเร็วของอากาศขาเข้าปริมาตรควบคุม}$$

(เมตรต่อวินาที)

$$\bar{V}_{out} = \text{ความเร็วของอากาศขาออกปริมาตรควบคุม}$$

(เมตรต่อวินาที)

$$\frac{d(Me)_{CV}}{dt} = \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานใน}$$

ปริมาตรควบคุม (กิโลกรัม-จูลต่อวินาที)

$$\dot{Q}_{CV} = \text{อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากสิ่งแวดล้อม}$$

เข้าปริมาตรควบคุม (กิโลกรัม-จูลต่อวินาที)

$$\dot{W}_{CV} = \text{อัตราการถ่ายโอนงานจากสิ่งแวดล้อมเข้า}$$

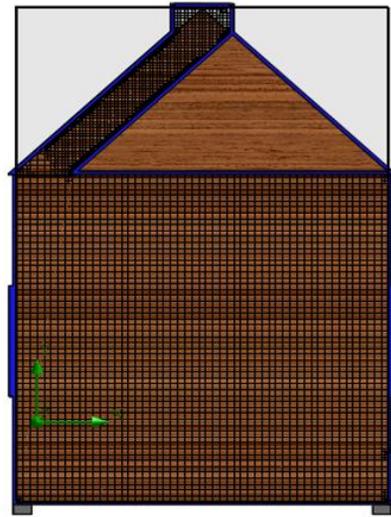
ปริมาตรควบคุม (กิโลกรัม-จูลต่อวินาที)

$$e_{in} = \text{พลังงานที่ไหลเข้าปริมาตรควบคุม (จูล)}$$

$$e_{out} = \text{พลังงานที่ไหลออกปริมาตรควบคุม (จูล)}$$

หาคำตอบให้กับปัญหาการไหลผ่านอาคารด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method) โดยใช้โปรแกรม SolidWorks Flow Simulation กำหนดเงื่อนไขขอบเขตบริเวณช่องทางเข้าเป็นแบบ Inlet ที่ความดันรวม (Total Pressure) เท่ากับความดันบรรยากาศ บริเวณทางออกที่ปลายปล่องเป็นแบบ Outlet ที่ความดันสถิตย์ (Static Pressure) เท่ากับความดันบรรยากาศ เมชที่ใช้ในการจำลองเป็นเมชแบบกล่องสี่เหลี่ยม โดยกำหนดเมชบริเวณช่องทางเข้า

ช่องทางไหลของอากาศและกล่องให้มีความละเอียดกว่าเมชภายในห้อง ทำการปรับแต่งเมช (Mesh Optimization) จนได้จำนวนเมชที่เหมาะสม ซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 7500 เมช ตัวอย่างเมชที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขแสดงดังรูปที่ 4 ทำการตรวจสอบค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ช่องเปิดทางเข้าและทางออกที่ได้จากการจำลองพบว่ามีความเท่ากันทุกกรณีศึกษาซึ่งเป็นไปตามกฎอนุรักษ์มวล



รูปที่ 4 ตัวอย่างเมชที่ใช้ในการจำลองในมุมมอง 2 มิติ

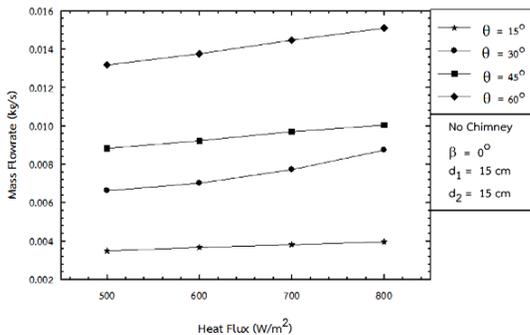
### 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลผ่านบ้านจำลอง (ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งชี้ปริมาณการระบายอากาศ) เป็นดังนี้

#### 3.1 ผลกระทบของความเข้มของแสงอาทิตย์ต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่มากขึ้นส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งนับเป็นพฤติกรรมที่ดีเนื่องจากอากาศที่ร้อนขึ้นยิ่งก่อให้เกิดการระบายอากาศที่มากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเมื่อแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นมีค่าไม่สูงมากเมื่อเทียบกับผลกระทบจากการเพิ่มค่า

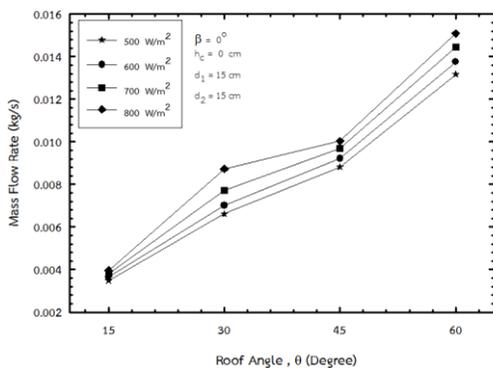
ตัวแปรเชิงเรขาคณิตอื่น ๆ ดังจะเห็นได้จากความชันของเส้นกราฟที่มีค่อนข้างน้อย โดยกรณีบ้านที่มีหลังคาเอียง 60 องศา ที่ความเข้มของแสงอาทิตย์ 800 วัตต์ต่อตารางเมตร สามารถเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลได้มากที่สุดเท่ากับ 13.6 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับกรณีความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ 500 วัตต์ต่อตารางเมตร



รูปที่ 5 ผลกระทบของความเข้มขึ้นของแสงอาทิตย์ต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

### 3.2 ผลกระทบของมุมเอียงของหลังคาต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

จากรูปที่ 6 พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้นตามมุมเอียงของหลังคาที่มากขึ้น ยกเว้นที่มุมเอียง 45 องศา ที่พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลจากการสูญเสียเนื่องจากการหมุนวนของอากาศ

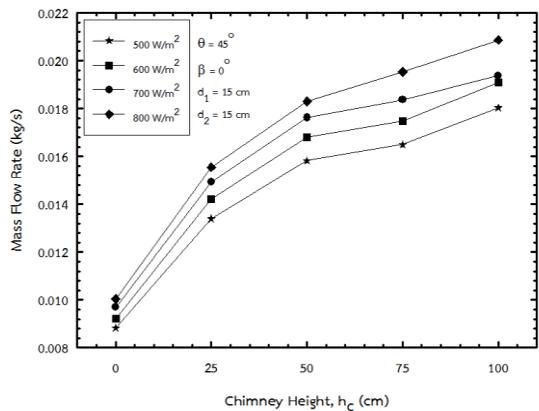


รูปที่ 6 ผลกระทบของมุมเอียงของหลังคาต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

นอกจากนั้นยังพบอีกว่าการเพิ่มมุมเอียงของหลังคาสามารถเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศได้ค่อนข้างมาก ดังจะเห็นได้จากความชันของเส้นกราฟที่เกือบจะเป็น 45 องศา ที่ทุก ๆ ความเข้มของแสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้นอาจจะต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ เช่น รูปลักษณ์ของอาคารโดยรวม ความสวยงามหรือต้นทุนวัสดุที่ต้องใช้ในการทำหลังคา เป็นต้น

### 3.2 ผลกระทบของความสูงของปล่องต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

จากรูปที่ 7 พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงของปล่อง ซึ่งเป็นผลของ Stack Effect กล่าวคืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแปรผันตรงกับระยะความสูงในแนวตั้งระหว่างช่องทางเข้าและช่องทางออกของอากาศ



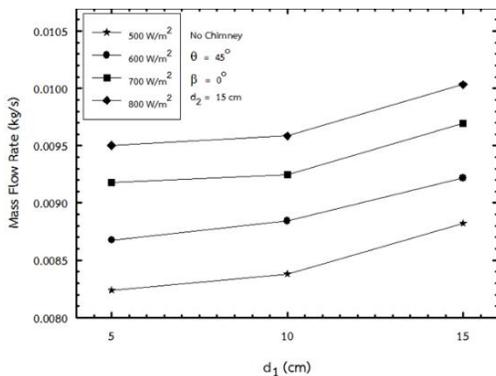
รูปที่ 7 ผลกระทบของความสูงปล่องต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

จากรูปจะเห็นได้ว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงความสูงของปล่องจาก 0 ไปจนถึง 50 เซนติเมตร จากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อย พิจารณาได้จากความชันของเส้นกราฟที่มากในช่วงแรกและน้อยลงหลังค่า  $h_c = 50$  เซนติเมตร เป็นต้นไป เหตุที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศลดลงในช่วงความสูงปล่องตั้งแต่ 50 เซนติเมตร เป็นต้นไปนั้นคาดว่าน่าจะเกิดจาก

การสูญเสียอันเนื่องมาจากความเสียดทานภายในปล่องที่มากขึ้นเมื่อปล่องสูงหรือมีระยะที่ยาวขึ้น

### 3.3 ผลกระทบของความกว้างของช่องทางเข้าของอากาศต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

จากรูปที่ 8 พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจะสูงขึ้นเมื่อความกว้างของช่องทางเข้าของอากาศสูงขึ้น โดยสามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ 6 เปอร์เซ็นต์ ที่  $d_1$  เท่ากับ 15 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับกรณี  $d_1$  เท่ากับ 5 เซนติเมตร การเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลนี้เกิดจากพื้นที่หน้าตัดการไหลของทางเข้าช่องอากาศเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

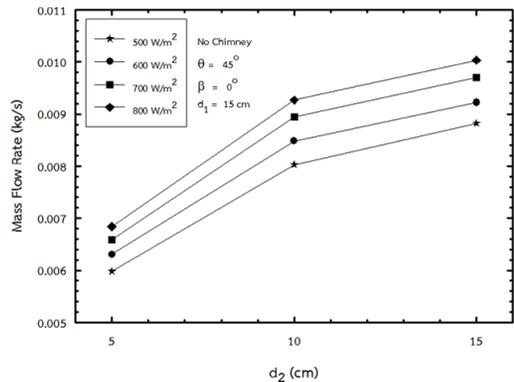


รูปที่ 8 ผลกระทบของความกว้างของช่องทางเข้าของอากาศต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

### 3.4 ผลกระทบของความกว้างของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคาต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

จากรูปที่ 9 พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศสูงขึ้นตามขนาดของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคาที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการเพิ่มสูงสุดเมื่อเพิ่มความกว้างของช่องทางไหลจาก 5 เซนติเมตร เป็น 10 เซนติเมตร โดยเพิ่มขึ้นถึง 36 เปอร์เซ็นต์ แต่อัตราการเพิ่มขึ้นจะลดลงเมื่อเพิ่มความกว้างของช่องทางไหลจาก 10 เซนติเมตร เป็น 15 เซนติเมตร ดังจะเห็นได้จากความชันของเส้นกราฟทั้งสองช่วงในรูปที่ 9 ซึ่งเหตุของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ คือเหตุเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของช่องทางเข้าของอากาศที่กล่าว

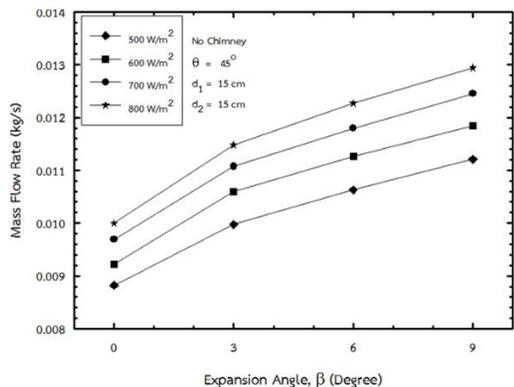
ไว้ก่อนหน้านั้น นั่นคือเมื่อพื้นที่หน้าตัดการไหลมากขึ้นย่อมส่งผลให้อัตราการไหลของอากาศสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 9 ผลกระทบของความกว้างของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคาต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

### 3.5 ผลกระทบของการบานตัวของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคาต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

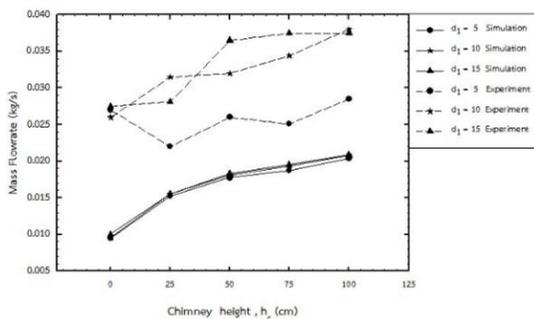
จากรูปที่ 10 พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจะสูงขึ้นตามมุมบานตัวของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคาที่มากขึ้น ซึ่งนับว่าเป็นการพบที่สำคัญมาก เพราะเพียงเพิ่มการบานตัวของช่องทางไหลของอากาศโดยไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอาคารหรือเพิ่มค่าใช้จ่ายในการลงทุนเพิ่มเติมแต่อย่างใด แต่กลับสามารถเพิ่มการระบายอากาศได้ค่อนข้างมาก โดยที่มุมบานตัว 3 องศา อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้นถึง 14 เปอร์เซ็นต์ และสูงสุดถึง 29 เปอร์เซ็นต์ ที่มุมบานตัวเท่ากับ 9 องศา



รูปที่ 10 ผลกระทบของมุมบานตัวของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคาต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

### 3.6 การเปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลการทดลอง

นำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองกรณีความเข้มข้นของแสงอาทิตย์เท่ากับ 800 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่ค่าความสูงปล่องและความกว้างของช่องอากาศต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ P. Tongbai et al [21] ที่กรณีเดียวกันกับการทดลอง นั่นคือ มุมเอียงของหลังคาเท่ากับ 45 องศา ไม่มีการบานตัวของช่องทางไหล ( $\beta=0$ ) ความกว้างของช่องทางไหลเท่ากับ 15 เซนติเมตร ผลการเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 11 จะเห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation นั้นมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมากแต่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง โดยค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้การจำลองเสมอเนื่องจากในขณะที่ทำการทดลองมีผลกระทบจากการไหลของอากาศที่ไหลเข้าบ้านจำลองอันเนื่องมาจากแรงลมที่อยู่รอบ ๆ ตัวบ้านในระหว่างทำการทดลอง จึงทำให้ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ได้มีค่าสูงกว่าการจำลองด้วยโปรแกรมนั้นเอง โดยค่าความแตกต่างของผลลัพธ์จากการจำลองและการทดลองสูงสุด 44.7 เปอร์เซ็นต์ (ที่ความสูงปล่อง 100 เซนติเมตร ความกว้างของช่องทางเข้าของอากาศ 10 เซนติเมตร) ต่ำสุด 29.3 เปอร์เซ็นต์ (ที่ความสูงของปล่อง 100 เซนติเมตร ความกว้างของช่องทางเข้าของอากาศ 10 เซนติเมตร) อย่างไรก็ตามความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลกระทบเชิงบวก นั่นคือในทางปฏิบัติจริงนั้นการไหลที่เกิดขึ้นจริงจะมีผลกระทบเนื่องจากแรงลมภายนอกอาคารด้วย ซึ่งจะช่วยให้ค่าอัตราการไหลของอากาศได้มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลการทดลองของ P. Tongbai et al [21]

### 4. สรุป

ผลลัพธ์จากการจำลองปัญหาการไหลในสามมิติผ่านอาคารขนาดเล็กด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation เพื่อศึกษาผลกระทบจากความเข้มข้นของแสงอาทิตย์และตัวแปรทางโครงสร้างต่าง ๆ ของอาคารสามารถสรุปผลได้ว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

1. ความเข้มข้นของแสงอาทิตย์มีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแสงอาทิตย์จาก 500 วัตต์ต่อตารางเมตร เป็น 800 วัตต์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้น 13.6 เปอร์เซ็นต์ ที่กรณีบ้านไม่มีปล่อง หลังคาเอียง 60 องศา ไม่มีการบานตัวของช่องทางไหล ช่องทางเข้าและช่องทางไหลของอากาศมีค่าเท่ากับ 15 เซนติเมตร
2. มุมเอียงของหลังคามีผลโดยตรงกับต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ เมื่อเพิ่มมุมเอียงของหลังคาจาก 15 องศา เป็น 30 องศา อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มมากขึ้นถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในการเลือกใช้งานอาจต้องคำนึงถึงต้นทุนในการก่อสร้าง เพราะหากมุมเอียงของหลังคาจำเป็นต้องใช้กระจกหรือวัสดุโปร่งใสมากขึ้นตามไปด้วย
3. ความสูงของปล่องมีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ เมื่อเพิ่มความสูงของปล่องเป็น 25 เซนติเมตร อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้น 62 เปอร์เซ็นต์ (เทียบกับกรณีไม่มีปล่อง)
4. ความกว้างช่องทางเข้าของอากาศมีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ เมื่อเพิ่มความกว้างของช่องทางเข้าของอากาศจาก 5 เซนติเมตร เป็น 10 เซนติเมตร อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้น 6 เปอร์เซ็นต์
5. ความกว้างของช่องการไหลของอากาศใต้หลังคามีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ เมื่อเพิ่มความกว้างของช่องการไหลจาก 5 เซนติเมตร เป็น 15 เซนติเมตร อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มมากขึ้นถึง 47 เปอร์เซ็นต์

6. มุมบานตัวของช่องทางไหลของอากาศใต้หลังคา มีผลโดยตรงต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเมื่อเพิ่มมุมบานตัว ( $\beta$ ) เป็น 3 องศา และ 9 องศา ตามลำดับ ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มขึ้น 14 เปอร์เซ็นต์ และ 29 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นับเป็นการพบแนวทางการออกแบบที่น่าสนใจ เพราะเมื่อเพิ่มมุมบานตัวของช่องทางไหลของอากาศโดยไม่เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเพิ่มต้นทุนการก่อสร้างแต่อย่างใด แต่สามารถเพิ่มการระบายอากาศได้มากขึ้น

7. ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองและการทดลอง เป็นไปในลักษณะเดียวกัน ซึ่งจะสามารถช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการศึกษาไปได้มาก

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่สนับสนุนพื้นที่ในการทำวิจัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. K. Bansal, R. Methur, and M. S. Bhandari "Solar chimney stack ventilation," *Building and Environment*, vol. 28, no. 3, pp. 373-377, Jul. 1993.
- [2] N. K. Bansal, J. Methur, S. Methur, and Jane M. "Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation," *Building and Environment*, vol. 40, no. 10, pp. 373-377. Oct. 2005.
- [3] M. M. Padki and S. A. Sherif "On a simple analytical model for solar chimneys," *International Journal of Energy Research*, vol. 23, no. 4, pp. 345-349, 1999.
- [4] C. Afonso and A. Oliveira "Solar chimneys: simulation and experiment," *Energy and Buildings*, vol. 32, no. 1, pp. 71-79, 2000.
- [5] G. Gan "A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings," *Energy and Buildings*, vol. 27, no. 1, pp. 37-43, 1998.
- [6] I. Hamdy and M. Fikry "Passive solar ventilation," *Renewable Energy*, vol. 14, no. 1-4, pp. 381-386, 1998.
- [7] X. Q. Zhai, Y. J. Dai, and R. Z. Wang, "Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors," *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, no. 5-6, pp. 741-757, Apr. 2005.
- [8] N. Gao, Y. Yan, R. Sun, and Y. Lei "Natural Ventilation Enhancement of a Roof Solar Chimney with Wind-Induced Channel," *Energies*, vol. 15, no. 17, pp. 6492, 2022.
- [9] O. Ardila, J. Quiroga, and C. Amaris "Assessment of solar chimney potential for passive ventilation and thermal comfort in the northeast of Colombia," *Results in Engineering*, vol. 20, pp. 101641, 2023.
- [10] J. Hirunlabh, S. Washirapuwadon, N. Pratinthong, and J. Khedari, "New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation," *Building and Environment*, vol. 36, no. 3, pp. 383-391, Apr. 2001.
- [11] J. Khedari, J. Hirunlabh, and T. Bunnag, "Experimental study of a roof solar collector towards the natural ventilation of

- new houses," *Energy and Buildings*, vol. 26, no. 2, pp. 159-164, 1997.
- [12] J. Khedari, W. Mansirisub, S. Chaima, N. Pratinthong, and J. Hirunlabh "Field measurements of performance of roof solar collector," *Energy and Buildings*, vol. 31, no. 3, pp. 171-178, 2000.
- [13] J. Khedari, S. Ingkawanich, J. Waewsak, and J. Hirunlabh "A PV system enhanced the performance of roof solar collector," *Building and Environment*, vol. 37, no. 12, pp. 1317-1320, 2002.
- [14] J. Khedari, P. Yimsamerjit, and J. Hirunlabh "Experimental investigation of free convection in roof solar collector," *Building and Environment*, vol. 37, no. 5, pp. 455-459, 2002.
- [15] P. Tongbai and T. Chitsomboon, "The Use of Attic and Chimney to Enhance Air Ventilation: A Numerical Analysis," in *Proceedings of the 18<sup>th</sup> National Mechanical Engineering Conference*, Khonkaen, Thailand, 2004, pp. 263-268.
- [16] A. Koonsrisuk and T. Chitsomboon, "Effect of Tower Area Change on the Potential of Solar Tower," in *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Join International Conference on "Sustainable Energy and Environment"*, Bangkok, Thailand. 2006.
- [17] P. Tongbai and T. Chitsomboon, "Enhancements of solar chimney for building ventilation," in *Proceedings of the 4<sup>th</sup> Conference on Energy Network of Thailand*, Nakhon Pathom, Thailand, 2008.
- [18] P. Tongbai and T. Chitsomboon, "Parameters Affecting Ventilation in Building using Solar Chimney," in *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> National Mechanical Engineering Conference*, Thailand, 2008.
- [19] P. Tongbai and T. Chitsomboon, "Efficiency Enhancement for Natural Ventilation in Building Using Solar Chimney System," in *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> National Mechanical Engineering Conference*, Chiangmai, Thailand, 2008.
- [20] P. Tongbai and T. Chitsomboon, "Three Dimensional Simulation of Natural Ventilation in Building using Solar Chimney System," in *Proceedings of the 25<sup>th</sup> National Mechanical Engineering Conference*, Krabi, Thailand, 2011.
- [21] P. Tongbai and T. Lekpradit, "Experimental Investigation on the Natural Ventilation in Building by Using Integrated Roof Solar Collector and Chimney," in *Proceedings of the 31<sup>st</sup> National Mechanical Engineering Conference*, Nakhon Nayok, Thailand, 2017. pp. 195-202.
- [22] J. M. Cimbala and Y. A. Cengel, "in *Essential of Fluid Mechanics*," Higher de. New York: McGraw-Hill 2008.

## ผลของน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรดต่อความเหนียว และการจัดคราบเปื้อนบนสิ่งทอ

ศศิประภา รัตนดิถก ณ ฎุเกีต\* และ กิตติกานต์ ทังหิกรณ

คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

---

รับบทความ 2 สิงหาคม 2567. แก้ไขบทความ 20 พฤษภาคม 2568 ตอรับบทความ 3 กรกฎาคม 2568

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา วิธีการผลิตน้ำหมักชีวภาพสับปะรดและน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด รวมถึงศึกษาผลของน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรดต่อความเหนียวของผ้า ความสามารถในการจัดคราบเปื้อน และความคงตัวระหว่างการเก็บรักษา ผลการศึกษา พบว่า การหมักสับปะรดด้วยไวท์อีเอ็ม ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 23 วัน จะได้น้ำหมักที่ไม่มีกลิ่นเหม็น และสามารถนำไปผลิตน้ำยาปรับผ้านุ่มได้ ผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรดมีค่าเฉลี่ยความเหนียวมากกว่าผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มทั่วไปทั้งในแนวด้ายยืนและในแนวด้ายพุ่ง ในขณะที่ผ้าฝ้ายและผ้าโพลีเอสเตอร์มีค่าเฉลี่ยความเหนียวลดลง น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรดไม่มีผลต่อความเหนียวของผ้าฝ้าย ผ้าโพลีเอสเตอร์ และผ้าไหม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 นอกจากนี้ น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรดสามารถจัดคราบเนมและคราบซ็อกโกแลตบนผ้าไหมได้

คำสำคัญ : ฝ้าย; ไหม; โพลีเอสเตอร์; น้ำยาปรับผ้านุ่ม; สับปะรด

---

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1929 1474, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: agrsspp@ku.ac.th

# The Effects of Fabric Softener from Pineapple Bioextract on Tenacity and Stains Removal on Textiles

Sasiprapha Rattanadilok Na Phuket\* and Kittikarn Thunhikorn

Faculty of Agriculture, Kasetsart University

50 Ngamwongwan Road, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok, 10900

---

*Received 2 August 2024; Revised 20 May 2025; Accepted 3 July 2025*

## Abstract

The objectives of this research were to study the preparation methods of pineapple bioextract and the fabric softener from pineapple bioextract. It also investigated the effects of the fabric softener from pineapple bioextract on tenacity of fabrics, stains removal ability, and storage stability. The results showed that pineapple bioextract without bad smell was obtained by fermenting pineapple with White EM (White Effective Microorganisms) at room temperature for 23 days and could be used to produce fabric softener. Silk fabric soaked in fabric softener from pineapple bioextract had average tenacity more than those of soaking in commercial one both in warp and weft directions, whereas cotton and polyester fabrics were lessen. Fabric softener from pineapple bioextract did not significantly affect the tenacity of cotton, polyester, and silk fabrics at the .05 level. Additionally, fabric softener from pineapple bioextract could remove milk and chocolate stains on silk fabric.

**Keywords :** Cotton; Silk; Polyester; Fabric softener; Pineapple

---

\* Corresponding Author. Tel.: +668 1929 1474, E-mail Address: agrspp@ku.ac.th

## 1. บทนำ

เส้นใ้ผ้าเครื่องนุ่งห่ม เป็นหนึ่งในปัจจัยสี่ที่มีความสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ผ้าฝ้ายเป็นผ้าที่ได้รับความนิยมสูงสุดในการนำมาผลิตเส้นใ้ผ้าเครื่องนุ่งห่ม เนื่องจากใยฝ้ายเป็นใยธรรมชาติ (Natural Fiber) มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นเซลลูโลส (Cellulose) ทำให้ดูดซับน้ำและความชื้นได้ดี และระบายอากาศได้ดี ผ้าฝ้ายจึงเป็นผ้าที่ทำให้รู้สึกสบายเมื่อสวมใส่ เส้นใ้ที่นิยมมากเป็นอันดับ 2 รองจากใยฝ้าย คือ โยพลีเอสเตอร์ (Polyester) ซึ่งเป็นใยสังเคราะห์ (Synthetic Fiber) มีองค์ประกอบทางเคมีเป็น โพลีเอสเตอร์ (Polyester) เป็นเส้นใ้ที่มีความเหนียวสูง และมีการคืนตัวจากรอยยับดี ส่วนไหม (Silk) เป็นเส้นใ้ธรรมชาติที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นโปรตีน (Protein) เป็นเส้นใ้ที่ได้รับความนิยมและได้รับการยอมรับว่าเป็นราชินีแห่งเส้นใ้ เนื่องจากมีความสวยงามและเงามัน อย่างไรก็ตามผ้าที่ผลิตจากเส้นใ้ต่างชนิดนี้มีวิธีการดูแลรักษาที่แตกต่างกัน เช่น ผ้าฝ้าย และผ้าโพลีเอสเตอร์สามารถทำความสะอาดด้วยวิธีการซักน้ำได้ ส่วนผ้าไหมนิยมทำความสะอาดด้วยวิธีการซักแห้งมากกว่าการซักน้ำ [1], [2]

น้ำยาปรับผ้านุ่มเป็นสารช่วยซักหลังการทำความสะอาดผ้า (After-treatment Aid) ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในกระบวนการทำความสะอาดผ้าด้วยการซักน้ำ เนื่องจากช่วยลดการเกิดไฟฟ้าสถิตบนเส้นใ้ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Fibers) เช่น ไนลอน และโพลีเอสเตอร์ นอกจากนี้ยังทำให้เส้นใ้พองฟู และทำให้ผ้ามีความฟูและอ่อนนุ่ม โดยองค์ประกอบหลักที่สำคัญของน้ำยาปรับผ้านุ่มคือ สารลดแรงตึงผิวประจุบวก (Cationic Surfactant) [3], [4]

สับปะรดเป็นผลไม้เขตร้อนที่มีวิตามิน แร่ธาตุ ใยอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย และมีเอนไซม์บรอมีเลน (Bromelain) ซึ่งมีหน้าที่ช่วยย่อยโปรตีนโดยสามารถพบได้ในทุกส่วนของสับปะรด [5], [6] นอกจากนี้จะนำสับปะรดมาบริโภคในรูปแบบของผลไม้สดและใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารแล้ว สับปะรดยังสามารถนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น สับปะรดกระป๋อง สับปะรดอบแห้ง สับปะรด

กวน น้ำสับปะรด น้ำส้มสายชู และไวน์สับปะรด นอกจากนี้ใบสับปะรดยังสามารถนำไปผลิตเป็นเส้นใ้ (Pineapple Leaf Fiber) และใช้เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) ได้อีกด้วย [7]-[10] อย่างไรก็ตาม ในการนำสับปะรดมาบริโภคหรือแปรรูปนั้น ยังคงมีส่วนของสับปะรดที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ เช่น เปลือก แกน และเนื้อสับปะรดบางส่วน ดังนั้นการนำน้ำหมักชีวภาพสับปะรดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ เช่น ทำปุ๋ยในการเกษตร ใช้ผสมน้ำรดต้นไม้เพื่อช่วยให้ต้นไม้เจริญเติบโตได้ดี และใช้เป็นส่วนผสมในสารทำความสะอาดสำหรับเช็ดกระจก ล้างห้องน้ำ ล้างรถ และซักผ้า จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับสับปะรดที่เหลือทิ้ง เน่าเสีย หรือล้นตลาด

การศึกษาค้นคว้าวิจัยสนใจผลิตน้ำยาปรับผ้านุ่มที่นอกจากจะมีสมบัติทั่วไปของน้ำยาปรับผ้านุ่มแล้ว ยังสามารถช่วยขจัดคราบเปื้อนที่ขจัดไม่หมดจากการซักน้ำ เนื่องจากสับปะรดมีเอนไซม์บรอมีเลนที่ช่วยย่อยโปรตีนได้อีกทั้งเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับสับปะรด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา 1) วิธีการผลิตน้ำหมักชีวภาพสับปะรดและน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด 2) ผลของน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรดต่อความเหนียวของผ้าฝ้าย ผ้าไหม และผ้าโพลีเอสเตอร์ 3) ความสามารถของน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรดในการขจัดคราบโปรตีน คราบน้ำมัน และคราบผสม บนผ้าฝ้าย ผ้าไหม และผ้าโพลีเอสเตอร์ และ 4) ความคงตัวระหว่างการเก็บรักษาน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 วัสดุและสารเคมี

1. สับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย จากบริษัท สยามแม็คโคร จำกัด ประเทศไทย
2. หัวเขื่อน้ำยาปรับผ้านุ่ม Tetranyl AL-TH (Cationic Quaternary Salt Surfactant) จากบริษัท ฮงฮวด จำกัด ประเทศไทย

3. หัวเชื้อน้ำหอม กลิ่น Pink Scent จากบริษัท ฮงฮวด จำกัด ประเทศไทย

4. ไวท์อีเอ็ม (White Effective Microorganisms) จากร้านชมรมเกษตรอินทรีย์ก้าวหน้า ประเทศไทย

5. ผ้าฝ้าย 100 เปอร์เซ็นต์ ทอลายขัดสมดุค มีเส้นด้ายยืน 136 เส้น และเส้นด้ายพุ่ง 76 เส้น ใน 1 ตารางนิ้ว

6. ผ้าไหม 2 เส้น ทอลายขัดสมดุค มีเส้นด้ายยืน 109 เส้น และเส้นด้ายพุ่ง 71 เส้น ใน 1 ตารางนิ้ว

7. ผ้าโพลีเอสเตอร์ 100 เปอร์เซ็นต์ ทอลายขัดสมดุค มีเส้นด้ายยืน 140 เส้น และเส้นด้ายพุ่ง 90 เส้น ใน 1 ตารางนิ้ว

8. นมยูเอชทีรสจืด ยี่ห้อโฟร์โมสต์ (คราบโปรตีน)

9. น้ำมันพืช ยี่ห้ออมรท (คราบน้ำมัน)

10. ซ็อกโกแลตนม ยี่ห้อเฮอร์ชีย์ และทำให้เป็นซ็อกโกแลตเหลวโดยละลายในน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1:3 (คราบผสม)

11. น้ำยาปรับผ้านุ่มที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ (น้ำยาปรับผ้านุ่มทั่วไป)

## 2.2 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบ

1. เครื่องวัดค่าสี (Spectrophotometer) Spectraflash 550 (Xenon Flash Lamp, Diffuse/8) รุ่น 550 ยี่ห้อ Datacolor

2. เครื่องทดสอบแรงกดแรงดึง (Tensile and Compression Testing Machine) รุ่น 5567 ยี่ห้อ Instron

## 2.3 ขั้นตอนการวิจัย

### 2.3.1 การผลิตน้ำหมักชีวภาพสับปะรด

นำสับปะรด 3 กิโลกรัม ที่ผ่านการทำความสะอาด และหั่นให้เป็นชิ้นขนาดเล็ก น้ำสะอาด 5 ลิตร และไวท์อีเอ็ม 400 มิลลิลิตร ใส่ในถังพลาสติกสำหรับหมักและคนให้เข้ากัน ปิดฝา หมักที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 23 วัน โดยเปิดฝาแล้วกวนเพื่อเติมอากาศทุก ๆ 3 วัน ครั้งละ 5

นาที เมื่อครบ 23 วัน นำน้ำหมักที่ได้มากรองเอากากออก จะได้น้ำหมักสับปะรดที่ต้องการ

### 2.3.2 การผลิตน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด

ต้มน้ำสะอาด 1.25 ลิตร น้ำหมักชีวภาพสับปะรด 1.25 ลิตร และหัวเชื้อน้ำยาปรับผ้านุ่ม 200 กรัม และกวนให้เข้ากันจนถึงอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ยกออกจากเตา พักรอให้อุณหภูมิลดลงจนถึง 30 องศาเซลเซียส แล้วใส่หัวเชื้อน้ำหอม 10 มิลลิลิตร

### 2.3.3 การทดสอบความเหนียวของผ้าฝ้าย ผ้าไหม และผ้าโพลีเอสเตอร์ หลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด

ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ผ้าฝ้าย ผ้าไหม และผ้าโพลีเอสเตอร์ เป็นตัวอย่างของผ้าที่มีองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเป็นเซลลูโลส (Cellulose) โปรตีน (Protein) และโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ตามลำดับ โดยแช่ผ้าฝ้าย ผ้าไหม และผ้าโพลีเอสเตอร์ ขนาด 10 x 20 เซนติเมตร ในน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด และน้ำยาปรับผ้านุ่มทั่วไป โดยใช้อัตราส่วนน้ำยาปรับผ้านุ่มต่อน้ำสะอาด 1:5 เป็นเวลา 30 นาที แล้วตากให้แห้งโดยไม่ต้องล้างออก หลังจากนั้นนำผ้าทดสอบไปทดสอบความเหนียวของเส้นใยผ้าตามมาตรฐาน ASTM D 5034:2009 [11] โดยใช้อัตราเร็วในการทดสอบ 300 ± 10 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะทดสอบ 75 ± 1 มิลลิเมตร ทดสอบในสภาวะอุณหภูมิ 21 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 2 เปอร์เซ็นต์

### 2.3.4 การศึกษาความสามารถของน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรดในการขจัดคราบโปรตีน คราบน้ำมัน และคราบผสม บนผ้าฝ้าย ผ้าไหม และผ้าโพลีเอสเตอร์ หลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด

ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้นมยูเอชทีรสจืด น้ำมันพืช และซ็อกโกแลตเหลว เป็นตัวอย่างคราบโปรตีน คราบน้ำมัน และคราบผสม ตามลำดับ [3] และศึกษา

ความสามารถในการขจัดคราบโดยการเปรียบเทียบค่าสีของคราบหลังแช่น้ำเปล่ากับค่าสีของคราบหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ โดยหยดนมยูเอชทีรสจืด น้ำมันพืช และซีอิ้วโกแลตเหลว 10 ไมโครลิตร บนผ้าฝ้าย ผ้าไหม และผ้าโพลีเอสเตอร์ ขนาด 10 x 10 เซนติเมตร ที่ถูกซึ่งให้ตั้งและไม่สัมผัสกับวัสดุอื่น นำผ้าทดสอบที่หยดคราบแล้วไปแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ และแช่ผ้าควบคุม (Control) ในน้ำสะอาด ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปฝั่งลมนจนแห้ง หลังจากนั้นวัดค่าสีของคราบบนผ้าควบคุมและผ้าทดสอบด้วยเครื่องวัดค่าสี

### 2.3.5 การศึกษาความคงตัวระหว่างการเก็บรักษา น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ

ใส่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ ในขวดพลาสติกใส ปิดฝา ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง สังเกตลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ การแยกชั้น กลิ่น และสี ของน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละทุก 7 วัน

### 2.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

1. วิเคราะห์ความเหนียว (Tenacity) และค่าสี ( $L^*$   $a^*$   $b^*$   $C^*$  และ  $h$ ) โดยการหาค่าเฉลี่ย

2. เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเหนียว (Tenacity) ของผ้า และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าสีของคราบ ด้วยสถิติทดสอบที่แบบอิสระต่อกัน (Independent sample t-test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

## 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

### 3.1 วิธีการผลิตน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ และน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ

จากการทดลอง พบว่า การทำน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละสามารถกำหนดระยะเวลาการหมักได้แตกต่างกัน และสามารถใช้ระยะเวลาหมักได้น้อยกว่า 3 เดือน โดยจากการทดลองหมักน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละเป็นระยะเวลา 23 วัน พบว่า น้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละที่ได้มีสีเหลือง (รูปที่ 1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 3.5 และ

ไม่มีกลิ่น เมื่อนำไปผลิตน้ำยาปรับผ้านุ่ม พบว่า น้ำยาปรับผ้านุ่มที่ได้มีค่า pH 4 ไม่มีกลิ่นเหม็น และมีสีเหลืองนวล (รูปที่ 2) ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีความน่าใช้ นอกจากนี้ สีจะไม่ติดผ้าที่แช่ในน้ำยาปรับผ้านุ่มที่ผลิตได้



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)



(จ)

(ฉ)

รูปที่ 1 น้ำหมักสัปดาห์ละเปิดเพื่อคนครั้งที่: (ก) 1 (ข) 2

(ค) 3 (ง) 4 (จ) 5 และ (ฉ) 6



(ก)

(ข)

รูปที่ 2 ภาพถ่าย: (ก) น้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ และ

(ข) น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ

### 3.2 ผลของน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพ สับปะรดต่อความเหนียวของผ้าฝ้าย ผ้าไหม และผ้าโพลีเอสเตอร์

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยความเหนียวของผ้าหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่ม

ชนิดผ้า	ค่าเฉลี่ยความเหนียว (Tenacity) (gf)			
	แนวด้ายยืน		แนวด้ายพุ่ง	
	แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มทั่วไป	แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพ สับปะรด	แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มทั่วไป	แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพ สับปะรด
ผ้าไหม	1,484.81	1,487.37	439.27	452.65
ผ้าโพลีเอสเตอร์	1,385.02	1,346.15	937.58	933.94
ผ้าฝ้าย	1,115.35	1,102.93	622.50	595.27

จากตารางที่ 1 พบว่า ผ้าไหม ผ้าฝ้าย และผ้าโพลีเอสเตอร์มีค่าเฉลี่ยความเหนียว (Tenacity) ในแนวด้ายยืนสูงกว่าแนวด้ายพุ่ง ผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มทั่วไปไม่มีค่าเฉลี่ยความเหนียวในแนวด้ายยืนและแนวด้ายพุ่ง 1,484.81 และ 439.27 กรัมแรง ตามลำดับ ผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรดมีค่าเฉลี่ยความเหนียวในแนวด้ายยืนและแนวด้ายพุ่ง 1,487.37 และ 452.65 กรัมแรง ตามลำดับ จึงอาจกล่าวได้ว่า ผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรดมีค่าเฉลี่ยความเหนียวมากกว่าผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มทั่วไปทั้งในแนวด้ายยืนและแนวด้ายพุ่ง และน้ำหมักชีวภาพสับปะรดไม่ได้ทำลายโครงสร้างเคมีของผ้าไหมที่เป็นโปรตีน จึงไม่ทำให้ผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรดมีค่าเฉลี่ยความเหนียวน้อยกว่าผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มทั่วไป

ผ้าโพลีเอสเตอร์และผ้าฝ้ายที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มทั่วไปไม่มีค่าเฉลี่ยความเหนียวในแนวด้ายยืน 1,385.02 และ 1,115.35 กรัมแรง ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยความเหนียวในแนวด้ายพุ่ง 937.58 และ 622.50 กรัมแรง

ตามลำดับ ผ้าโพลีเอสเตอร์และผ้าฝ้ายที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรดมีค่าเฉลี่ยความเหนียวในแนวด้ายยืน 1,346.15 และ 1,102.93 กรัมแรง ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยความเหนียวในแนวด้ายพุ่ง 933.94 และ 595.27 กรัมแรง ตามลำดับ จึงอาจกล่าวได้ว่า ผ้าโพลีเอสเตอร์และผ้าฝ้ายที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรดมีค่าเฉลี่ยความเหนียวน้อยกว่าผ้าที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มทั่วไป

อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างค่าเฉลี่ยความเหนียวของผ้า พบว่า ผ้าฝ้าย ผ้าไหม และผ้าโพลีเอสเตอร์ ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มทั่วไปและที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด มีค่าเฉลี่ยความเหนียวไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ทั้งในแนวด้ายยืนและด้ายพุ่ง

### 3.3 ความสามารถของน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรดในการขจัดคราบโปรตีน คราบน้ำมัน และคราบผสม บนผ้าฝ้าย ผ้าไหม และผ้าโพลีเอสเตอร์ หลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ย L\* a\* b\* C\* และ h ของผ้าที่เข็นคราบนม หลังแช่น้ำเปล่าและหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด

ผ้าทดสอบ	ค่าเฉลี่ยค่าสี				
	L*	a*	b*	C*	h
ผ้าไหมที่แช่น้ำเปล่า	83.33	-2.18	8.83	9.10	103.85
ผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่ม	86.77	-0.79	1.48	1.68	118.34
ผ้าฝ้ายที่แช่น้ำเปล่า	88.40	-0.52	0.84	0.99	121.80
ผ้าฝ้ายที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่ม	88.27	-0.55	0.89	1.05	121.79
ผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำเปล่า	86.03	-1.85	3.69	4.13	116.66
ผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่ม	86.11	-1.83	3.38	3.84	118.42

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ย  $L^*$   $a^*$   $b^*$   $C^*$  และ  $h$  ของผ้าที่เป็นคราบน้ำมันพืช หลังแช่น้ำเปล่าและหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ

ผ้าทดสอบ	ค่าเฉลี่ยค่าสี				
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h$
ผ้าไหมที่แช่น้ำเปล่า	84.31	-1.18	2.65	2.90	113.89
ผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่ม	82.76	-1.34	4.34	4.55	107.16
ผ้าฝ้ายที่แช่น้ำเปล่า	86.97	-0.60	1.12	1.27	118.04
ผ้าฝ้ายที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่ม	86.77	-0.79	1.48	1.68	118.34
ผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำเปล่า	84.63	-2.04	3.31	3.89	121.58
ผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่ม	84.65	-2.05	3.32	3.90	121.69

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ย  $L^*$   $a^*$   $b^*$   $C^*$  และ  $h$  ของผ้าที่เป็นคราบช็อกโกแลต หลังแช่น้ำเปล่าและหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ

ผ้าทดสอบ	ค่าเฉลี่ยค่าสี				
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h$
ผ้าไหมที่แช่น้ำเปล่า	66.52	7.28	21.40	22.60	71.20
ผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่ม	78.30	2.20	12.32	12.53	80.44
ผ้าฝ้ายที่แช่น้ำเปล่า	46.21	14.16	26.90	30.40	62.23
ผ้าฝ้ายที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่ม	50.00	14.61	30.67	33.98	64.13
ผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำเปล่า	82.01	-0.22	7.46	7.46	91.72
ผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่ม	83.37	-0.66	5.90	5.96	97.08

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2 พบว่าคราบนมบนผ้าไหมและผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ มีค่าเฉลี่ย  $L^*$  มากกว่าผ้าที่แช่น้ำเปล่า และคราบนมบนผ้าฝ้ายที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ มีค่าเฉลี่ย  $L^*$  น้อยกว่าผ้าที่แช่น้ำเปล่า โดยคราบนมที่มีค่าเฉลี่ย  $L^*$  สูงสุด คือ คราบนมบนผ้าฝ้ายที่แช่น้ำเปล่า (88.40) และคราบนมที่มีค่าเฉลี่ย  $L^*$  ต่ำสุด คือ คราบนมบนผ้าไหมที่แช่น้ำเปล่า

(83.33) เมื่อพิจารณาจากคราบน้ำมันพืช (ตารางที่ 3) พบว่า คราบน้ำมันพืชบนผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ มีค่าเฉลี่ย  $L^*$  มากกว่าผ้าที่แช่น้ำเปล่า คราบน้ำมันพืชบนผ้าไหมและผ้าฝ้ายที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ มีค่าเฉลี่ย  $L^*$  น้อยกว่าผ้าที่แช่น้ำเปล่า โดยคราบน้ำมันพืชที่มีค่าเฉลี่ย  $L^*$  สูงสุด คือ คราบน้ำมันพืชบนผ้าฝ้ายที่แช่น้ำเปล่า (86.97) และคราบน้ำมันพืชที่มีค่าเฉลี่ย  $L^*$  ต่ำสุด คือ คราบน้ำมันพืชบนผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ (82.76) และเมื่อพิจารณาจากคราบช็อกโกแลต (ตารางที่ 4) พบว่า คราบช็อกโกแลตบนผ้าไหม ผ้าฝ้าย และผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ มีค่าเฉลี่ย  $L^*$  มากกว่าผ้าที่แช่น้ำเปล่า โดยคราบช็อกโกแลตที่มีค่าเฉลี่ย  $L^*$  สูงสุด คือ คราบช็อกโกแลตบนผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ (83.37) และคราบช็อกโกแลตที่มีค่าเฉลี่ย  $L^*$  ต่ำสุด คือ คราบช็อกโกแลตบนผ้าฝ้ายที่แช่น้ำเปล่า (46.21) ทั้งนี้จึงอาจกล่าวได้ว่า ถ้าค่าเฉลี่ย  $L^*$  มากขึ้น คราบน่าจะถูกขจัดออกไป คราบจึงมีความสว่างเพิ่มขึ้น

ค่า  $a^*$  (ค่าความเป็นสีแดง - เขียว) ค่า  $a^*$  เป็นบวก (+) แสดงค่าความเป็นสีแดง และค่า  $a^*$  เป็นลบ (-) แสดงค่าความเป็นสีเขียว เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2) ซึ่งมีค่าเฉลี่ย  $a^*$  เป็นลบ แสดงค่าความเป็นสีเขียว พบว่า คราบนมบนผ้าไหมและผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ มีค่าเฉลี่ย  $a^*$  น้อยกว่าผ้าที่แช่น้ำเปล่า และคราบนมบนผ้าฝ้ายที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ละ มีค่าเฉลี่ย  $a^*$  มากกว่าผ้าที่แช่น้ำเปล่า โดยคราบนมที่มีค่าเฉลี่ย  $a^*$  สูงสุด คือ คราบนมบนผ้าไหมที่แช่น้ำเปล่า (-2.18) และคราบนมที่มีค่าเฉลี่ย  $a^*$  ต่ำสุด คือ คราบนมบนผ้าฝ้ายที่แช่น้ำเปล่า (-0.52) เมื่อพิจารณาจากคราบน้ำมันพืช (ตารางที่ 3) ซึ่งมีค่าเฉลี่ย  $a^*$  เป็นลบ แสดงค่าความเป็นสีเขียว พบว่า คราบน้ำมันพืชบนผ้าไหม ผ้า



น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด มีค่าเฉลี่ย  $C^*$  มากกว่าผ้าที่แช่น้ำเปล่า โดยคราบน้ำมันพืชที่มีค่าเฉลี่ย  $C^*$  สูงสุด คือ คราบน้ำมันพืชบนผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด (4.55) และคราบน้ำมันพืชที่มีค่าเฉลี่ย  $C^*$  ต่ำสุด คือ คราบน้ำมันพืชบนผ้าฝ้ายที่แช่น้ำเปล่า (1.27) และเมื่อพิจารณาจากคราบช็อกโกแลต (ตารางที่ 4) พบว่า คราบช็อกโกแลตบนผ้าไหมและผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด มีค่าเฉลี่ย  $C^*$  น้อยกว่าผ้าที่แช่น้ำเปล่า และคราบช็อกโกแลตบนผ้าฝ้ายที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด มีค่าเฉลี่ย  $C^*$  มากกว่าผ้าที่แช่น้ำเปล่า โดยคราบช็อกโกแลตที่มีค่าเฉลี่ย  $C^*$  สูงสุด คือ คราบช็อกโกแลตบนผ้าฝ้ายที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด (33.98) และคราบช็อกโกแลตที่มีค่าเฉลี่ย  $C^*$  ต่ำสุด คือ คราบช็อกโกแลตบนผ้าโพลีเอสเตอร์ในน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด (5.96)

ค่า  $h$  (ค่าตำแหน่งของสี) ค่า  $h$  เป็น 0 องศา แสดงว่าเป็นสีแดง ค่า  $h$  เป็น 90 องศา แสดงว่าเป็นสีเหลือง ค่า  $h$  เป็น 180 องศา แสดงว่าเป็นสีเขียว และค่า  $h$  เป็น 270 องศา แสดงว่าเป็นสีน้ำเงิน เมื่อพิจารณาจากคราบนม (ตารางที่ 2) พบว่า คราบนมบนผ้าไหมและผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด มีค่าเฉลี่ย  $h$  มากกว่าผ้าที่แช่น้ำเปล่า และคราบนมบนผ้าฝ้ายที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด มีค่าเฉลี่ย  $h$  น้อยกว่าผ้าที่แช่น้ำเปล่า โดยคราบนมที่มีค่าเฉลี่ย  $h$  สูงสุด คือ คราบนมบนผ้าฝ้ายที่แช่น้ำเปล่า (121.80) และคราบนมที่มีค่าเฉลี่ย  $h$  ต่ำสุด คือ คราบนมบนผ้าไหมที่แช่น้ำเปล่า (103.85) เมื่อพิจารณาจากคราบน้ำมันพืช (ตารางที่ 3) พบว่า คราบน้ำมันพืชบนผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด มีค่าเฉลี่ย  $h$  น้อยกว่าผ้าที่แช่น้ำเปล่า คราบน้ำมันพืชบนผ้าฝ้ายและผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด มีค่าเฉลี่ย  $h$

มากกว่าผ้าที่แช่น้ำเปล่า โดยคราบน้ำมันพืชที่มีค่าเฉลี่ย  $h$  สูงสุด คือ คราบน้ำมันพืชบนผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่ม (121.69) และคราบน้ำมันพืชที่มีค่าเฉลี่ย  $h$  ต่ำสุด คือ คราบน้ำมันพืชบนผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด (107.16) และเมื่อพิจารณาจากคราบช็อกโกแลต (ตารางที่ 4) พบว่า คราบช็อกโกแลตบนผ้าไหม ผ้าฝ้าย และผ้าโพลีเอสเตอร์ ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด มีค่าเฉลี่ย  $h$  มากกว่าผ้าที่แช่น้ำเปล่า โดยคราบช็อกโกแลตที่มีค่าเฉลี่ย  $h$  สูงสุด คือ คราบช็อกโกแลตบนผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด (97.08) และคราบช็อกโกแลตที่มีค่าเฉลี่ย  $h$  ต่ำสุด คือ คราบช็อกโกแลตบนผ้าฝ้ายที่แช่น้ำเปล่า (62.23)

ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างค่าเฉลี่ยค่าสีของคราบนมบนผ้าไหม ผ้าฝ้าย และผ้าโพลีเอสเตอร์ระหว่างหลังแช่น้ำเปล่า และหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด พบว่า ค่าเฉลี่ย  $L^*$  และ  $h$  ของคราบนมบนผ้าไหมหลังแช่น้ำเปล่ามีค่าต่ำกว่าหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด และค่าเฉลี่ย  $a^*$   $b^*$  และ  $C^*$  ของคราบนมบนผ้าไหมหลังแช่น้ำเปล่ามีค่าสูงกว่าหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ค่าเฉลี่ย  $L^*$   $a^*$   $b^*$   $C^*$  และ  $h$  ของคราบนมบนผ้าฝ้ายหลังแช่น้ำเปล่ามีค่าไม่แตกต่างจากหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ค่าเฉลี่ย  $L^*$  และ  $a^*$  ของคราบนมบนผ้าโพลีเอสเตอร์หลังแช่น้ำเปล่ามีค่าไม่แตกต่างจากหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ค่าเฉลี่ย  $b^*$  และ  $C^*$  ของคราบนมบนผ้าโพลีเอสเตอร์หลังแช่น้ำเปล่ามีค่าสูงกว่าหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด และค่าเฉลี่ย  $h$  ของคราบนมบนผ้าโพลีเอสเตอร์หลังแช่น้ำเปล่ามีค่าต่ำกว่าหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสับปะรด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างค่าเฉลี่ยค่าสีของคราบน้ำมันพืชบนผ้าไหม ผ้าฝ้าย และผ้าโพลีเอสเตอร์ระหว่างหลังแช่น้ำเปล่า และหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ พบว่า ค่าเฉลี่ย  $L^*$  และ  $h$  ของคราบน้ำมันพืชบนผ้าไหมหลังแช่น้ำเปล่ามีค่าสูงกว่าหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ และค่าเฉลี่ย  $a^*$   $b^*$  และ  $C^*$  ของคราบน้ำมันพืชบนผ้าไหมหลังแช่น้ำเปล่ามีค่าต่ำกว่าหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ค่าเฉลี่ย  $b^*$  ของคราบน้ำมันพืชบนผ้าฝ้ายหลังแช่น้ำเปล่ามีค่าต่ำกว่าหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ และค่าเฉลี่ย  $L^*$   $a^*$   $C^*$  และ  $h$  ของคราบน้ำมันพืชบนผ้าฝ้ายหลังแช่น้ำเปล่ามีค่าไม่แตกต่างจากหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ค่าเฉลี่ย  $L^*$   $a^*$   $b^*$   $C^*$  และ  $h$  ของคราบน้ำมันพืชบนผ้าโพลีเอสเตอร์หลังแช่น้ำเปล่ามีค่าไม่แตกต่างจากหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างค่าเฉลี่ยค่าสีของคราบซ็อกโกแลตบนผ้าไหม ผ้าฝ้าย และผ้าโพลีเอสเตอร์ระหว่างหลังแช่น้ำเปล่า และหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ พบว่า ค่าเฉลี่ย  $L^*$  และ  $h$  ของคราบซ็อกโกแลตบนผ้าไหมหลังแช่น้ำเปล่ามีค่าต่ำกว่าหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ และค่าเฉลี่ย  $a^*$   $b^*$  และ  $C^*$  ของคราบซ็อกโกแลตบนผ้าไหมหลังแช่น้ำเปล่ามีค่าสูงกว่าหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ค่าเฉลี่ย  $L^*$   $a^*$   $b^*$   $C^*$  และ  $h$  ของคราบซ็อกโกแลตบนผ้าฝ้ายและผ้าโพลีเอสเตอร์หลังแช่น้ำเปล่ามีค่าไม่แตกต่างจากหลังแช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จึงอาจกล่าวได้ว่า น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ สามารถช่วยขจัดคราบนมและคราบ

ซ็อกโกแลตบนผ้าไหมได้ ซึ่งอาจเนื่องมาจากเอนไซม์บรอมิเลนที่มีสมบัติในการช่วยย่อยโปรตีนสามารถย่อยโปรตีนที่อยู่ในคราบนมและคราบซ็อกโกแลตได้ จึงทำให้ค่าเฉลี่ย  $L^*$  เพิ่มขึ้น และ  $a^*$  และ  $b^*$  ลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 แต่ไม่สามารถขจัดคราบน้ำมันพืชได้

### 3.4 ความคงตัวระหว่างการเก็บรักษาน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์

จากการศึกษาความคงตัวระหว่างการเก็บรักษาน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ พบว่า เมื่อนำน้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ใส่ในขวดพลาสติกใส ปิดฝาและตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีกลิ่นเหม็น มีสีขาวครีม ในวันที่ 14, 21 และ 28 น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์เกิดการแยกชั้นเล็กน้อย แต่ไม่มีกลิ่นเหม็น

## 4. สรุป

การหมักสัปดาห์ด้วยวิธีเอเอ็มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 23 วัน จะได้น้ำหมักที่ไม่มีกลิ่นเหม็น และสามารถนำไปผลิตน้ำยาปรับผ้านุ่มได้ ผลการศึกษาพบว่า ผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์มีค่าเฉลี่ยความเหนียวมากกว่าผ้าไหมที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มทั่วไปทั้งในแนวด้ายยืนและในแนวด้ายพุ่ง ผ้าฝ้ายและผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์มีค่าเฉลี่ยความเหนียวน้อยกว่าผ้าฝ้ายและผ้าโพลีเอสเตอร์ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มทั่วไปทั้งในแนวด้ายยืนและแนวด้ายพุ่ง ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างค่าเฉลี่ยความเหนียวของผ้า พบว่า ผ้าฝ้าย ผ้าไหม และผ้าโพลีเอสเตอร์ ที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มทั่วไปและที่แช่น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์ มีค่าเฉลี่ยความเหนียวไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ทั้งในแนวด้ายยืนและด้ายพุ่ง น้ำยาปรับผ้านุ่มจากน้ำหมักชีวภาพสัปดาห์สามารถช่วยขจัด

คราบน้ำมันและคราบซีอกโกแลตบนผ้าไหมได้ แต่ไม่สามารถช่วยขจัดคราบน้ำมันพีซีได้

## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. J. Kadolph, *Textiles*, 10th ed. New Jersey: Pearson, 2007.
- [2] B. J. Collier and P.G. Tortora, *Understanding Textiles*, 6th ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2001.
- [3] E. Smulders, *Laundry Detergents*, Weinheim: Wiley-VCH, 2002.
- [4] M. J. Rosen, *Textile Surfactants and Interfacial Phenomena*, New Jersey: John Wiley & Son, 2004.
- [5] V. A. Krishnan and M. Gokulakrishnan, "Extraction, purification of bromelain from pineapple and determination of its effect on bacteria causing periodontitis," *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, vol. 6, no. 12, pp. 5284-5294, Jan. 2015.
- [6] A. Fissore, M. Marengo, V. Santoro, G. Grillo, S. Oliaro-Bosso, G. Cravotto, F. D. Piazz, and S. Adinolfi, "Extraction and characterization of bromelain from pineapple core: A strategy for pineapple waste valorization," *Processes*, vol. 11, no. 7, pp. 1-10, Jul. 2023.
- [7] X. S. George Zhao, Si. Hongzong, and Xu. Peilong, "Structure and characteristics of pineapple leaf fibers obtained from pineapple leaves," *Advanced Materials Research*, vol. 998-999, pp. 316-319, Jul. 2014.
- [8] M. Sumrit and A. Pornsawan, "Microporous activated carbon fiber from pineapple leaf fiber by  $H_3PO_4$  activation," *Asian Journal of Scientific Research*, vol. 9, no. 1, pp. 24-33, 2016.
- [9] A. L. Leao, B. M. Cherian, S. Narine, S. F. Souza, M. Sain and S. Thomas, "7-The use of pineapple leaf fibers (PALFs) as reinforcements in composites," in *Biofiber Reinforcements in Composites Materials*, O. Faruk and M. Sain, 1st ed. Woodhead Publishing, 2015, pp. 211-235.
- [10] M. Asim, K. Abdan, M. Jawaid, M. Nasir, Z. Dashtizadeh, M. R. Ishak, and M. E. Hoque, "A review on pineapple leaves fibre and its composites," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2015, pp. 1-16, Oct. 2015.
- [11] Standard Test Method for Breaking Strength and Elongation of Textile Fabrics (Grab Test), ASTM D 5034:2009, 2009.

# การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพอัดเม็ดจากการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วิจิตรา สิงห์หิรัญสูตรณ์<sup>1\*</sup> ปณิตทัต ลือโสภา<sup>2</sup> และ วิชชุดา ภาโสสม<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ศูนย์สหวิทยาการการวิจัยเพื่อความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

<sup>2</sup>สำนักงานพลังงานจังหวัดหนองคาย กระทรวงพลังงาน

<sup>3</sup>คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

<sup>1</sup>ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

<sup>2</sup>195/1 ถนนเฉลิมพระเกียรติ ตำบลหนองกอมเกาะ อำเภอเมืองหนองคาย จังหวัดหนองคาย 43000

<sup>3</sup>680 ถนนนิตโย ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000

รับบทความ 16 สิงหาคม 2567 แก้ไขบทความ 13 มิถุนายน 2568 ตอรับบทความ 3 กรกฎาคม 2568

## บทคัดย่อ

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีศักยภาพสูงในการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล อย่างไรก็ตามชีวมวลประเภทนี้มีคุณสมบัติและองค์ประกอบที่หลากหลาย และมีความผันแปรตามฤดูกาล แนวคิดการผสมผสานชีวมวลจึงเป็นกลยุทธ์ที่จะสามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดดังกล่าว และสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานให้แก่วัสดุ การศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 5 ประเภท ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) ฟางข้าว (RW) ใบอ้อย (SL) ใบมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) รวมทั้งศึกษาเทคนิคการผสมผสานวัสดุเพื่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีคุณภาพ การศึกษาได้คำนึงถึงปริมาณผลผลิตที่สามารถนำไปใช้ได้ตามฤดูกาล โดยให้ RB, RW, และ SL เป็นวัสดุหลักซึ่งมีปริมาณมากในพื้นที่ และวัสดุที่เหลือซึ่งมีปริมาณน้อยเป็นวัสดุเสริม ผลการศึกษาพบว่า CL, SL และ CR เป็นกลุ่มชีวมวลที่มีค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value: HHV) สูงสุด คือ 19.29, 17.49 และ 16.92 MJ/kg ตามลำดับ ในขณะที่ RB และ RW มีค่าความร้อนสูงที่ต่ำกว่า (14.20 และ 14.31 MJ/kg ตามลำดับ) และมีระดับที่ต่ำกว่ามาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ด ดังนั้นจึงได้เสนอแนวทางการผสมผสานวัสดุชีวมวล เพื่อปรับปรุงคุณภาพทางพลังงานของวัสดุในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยเทคนิคการผสมผสานวัสดุ 2 ชนิด พบว่า วัสดุผสม SL:RW (80:20) มีค่าความร้อนที่สูงที่สุด 16.08 MJ/kg ในขณะที่การผสมผสานวัสดุ 3 ชนิด พบว่า วัสดุผสม SL:RW:RB (60:20:20) ให้ค่าความร้อนสูงถึง 15.68 MJ/kg การเพิ่มอัตราส่วนวัสดุเสริมที่มีค่าความร้อนสูงอย่างใบมัน (CL) และเหง้ามัน (CR) เป็นวัสดุผสม ส่งผลให้คุณภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดสูงขึ้น ตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุผสมผสาน RW:CL (50:50) ให้ค่าความร้อนสูงถึง 16.25 MJ/kg แนวทางการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสามารถแก้ปัญหาค่าความผันแปรของวัสดุตามฤดูกาล และเป็นทางเลือกในการใช้วัสดุเหลือทิ้งเพื่อผลิตเชื้อเพลิง ลดปัญหาการขาดแคลนวัสดุและราคาค่าต้นทุนที่สูงในบางฤดูกาล การใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรยังส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การลดการเผาวัสดุหลังเก็บเกี่ยว ได้เชื้อเพลิงที่เป็นกลางทางคาร์บอน และสนับสนุนให้เกิดเศรษฐกิจหมุนเวียน

**คำสำคัญ :** ชีวมวล; วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร; เชื้อเพลิงชีวภาพ; เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6881 5868, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: swichitra@gmail.com

# Production of Biofuel Pellet by Blending Agricultural Residues

Wichitra Singhirunnusorn<sup>1\*</sup> Pannatat Luesopa<sup>2</sup> and Witchuda Pasom<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Multidisciplinary Research Center for Environmental Sustainability (MRCES), Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University

<sup>2</sup>Provincial Energy Office of Nong Khai, Ministry of Energy

<sup>3</sup>Faculty of Science and Technology, Rajabhat Sakon Nakhon University

<sup>1</sup>Khamriang Sub-District, Kantarawichai District, Maha Sarakham Province, 44150

<sup>2</sup>195/1 Chalermphakiat Road, Nong Komkoh Sub-District, Mueang District, Nong Khai Province, 43000

<sup>3</sup>680 Nityo Road, That Choeng Chum Sub-District, Mueang District, Sakon Nakhon Province, 47000

---

*Received 16 August 2024; Revised 13 June 2025; Accepted 3 July 2025*

## Abstract

Agricultural residues have significant potential as feedstock for biomass power plants. However, they have high variation of properties, compositions, and seasonal availability. Blending material becomes a promising strategy for addressing these limitations and improving the energy efficiency of residues. This study examines the properties and characteristics of five biomass materials including rice stubble (RB), rice straw (RW), sugar cane leaves (SL), cassava leaves (CL), and cassava rhizome (CR). Material blending strategy is examined based on seasonal availability in order to produce biomass pellet. RB, RW, and SL are categorized as the primary materials, with the remaining materials serving as supplements. The results show that CL, SL, and CR have the highest Higher Heating Value (HHV) of 19.29, 17.49, and 16.92 MJ/kg, respectively. Meanwhile, RB and RW show lower HHV levels (14.20 MJ/kg and 14.31 MJ/kg, respectively), which are below the heat standard of biomass pellet. To improve the energy property of pellets, the biomass blending techniques were suggested. The two-type blending technique reveals that SL:RW at 80:20 ratio has the maximum heat value of 16.08 MJ/kg. Three-type blending shows that SL:RW:RB in a 60:20:20 ratio has the highest heat value (15.68 MJ/kg). The energy quality of pellet can be increased by blending with the higher HHV materials as supplements, such as CL and CR. For example, the RW:CL (50:50) produced the greatest HHV, 16.25 MJ/kg. The biomass blending approach can provide the solution to the seasonal variation of materials proposed as an alternative use of residues to produce fuels and reduce material shortages and storage costs. Using agricultural wastes has a number of environmental benefits, including reducing harvesting burning, providing a carbon-neutral fuel supply, and promoting the circular economy.

**Keywords :** Biomass; Agricultural residues; Biofuel pellet; Biomass pellet fuel

---

*\* Corresponding Author. Tel.: +668 6881 5868, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: swichitra@gmail.com*

## 1. บทนำ

ประเทศไทยมุ่งขับเคลื่อนโมเดลเศรษฐกิจสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนให้เป็นวาระแห่งชาติ โดยเน้นการพัฒนาเศรษฐกิจของท้องถิ่นตามโมเดลเศรษฐกิจ BCG การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทน จึงมีส่วนสำคัญในการสร้างมูลค่าจากของเสีย เกิดเศรษฐกิจหมุนเวียนสร้างรายได้แก่ชุมชนจากวัสดุชีวภาพ ส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนภายในท้องถิ่น

ชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Agricultural Residues) ถูกพิจารณาว่าเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนสำคัญของโลก สามารถใช้เป็นวัตถุดิบผลิตเชื้อเพลิงที่มีความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าชีวมวลสู่บรรยากาศ ถูกทดแทนด้วยการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยพืชที่เพาะปลูก ถือว่าเป็นการชดเชยคาร์บอน (Carbon Offset) ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชชีวมวลเกษตรรุ่นต่อไป จึงสามารถสนับสนุนให้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) สุทธิในบรรยากาศเท่ากับศูนย์ [1]

ประเทศไทยมีพื้นที่ใช้ประโยชน์เพื่อการเกษตรประมาณ 149 ล้านไร่ หรือคิดเป็นร้อยละ 53 ของพื้นที่ประเทศ มีผลผลิตชีวมวล 296 ล้านตัน/ปี เป็นส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์แล้ว 136 ล้านตัน และมีวัสดุที่เหลือทิ้ง 160 ล้านตัน [2] ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งที่ตกค้างในพื้นที่เหล่านี้ ส่วนใหญ่เกษตรกรมีการจัดการที่ไม่ถูกวิธี เช่น การเผาในที่โล่งแจ้ง ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบในหลายด้าน ทั้งผลต่อคุณภาพดินพื้นที่เพาะปลูกเสื่อมโทรม เกิดควันเถ้า และฝุ่นละอองขนาดเล็ก ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Agricultural Residues หรือ Crop Residues) หมายถึง ชิ้นส่วนพืชที่ไม่สามารถนำมาบริโภคได้ ซึ่งถูกทิ้งไว้หลังการเก็บเกี่ยว ทั้งนี้รวมถึงวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม [3] วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีความหลากหลายทั้งในแง่

ปริมาณ คุณสมบัติ และองค์ประกอบ [4] นอกจากนี้แล้ววัตถุดิบชีวมวลเหล่านี้ส่วนใหญ่มีน้ำหนักเบา ปริมาณมาก และความหนาแน่นทางพลังงานต่ำ ทำให้มีต้นทุนในด้านการจัดเก็บและการขนส่งสูง [5]

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาพืชเศรษฐกิจหลักในพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ข้าว อ้อย และมันสำปะหลัง ซึ่งพบว่ามีพื้นที่เพาะปลูกมากที่สุด รวมทั้งวัสดุที่เหลือทิ้งจากการเพาะปลูกยังมีศักยภาพทั้งด้านปริมาณ และคุณสมบัติทางพลังงาน การศึกษาก่อนหน้านี้ [6] แสดงให้เห็นว่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 5 ประเภท ได้แก่ ตอซังข้าว ฟางข้าว ใบอ้อย ใบมันสำปะหลัง และเหง้ามันสำปะหลัง (รูปที่ 1) สามารถให้ค่าพลังงานความร้อนขั้นสูง (HHV) ที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยใบมันสำปะหลังมีค่า HHV เท่ากับ 19.29 MJ/kg รองลงมาคือ ใบอ้อย และเหง้ามันสำปะหลัง มีค่า HHV 17.49 และ 16.92 MJ/kg (HHV) ตามลำดับ ซึ่งวัสดุเหล่านี้ส่วนใหญ่มีการใช้ประโยชน์น้อย และถูกเผาทิ้งทำลาย [7] โดยฟางข้าวจะมีการนำไปใช้ที่หลากหลายที่สุด ส่วนตอซัง มีปริมาณน้อยที่นำไปเลี้ยงสัตว์ ส่วนเหลือทิ้งไม่ได้ใช้ประโยชน์ เช่นเดียวกับใบอ้อย ใบมัน และเหง้ามัน ที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ จะถูกปล่อยทิ้งไว้ในพื้นที่ และทำการเผาพื้นที่หลังเก็บเกี่ยว หรือเมื่อต้องการปลูกพืชในรอบต่อไป



ตอซังข้าว (Rice stubble : RB)



ฟางข้าว (Rice straw : RW)



ใบอ้อย (Sugar cane leaves : SL)



ใบมันสำปะหลัง (Cassava leaves : CL)



เหง้ามันสำปะหลัง (Cassava rhizome : CR)

รูปที่ 1 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้ในการศึกษา

เชื้อเพลิงชีวภาพอัดเม็ด (Biofuel Pellets) หรือ รู้จักกันในอีกชื่อว่า เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (Biomass Pellet Fuel) เป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งหรือของเสียจากเกษตรกรรม การแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร อุตสาหกรรมป่าไม้ เช่น ชี้อ้อย เปลือกถั่ว ฟางข้าว ชังข้าวโพด เป็นต้น โดยผ่านกระบวนการเพิ่มความหนาแน่น (Densification) ขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นก้อนเล็กๆ หรือเม็ด (Pellets) [6], [7] การอัดเม็ดเชื้อเพลิงส่งผลต่อการเพิ่มความหนาแน่นทางพลังงานและความคงทนของวัสดุ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการใช้งาน การจัดเก็บ และการขนส่ง

แนวคิดการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในพื้นที่เพาะปลูกหลังการเก็บเกี่ยวมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงพบว่า มีข้อจำกัดหลายประการ เนื่องจากความหลากหลายของชนิดพืช ซึ่งส่งผลต่อประเภทวัสดุเหลือทิ้ง คุณสมบัติและองค์ประกอบทางกายภาพ เคมี ชีวภาพ รวมทั้งคุณสมบัติทางพลังงาน คุณภาพชีวมวลที่ไม่สม่ำเสมอ และความแปรผันด้านปริมาณของวัสดุตามฤดูกาล ทำให้การใช่วัสดุชีวมวลเพียงชนิดเดียวในการผลิตเชื้อเพลิงมีความเสี่ยงต่อการประสบปัญหาวัสดุขาดแคลน รวมทั้งราคาวัสดุที่สูงในบางช่วงเวลา

งานวิจัยในอดีตได้นำแนวคิดการผสมผสานชีวมวลมาใช้เพื่อผลิตเชื้อเพลิงด้วยวัตถุดิบประปรายต่างๆ กัน เช่น การผสมเชื้อเพลิงชีวมวลกับเชื้อเพลิงทั่วไปเพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล [8] การผสมวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์กับถ่านหินเพื่อลดปริมาณการใช้ถ่านหิน [5] การผสมแกลบ ชี้อ้อย กับถ่านหินเพื่อลดการใช้ถ่านหินและมลภาวะจากการใช้ถ่านหิน [9] และการผสมไม้สนกับวัสดุเหลือทิ้งจากต้นกาแฟเพื่อจัดการของเสียจากการเพาะปลูก [10] อย่างไรก็ตาม พบว่างานวิจัยในอดีตมุ่งเน้นการกำจัดของเสีย หรือมีความพยายามในการผสมผสานวัสดุเพื่อลดปริมาณวัสดุมากกว่าการพัฒนาคุณสมบัติทางพลังงานของเชื้อเพลิงชีวมวลจากการผสมผสาน

ด้วยความท้าทายในด้านความหลากหลายของวัสดุทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ งานวิจัยครั้งนี้จึงได้พัฒนาแนวทางการผสมผสานวัสดุชีวมวล (Biomass Blending) ที่เหมาะสม เพื่อการผลิตเชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ข้าว อ้อย และมันสำปะหลัง โดยอาศัยกระบวนการอัดแน่นชีวมวล (Biomass Densification) ในรูปแบบเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Pellet) กระบวนการผสมผสานชีวมวลและการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ส่งผลให้ค่าความร้อนและความหนาแน่นทางพลังงานของวัสดุเพิ่มขึ้น ได้ผลิตเชื้อเพลิงที่มีความคงทน (Durability) เอื้อต่อการเก็บกักสำรอง คุ่มค่าต่อการขนส่งและใช้ประโยชน์ มีคุณภาพตามความต้องการของโรงไฟฟ้า ด้วยขนาดและรูปทรงที่สม่ำเสมอ

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 ขั้นตอนการวิจัย

#### 2.1.1 รูปแบบการผสมผสานวัสดุชีวมวล

การวิจัยศึกษากระบวนการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานและเป็นทางเลือกในการใช่วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรตลอดทั้งปี การศึกษาแบ่งวัสดุที่สนใจทั้ง 5 ประเภทออกเป็น 2 กลุ่ม ตามปริมาณวัสดุเฉลี่ยตลอดทั้งปีภายในพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม [11] โดยแบ่งกลุ่มประเภทวัสดุที่มีปริมาณการผลิตที่สูงให้เป็น “วัสดุหลัก” ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) ฟางข้าว (RW) และใบอ้อย (SL) ในขณะที่วัสดุที่มีผลผลิตน้อย จัดให้เป็น “วัสดุเสริม” ได้แก่ ใบมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) โดยตารางที่ 1 ได้แสดงข้อมูลองค์ประกอบโดยประมาณของวัสดุชีวมวลแต่ละประเภท

การศึกษากระบวนการผสมผสาน แบ่งออกเป็น 2 แนวทาง ได้แก่

1) การผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุหลัก ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) ฟางข้าว (RW) และใบอ้อย (SL)

ด้วยวิธีการออกแบบส่วนผสม (Mixture design) แบบ Simplex Lattice โดยมีรูปแบบการผสมผสานวัสดุหลักสองรูปแบบ ได้แก่ การผสมวัสดุ 2 ชนิด และการผสมวัสดุ 3 ชนิดเข้าด้วยกัน กำหนดอัตราส่วนผสมวัสดุแต่ละประเภทจาก 0, 20, 40, 60, 80, 100 % โดยน้ำหนัก รวมทั้งสิ้น 21 ชุดการทดลอง วัสดุแต่ละชุดการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าความร้อนขั้นสูง (Higher Heating Value: HHV) และองค์ประกอบโดยประมาณ ได้แก่ ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า

2) การผสมผสานวัสดุหลักร่วมกับวัสดุเสริม การวิจัยต้องการศึกษาผลของการผสมผสานวัสดุเสริมที่มีค่าความร้อนสูง ได้แก่ ไขมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานของชีวมวลประเภทวัสดุหลัก ที่มีค่าความร้อนต่ำกว่าเกณฑ์ โดยออกแบบการผสมผสานวัสดุเสริมในอัตราส่วนเพิ่มขึ้นทีละ 10% แต่ต้องไม่มากกว่าอัตราส่วนของวัสดุหลัก นอกจากนี้การวิจัยได้ศึกษาการผสมวัสดุเสริมแบบ 1 ชนิด และ 2 ชนิดพร้อมกัน รวมทั้งสิ้น 30 ชุดการทดลอง วัสดุแต่ละชุดการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าความร้อนสูง ( HHV) และองค์ประกอบโดยประมาณ ได้แก่ ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า

### 2.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบและคุณสมบัติของวัสดุชีวมวล

การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) ของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture Content; MC) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3173 คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter; VM) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3175 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon; FC) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3172 และปริมาณเถ้า (Ash) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3174 [12] การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง (HHV) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5865-13 [6], [13] โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter Cal2K รุ่น e2K ผลิตที่ประเทศแอฟริกาใต้

สำหรับการหาองค์ประกอบของเยื่อใยต่างๆ ในพืช ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และเถ้า (Ash) ทำการวิเคราะห์โดยวิธีการ Detergent Analysis [6]

องค์ประกอบต่างๆ ของชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในงานวิจัยนี้ ได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบต่างๆ และคุณสมบัติทางพลังงานของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

องค์ประกอบ/คุณสมบัติ	วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (dry basis)				
	RB	RW	SL	CL	CR
<b>องค์ประกอบโดยประมาณ (%)</b>					
Moisture Content	8.57±0.13	7.70±0.09	6.97±0.11	7.29±0.18	7.22±0.18
Volatile Matter	66.99±0.98	67.14±0.44	75.69±1.05	72.13±0.49	73.74±0.53
Ash Content	12.70±0.45	11.32±0.07	4.31±0.05	6.87±0.28	3.77±0.36
Fixed Carbon	11.74±0.89	13.85±0.51	13.03±0.99	13.71±0.44	15.27±0.14
<b>คุณสมบัติทางชีวเคมี (%)</b>					
Hemicellulose	37.90±0.53	32.92±0.19	28.67±0.29	23.56±0.48	11.92±0.13
Cellulose	30.14±0.27	29.37±0.32	37.74±0.49	33.36±0.36	45.06±0.14
Lignin	21.90±0.34	27.78±0.56	26.69±0.32	39.01±0.55	38.38±0.27
Other	10.06±0.20	9.92±0.06	6.90±0.41	4.07±0.12	4.64±0.27
<b>ค่าความร้อน (MJ/kg)</b>					
Higher Heat Value	14.20±0.32	14.31±0.37	16.92±0.16	19.29±0.37	17.49±0.17

Note. RB: Rice Stubble (ตอซังข้าว); RW: Rice Straw (ฟางข้าว); SL: Sugar cane Leaves (ใบอ้อย); CL: Cassava Leaves (ใบมัน); CR: Cassava Rhizome (เหง้ามัน)

### 2.1.3 กระบวนการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวภาพแบบเม็ด (Pellet)

การศึกษาได้พิจารณาเลือกชุดการทดลองผสมผสานชีวมวลที่ให้ค่าความร้อนสูงสุดในแต่ละรูปแบบการผสมผสาน เพื่อนำไปสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวภาพแบบเม็ด โดยใช้เครื่องอัดเม็ดหรืออัดเป็นแท่งเล็ก (Pelletizing Press) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 มิลลิเมตร โดยมีวิธีการอัดขึ้นรูปดังแสดงในรูปที่ 2

การอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงแบบเม็ด จะนำวัสดุที่ผ่านการตัดย่อยแล้วขนาดประมาณ 3 มิลลิเมตร ทำการผสมตามอัตราส่วนของแต่ละชุดการทดลอง โดยให้วัสดุมีความชื้นประมาณร้อยละ 30 – 35 ป้อนวัสดุปริมาณ 6 กิโลกรัมลงเครื่องอัดขนาด 10 แรงม้า (รูปที่ 3) โดยระหว่างการเดินเครื่องจะควบคุมอุณหภูมิแผ่นไดร์ให้อยู่ในช่วง 75- 100°C เมื่ออัดขึ้นรูปเป็นเม็ดแล้ว นำเม็ดเชื้อเพลิงไปผึ่งลม และตากแดดเป็นระยะเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อลดอุณหภูมิและความชื้น และเก็บรักษาวัสดุไว้ในภาชนะปิดเพื่อทำการทดสอบต่อไป



รูปที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุในการอัดขึ้นรูป



รูปที่ 3 เครื่องอัดเชื้อเพลิง (Pelletizing press)

การศึกษาได้คัดแยกคุณภาพของเม็ดเชื้อเพลิงออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) เม็ดเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดี คือ ไม่มีรอยแตก เม็ดมีความมันวาว และเป็นแท่งตรง 2) เชื้อเพลิงคุณภาพไม่ดี คือเชื้อเพลิงที่มีรอยแตก รูปทรงบิดเบี้ยว และ 3) วัสดุที่ไม่สามารถอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดได้ โดยจะประเมินปริมาณร้อยละของผลผลิตเชื้อเพลิงที่ได้ของแต่ละชุดการทดลอง

### 2.1.4 การทดสอบคุณสมบัติและความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

- 1) คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง
  - 1.1) ความหนาแน่นรวม (Bulk density; kg/m<sup>3</sup>) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E 873-82 โดยเม็ดเชื้อเพลิงจะถูกเทลงภาชนะที่ระยะสูงจากขอบภาชนะ 15 เซนติเมตร ทำการบันทึกปริมาตรและน้ำหนักเพื่อคำนวณหาความหนาแน่นรวม [15]
  - 2) ความคงทน (Durability) ประกอบด้วย
    - 2.1) ค่าต้านทานแรงกด (Compressive Strength Test; Newton (N)) ทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่อง Universal Testing Machine บันทึกผล
    - 2.2) ความต้านทานการขัดสี (Tumbling Resistance Test; %) เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน Pellet Fuels Institute (PFI) นำตัวอย่างน้ำหนัก 500

กรัมใส่ในเครื่องทดสอบที่มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยม ขนาด  $30 \times 30 \times 45$  เซนติเมตร มีความเร็วในการหมุน 50 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง เชื้อเพลิงที่คงสภาพเป็นเม็ดอยู่ คำนวณเปอร์เซ็นต์ความต้านทานการขัดสี [6]

2.3) ความต้านทานการแตกกร่วน (Drop Shatter Test; %) ทดสอบโดยการนำตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดน้ำหนัก 100 กรัมบรรจุในถุงพลาสติก แล้วปล่อยวัสดุจากระดับความสูง 2 เมตรลงสู่พื้นซีเมนต์ 3 ครั้ง บันทึกข้อมูลน้ำหนักของวัสดุที่คงสภาพไม่แตกกร่วน และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความต้านทานการแตกกร่วน (มาตรฐาน ASTM 3083) [15]

2.4) การดูดซึมน้ำของเม็ดเชื้อเพลิง (Water Absorption Test; %) นำตัวอย่างแช่ในน้ำอุณหภูมิ  $27^{\circ}\text{C}$  ระดับน้ำสูง 25 มิลลิเมตร เป็นเวลา 30 วินาที บันทึกน้ำหนักหลังการทดสอบ เพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ [6], [13]

3) คุณสมบัติทางพลังงาน (Energy Properties) การทดสอบค่าความร้อนสูง (Higher Heat Value; MJ/kg) ของเชื้อเพลิงด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter เครื่องหมายการค้า Cal2K รุ่น e2K ผลิตที่ประเทศแอฟริกาใต้” (มาตรฐาน ASTM D865-13 [6], [13])

### 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

#### 3.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

องค์ประกอบและคุณสมบัติของวัสดุชีวมวลเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาเลือกวัสดุมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง จากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบและคุณสมบัติของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้ในการศึกษาทั้ง 5 ประเภท ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) ฟางข้าว (RW) ใบอ้อย (SL) ใบมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) พบว่า ใบมันสำปะหลัง (CL) มีค่าความร้อนสูงที่สุด  $19.29 \pm 0.37$  MJ/kg รองลงมา ได้แก่ เหง้ามันสำปะหลัง (CR)

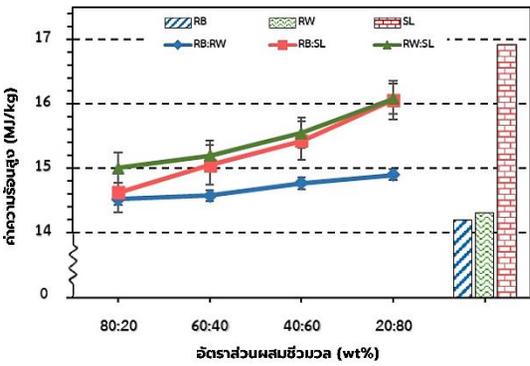
$17.49 \pm 0.17$  MJ/kg และใบอ้อย (SL)  $16.92 \pm 0.16$  MJ/kg ตามลำดับ เนื่องจากเป็นกลุ่มวัสดุที่มีปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว ลิกนิน และเซลลูโลสในสัดส่วนที่สูง และมีปริมาณเถ้าต่ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อค่าความร้อนที่สูงของวัสดุ ส่วนตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) เป็นกลุ่มวัสดุที่มีค่าความร้อนต่ำกว่า คือ  $14.20 \pm 0.32$  MJ/kg และ  $14.31 \pm 0.37$  MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งลักษณะสำคัญของวัสดุกลุ่มนี้คือมีปริมาณเถ้าสูง [7], [11] อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าความร้อนของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้ง 5 ประเภทมีค่าที่สูงกว่าและใกล้เคียงกับวัสดุชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบในโรงไฟฟ้าชีวมวลในปัจจุบัน ได้แก่ ชิ้นไม้ ( $17.7$  MJ/kg), แกลบ ( $14.6$  MJ/kg) และส่วนผสมระหว่างชิ้นไม้: แกลบ (50:50) ( $15.8$  MJ/kg) [6] หากพิจารณาตามมาตรฐาน มอก.2772-2560 เชื้อเพลิงอัดเม็ดต้องมีค่าความร้อนไม่น้อยกว่า  $14.5$  MJ/kg [15] ซึ่งจะเห็นว่า ตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) มีค่าความร้อนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ดังนั้นหากจะนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานด้วยการผสมผสานวัสดุเสริมในขั้นตอนการศึกษาต่อไป

#### 3.2 กระบวนการผสมผสานวัสดุชีวมวล

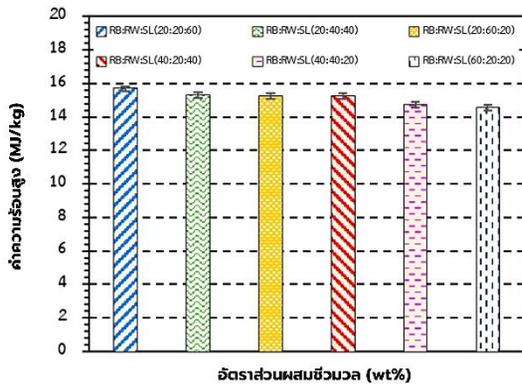
##### 3.2.1 การผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุหลัก

การศึกษาพิจารณาวัสดุประเภทหลักจากปริมาณผลผลิตในพื้นที่ทั้งหมด โดยแบ่งกระบวนการผสมผสานกลุ่มวัสดุหลักทั้ง 3 ชนิด ฟางข้าว (RW) ตอซังข้าว (RB) และใบอ้อย (SL) ออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การผสมผสานวัสดุแบบ 2 ชนิด และแบบ 3 ชนิด ผลการศึกษาพบว่าส่วนผสมที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด ได้แก่ ใบอ้อย (SL) : ฟางข้าว (RW) ในอัตราส่วน 80:20 ( $16.08 \pm 0.25$  MJ/kg) และใบอ้อย (SL) : ตอซังข้าว (RB) (80:20) ที่ให้ค่าความร้อน  $16.06 \pm 0.20$  MJ/kg ในขณะที่ส่วนผสมระหว่างตอซังข้าว (RB) : ฟางข้าว (RW) อัตราส่วน 60:40 ให้ค่าความร้อนต่ำที่สุด อยู่ที่  $14.58 \pm 0.10$  MJ/kg (รูปที่ 4 และ 5)

นอกจากนี้ พบว่าการเพิ่มสัดส่วนของไบอ้อย (SL) ในทุกส่วนผสมจะส่งผลให้ค่าความร้อนของวัสดุผสมสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะวัสดุที่มีค่าความร้อนต่ำอย่างตอซังข้าว (RB) และ ฟางข้าว (RW) ในขณะที่การผสมผสานระหว่างปริมาณตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 4 และ 5) ทั้งนี้เพราะวัสดุทั้งสองประเภทมีองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกัน



รูปที่ 4 ค่าความร้อนขั้นสูง (HHV) จากการผสมผสานวัสดุแบบ 2 ชนิด



รูปที่ 5 ค่าความร้อนขั้นสูง (HHV) จากการผสมผสานวัสดุแบบ 3 ชนิด

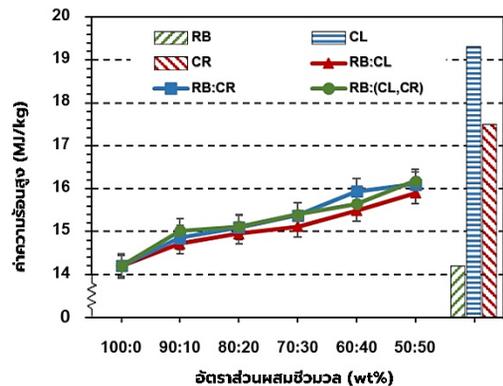
ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ดของประเทศไทย (มอก. 2772-2560) ซึ่งกำหนดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไม่ต่ำกว่า 14.5 MJ/kg [15] จะพบว่า จากทั้งหมด 21 ชุดการทดลอง มีชุดการทดลองที่มีค่าความร้อนสูงผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

จำนวน 19 ชุดการทดลอง และมีจำนวน 2 ชุดการทดลองที่มีค่าความร้อนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน คือ ตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW)

### 3.2.2 การผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุเสริมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงาน

ชีวมวลประเภทวัสดุเสริม คือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีปริมาณผลผลิตน้อยในพื้นที่ ได้แก่ ใบมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) แต่ พบว่าเป็นวัสดุที่มีค่าความร้อนสูง การวิจัยจึงได้ศึกษาผลของการผสมผสานวัสดุทั้งสองเข้ากับวัสดุหลักที่มีค่าความร้อนต่ำอย่าง ตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW)

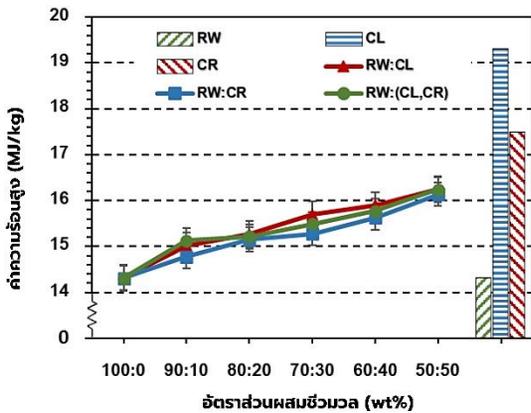
การศึกษาพบว่าการผสมผสานใบมันสำปะหลัง (CL) ชนิดเดียวกับตอซังข้าว ในอัตราส่วนต่างๆ ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงขึ้น 4.7% – 13.5% โดยอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด คือ ตอซังข้าว (RB) : ใบมันสำปะหลัง (CL) 50:50 ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการผสมใบมันสำปะหลัง (CL) กับฟางข้าว (RW) ในขณะที่การผสมวัสดุเสริมอย่างเหง้ามันสำปะหลัง ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงของตอซังและฟางข้าวเพิ่มขึ้น 4% – 12% และ 3% – 13% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 ค่าความร้อนขั้นสูง (HHV) จากการผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุเสริมกับตอซังข้าว (RB)

การศึกษาได้ทดลองการผสมผสานวัสดุเสริมทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน (CL, CR) โดยผลการศึกษาแสดง

อิทธิพลของการเพิ่มวัสดุเสริมทั้งสองรูปแบบ พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับการเพิ่มวัสดุเสริมเพียงชนิดเดียว โดยการใช้วัสดุเสริมทั้งสองชนิด (CL,CR) ผสมผสานกัน ทั้งตอซังและฟางข้าวในอัตราส่วน 50:50 สามารถเพิ่มค่าความร้อนสูงของวัสดุให้สูงขึ้น 14% และ 13% ตามลำดับ และมีค่าความร้อนสูงสุด  $16.18 \pm 0.25$  MJ/kg และ  $16.24 \pm 0.25$  MJ/kg ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 7 ค่าความร้อนขั้นสูง (HHV) จากการผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุเสริมฟางข้าว (RW)

### 3.3 การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Pellet) จากการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

#### 3.3.1 คุณภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงจากการผสมผสานวัสดุชีวมวลพบว่า ได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีคุณภาพใกล้เคียงกัน พบวัสดุที่สูญเสียหรือไม่สามารถอัดขึ้นรูปได้ในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกันในแต่ละชุดการทดลอง โดยพบเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดี มีความมันวาว และไม่มีรอยแตก อยู่ประมาณ 86% วัสดุที่มีคุณภาพไม่ดี มีรอยแตกประมาณ 6% และพบปริมาณวัสดุที่ไม่สามารถขึ้นรูปได้ประมาณ 7-9% นอกจากนี้ พบว่า การผสมผสานเหง้ามันสำปะหลัง (CR) กับตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) สามารถช่วยเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงคุณภาพที่ดี ลดปริมาณเชื้อเพลิงคุณภาพที่ไม่ดี และลดการสูญเสียวัสดุ

ระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิง เนื่องจากเหง้ามันสำปะหลังมีปริมาณลิกนินเป็นองค์ประกอบที่สูง ซึ่งลิกนินเป็นสารอินทรีย์โพลีเมอร์ในพืช ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานตามธรรมชาติในกระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง [6]

#### 3.3.2 ขนาดและรูปร่างของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ขนาดและรูปร่างของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเป็นอีกหนึ่งปัจจัยในการพิจารณาคัดเลือกเชื้อเพลิงเพื่อนำมาใช้ผลิตพลังงาน โดยตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ดของไทย (มอก. 2772-2560) ชั้นคุณภาพ 1 และ 2 กำหนดให้เชื้อเพลิงต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่  $6 \pm 1 - 25 \pm 1$  มิลลิเมตร ความยาวเฉลี่ย ตั้งแต่ 3.15 – 40.0 มิลลิเมตร ความยาวต่ำสุดไม่น้อยกว่า 3.15 มิลลิเมตร ความยาวสูงสุดไม่เกิน 45.0 มิลลิเมตร และมีความยาวที่เกินกว่า 40.0 มิลลิเมตร ไม่เกินร้อยละ 1 (โดยน้ำหนัก) [15] เชื้อเพลิงจากทุกชุดการทดลอง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง อยู่ระหว่าง 11.7 – 11.9 มิลลิเมตร เฉลี่ย 11.8 มิลลิเมตร และขนาดความยาวของแท่งเชื้อเพลิงเฉลี่ยอยู่ที่ 3.79 – 5.06 มิลลิเมตร โดยเชื้อเพลิงที่มีความยาวแท่งเฉลี่ยสูงที่สุดคือ เหง้ามันสำปะหลัง (CR) และเชื้อเพลิงที่มีความยาวเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ ตอซังข้าว (RB) : ใบอ้อย (SL) (20:80) ซึ่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้จากการศึกษาพบว่าสอดคล้องกับมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ดของประเทศไทย

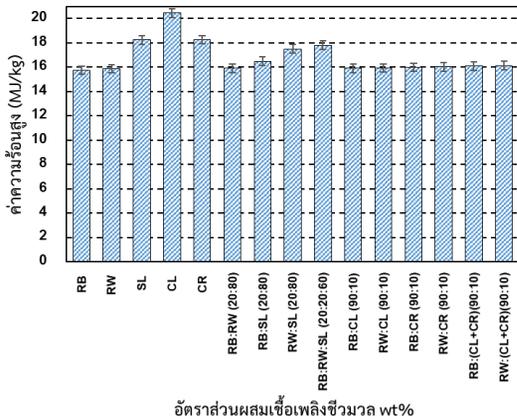
#### 3.3.3 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

##### 1) ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงคือปัจจัยหลักในการพิจารณาคัดเลือกเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการผลิตพลังงาน เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการเผาไหม้ ได้ค่าพลังงานที่คงที่ โดยทั่วไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ดของประเทศไทย (มอก. 2772-2560) ชั้นคุณภาพ

1 และ 2 กำหนดให้เชื้อเพลิงที่ผลิตจากชีวมวลจะต้องมีค่าความร้อนไม่ต่ำกว่า 14.5 MJ/kg [15] ผลจากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากไบมันสำปะหลัง (CL) มีค่าความร้อนขั้นสูง (HHV) สูงที่สุด 20.45 MJ/kg รองลงมาได้แก่เหง้ามันสำปะหลัง (CR) 18.27 MJ/kg และ ใบอ้อย (SL) 18.25 MJ/kg ในขณะที่เม็ดเชื้อเพลิงที่ผลิตจากตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) มีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกัน คือ 15.75 MJ/kg และ 15.87 MJ/kg ตามลำดับ (รูปที่ 8)

เชื้อเพลิงชุดการทดลองที่มีส่วนผสมของใบอ้อย (SL) มีค่าปริมาณความร้อนสูงเพิ่มมากขึ้น โดยอัตราส่วนที่มีค่าความร้อนสูงสุดที่สุด คือตอซังข้าว (RB) : ใบอ้อย (SL) อัตราส่วน 20:80 มีค่า 17.81 MJ/kg เมื่อพิจารณา ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทั้ง 15 ชุดการทดลอง เปรียบเทียบมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศไทย (มอก. 2772 – 2560) พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าความร้อนที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน



รูปที่ 8 ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

2) ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

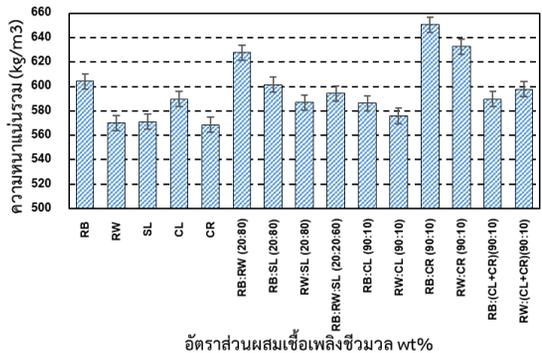
การนำชีวมวลมาอัดแข็งเพื่อเพิ่มความหนาแน่นจะเป็นประโยชน์ทั้งในแง่ของการเพิ่มความหนาแน่นทางพลังงานต่อปริมาตรเชื้อเพลิง และช่วยให้การขนส่งและเก็บรักษาเชื้อเพลิงชีวมวลให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ผลจากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีความหนาแน่นรวมอยู่ระหว่าง 569 – 650 kg/m<sup>3</sup> โดยเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นรวมมากที่สุด ผลิตจากตอซังข้าว (RB): เหง้ามัน (CR) (90:10) ซึ่งมีความหนาแน่นรวมอยู่ที่ 650.49 kg/m<sup>3</sup> (รูปที่ 9) ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ มอก. 2772-2560 กำหนดให้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดต้องมีความหนาแน่นรวมไม่น้อยกว่า 600 kg/m<sup>3</sup> [15]

3) ความหนาแน่นทางพลังงานของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ความหนาแน่นทางพลังงาน (Energy Density: MJ/m<sup>3</sup>) ของเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งาน การขนส่ง และการจัดเก็บ ผลจากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเดี่ยว มีความหนาแน่นทางพลังงานอยู่ในช่วง 9,048 - 12,060 MJ/m<sup>3</sup> โดยที่ไบมันสำปะหลัง (CL) ให้ค่าความหนาแน่นทางพลังงานสูงสุด คือ 12,060 MJ/m<sup>3</sup>

ส่วนเชื้อเพลิงที่ได้จากการผสมผสานวัสดุประเภทหลัก พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุผสมระหว่างตอซังข้าว (RB) : ใบอ้อย (SL) อัตราส่วน 20:80 มีความหนาแน่นทางพลังงานสูงสุด 10,708 MJ/m<sup>3</sup> ในขณะที่เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีวัสดุเสริมอย่างเหง้ามัน (CR) ร่วมกับตอซัง (RB) มีความหนาแน่นทางพลังงานที่สูงที่สุด คือ 10,354 MJ/m<sup>3</sup> ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 9 ค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิง

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นทางพลังงาน (Energy Density) และการทดสอบความคงทนของเชื้อเพลิง

ชุดการทดลอง	อัตราส่วนผสม (wt%)	ความหนาแน่นทางพลังงาน (MJ/m <sup>3</sup> )	ความคงทนของเชื้อเพลิง		
			ความต้านทานการขัดสี (%)	ความต้านทานการแตกร่วน (%)	ความต้านทานการดูดซึมน้ำ (%)
วัสดุประเภทเดี่ยว	CL (100%)	12,060	90.34±0.65	99.13±0.21	91.06±0.31
	SL (100%)	10,423	95.86±0.48	99.86±0.04	95.89±0.62
	CR (100%)	10,391	98.44±0.25	99.95±0.01	92.13±0.31
	RB (100%)	9,512	96.62±0.20	99.83±0.09	88.49±0.99
	RW (100%)	9,048	97.48±0.65	99.83±0.04	88.24±0.92
การผสมผสานวัสดุประเภทหลัก	RB:SL (20:80)	10,708	96.08±0.06	99.78±0.19	89.03±1.16
	RW:SL (20:80)	10,276	96.04±0.47	99.87±0.06	91.64±1.11
	RB:RW (20:80)	9,992	97.20±0.39	99.84±0.11	92.30±0.79
	RB:RW:SL (20:20:60)	9,801	96.54±0.25	99.78±0.10	91.31±1.24
การผสมวัสดุประเภทหลัก	RB:CR (90:10)	10,354	98.27±0.05	99.90±0.03	86.73±1.33
	RW:CR (90:10)	10,140	97.15±0.06	99.82±0.06	89.94±0.89
ด้วยวัสดุประเภทเสริม	RW:(CL+CR) (90:10)	9,559	96.85±0.11	99.84±0.08	91.45±0.46
	RB:CL (90:10)	9,438	97.41±0.10	99.91±0.40	88.90±1.36
ประเภทเสริม	RB:(CL+CR) (90:10)	9,394	96.84±0.40	99.85±0.07	91.41±0.53
	RW:CL (90:10)	9,293	97.34±0.31	99.88±0.03	88.80±0.99

### 3.3.4 การทดสอบความคงทนของเชื้อเพลิง

#### 1) ความต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณภาพดีจะต้องมีความคงทน เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการขนส่ง และการจัดเก็บ [14] ผลจากการทดสอบความต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิงพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเหง้ามันมีความต้านทานการขัดสีมากที่สุด 98% โดยเชื้อเพลิงจากทุกชุดการทดลองมีความต้านทานการขัดสีผ่านเกณฑ์ มอก. 2772-2560 [15] ซึ่งกำหนดให้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจะต้องมีความคงทนไม่น้อยกว่า 96% ทั้งนี้ยกเว้นเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากใบมันสำปะหลัง มีค่าความต้านทานการขัดสีน้อยที่สุด 90% (ตารางที่ 2)

#### 2) ความต้านทานการแตกร่วน

การทดสอบค่าความต้านทานการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดในแต่ละชุดการทดลองมีค่าสูงมากกว่า

99% โดยเชื้อเพลิงที่มีความต้านทานการแตกร่วนสูงที่สุด คือเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเหง้ามันสำปะหลัง (CR) (ตารางที่ 2)

#### 3) ความต้านทานการดูดซึมน้ำ

เชื้อเพลิงที่มีดูดซึมน้ำได้ดี จะส่งผลให้วัสดุมีการพองตัว เสียรูปร่าง หรือเปื่อยยุ่ย มีโอกาสที่ทำให้วัสดุขึ้นรา หรือถูกย่อยสลายตามธรรมชาติได้ง่าย ผลจากการทดสอบพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากใบอ้อย (SL) มีค่าความต้านทานการดูดซึมน้ำสูงที่สุดอยู่ที่ 96% ในขณะที่ฟางข้าว (RW) มีค่าต้านทานการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด คือ 88.24% อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าคุณสมบัติการต้านทานการดูดซึมน้ำของฟางข้าวจะเพิ่มขึ้นได้ หากมีผสมผสานวัสดุชนิดอื่น อย่างใบอ้อย ดังแสดงในตารางที่ 2

#### 4) ความต้านทานแรงกด

การศึกษาได้ทำการทดสอบความต้านทานแรงกดใน 2 รูปแบบ ได้แก่การรับแรงกดในแนวตั้งของเม็ด

เชื้อเพลิง และการรับแรงกดในแนวนอน โดยผลการทดสอบพบว่า ความต้านทานแรงกดของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเหง้ามันสำปะหลัง(CR) ในแนวตั้งสามารถรับแรงกดได้สูงสุด คือ 7.91 N รองลงมา คือ ตอซังข้าว (RB) รับแรงกดได้ 7.32 N ฟางข้าว (RW) 5.49 N และ

ไบอ้อย (SL) 3.63 N ตามลำดับ โดยเม็ดเชื้อเพลิงที่สามารถรับแรงกดได้น้อยที่สุด คือ ไบมันสำปะหลัง (CL) 2.65 N การทดสอบพบว่าเม็ดเชื้อเพลิงสามารถรับแรงกดในแนวนอนได้มากกว่าแนวตั้ง ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติความต้านทานแรงกด (Compressive Resistance) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ชุดการทดลอง	อัตราส่วนผสม (wt%)	การรับแรงกด (Newton)	
		แนวตั้ง	แนวนอน
วัสดุประเภทเดียว	RB (100%)	7.32±0.30	12.52±0.50
	RW (100%)	5.49±0.29	9.55±0.15
	SL (100%)	3.63±0.55	4.41±0.39
	CL (100%)	2.65±0.17	3.11±0.56
	CR (100%)	7.91±0.71	18.40±0.45
การผสมผสานวัสดุหลัก	RB:RW (20:80)	7.68±0.23	13.21±0.49
	RB:SL (20:80)	5.43±0.44	12.23±0.34
	RW:SL (20:80)	5.36±0.06	15.13±0.49
	RB:RW:SL (20:20:60)	6.37±0.64	16.54±0.41
การผสมวัสดุหลักด้วยวัสดุประเภทเสริม	RB:CL (90:10)	5.16±0.20	7.03±0.15
	RW:CL (90:10)	5.26±0.40	7.26±0.52
	RB:CR (90:10)	9.71±0.51	14.81±0.59
	RW:CR (90:10)	7.52±0.49	15.40±0.43
	RB:(CL+CR) (90:10)	7.88±0.50	14.12±0.51
	RW:(CL+CR) (90:10)	5.26±0.15	14.81±0.34

#### 4. สรุป

จากการศึกษาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้ง 5 ประเภทในพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม พบว่าไบมันสำปะหลัง เหง้ามันสำปะหลัง และไบอ้อย เป็นกลุ่มวัสดุที่ให้ค่าความร้อนที่สูง ในขณะที่ตอซังข้าว และฟางข้าว เป็นวัสดุที่มีศักยภาพทางด้านปริมาณตลอดทั้งปี แต่มีค่าความร้อนที่ต่ำกว่า การศึกษาจึงได้ปรับปรุงคุณภาพวัสดุชีวมวลด้วยการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีค่าความร้อนสูงกว่าผสมผสานกับวัสดุที่มีค่าความร้อนต่ำ โดยรูปแบบของการผสมผสานวัสดุหลักที่มีปริมาณมากในพื้นที่ จะพบว่าการเพิ่ม

สัดส่วนของไบอ้อย (SL) กับฟางและตอซังในอัตราส่วนต่างๆ 20% ส่งผลให้วัสดุมีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 2 – 3% และมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ 14.5 MJ/kg ในขณะที่การผสมผสานวัสดุเสริมเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางพลังงานของฟางและตอซังข้าว พบว่าการเพิ่มสัดส่วนของไบมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) ในอัตราส่วน 50:50 ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด

การเพิ่มความหนาแน่นแก่วัสดุชีวมวลด้วยการอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงเม็ดจะทำให้ค่าความหนาแน่นทางพลังงาน หรือค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของ

วัสดุเพิ่มขึ้น สำหรับกลุ่มวัสดุหลัก การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากฟางและตอซังข้าวด้วยการผสมผสานใบอ้อย 20% จะส่งผลให้ค่าความร้อนและความหนาแน่นทางพลังงานสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การผสมผสานวัสดุเสริมที่มีปริมาณน้อยเพียง 10% ร่วมกับฟาง และตอซัง จะส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ มอก. 2772-2560

การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีค่าความร้อนสูงและต่ำเข้าด้วยกัน ส่งผลให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นทางพลังงานที่สูงขึ้น และมีความคงทนต่อการเสียดสี แรงกด การแตกร่วน และการดูดซึมน้ำ อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้อัตราส่วนของการผสมผสานวัสดุที่เหมาะสม นอกจากจะคำนึงถึงค่าความร้อนที่ต้องการแล้ว ยังต้องคำนึงถึงปริมาณวัสดุที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ในแต่ละช่วงเวลา สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงจากวัสดุเหล่านี้ในเชิงพาณิชย์ จึงจำเป็นต้องศึกษาฤดูกาลเก็บเกี่ยว ปริมาณผลผลิตที่เกิดขึ้นตลอดทั้งปี ปริมาณวัสดุที่ถูกใช้ประโยชน์ และที่เหลือทิ้งหรือสามารถใช้ประโยชน์เพื่อผลิตพลังงานได้ และต้องการศึกษาความพร้อมใช้และศักยภาพของวัสดุในพื้นที่เพื่อวางแผนการจัดการวัสดุเพื่อการผลิตอย่างต่อเนื่อง

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2566 คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และทุนสนับสนุนการดำเนินการวิจัยจากศูนย์สหวิทยาการการวิจัยเพื่อความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Wang, W. Huang, H. Wang, J. Gao, R. Zhang, G. Xu, and Z. Wang, "Research on the improvement of carbon neutrality by utilizing agricultural waste: based on a life cycle assessment of biomass briquette fuel heating system," *Journal of Cleaner Production*, vol. 434, no.1, pp. 140365, Jan. 2024.
- [2] DEDE. "Renewable Energy and Alternative Energy Development Plan 2018-2037 (AEDP 2018)". Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, Bangkok, Thailand, 2020.
- [3] R. Lal, "World crop residues production and implications of its use as a biofuel," *Environment International*, vol. 31, no. 4, pp. 575-584, May. 2005.
- [4] K. Kaczyński, K. Kaczyńska, and P. Petka, "Characteristics of agro and wood biomass combustion in the stream of inert material," in *XIV Research & Development in Power Engineering*, 2019, vol. 137.
- [5] A. I. Anukam, S. N. Mamphweli, P. S. Mabizela, and E. L. Meyer, "Blending influence on the conversion efficiency of the Cogasification process of corn stover and coal," *Journal of Chemistry*, vol. 2016, pp. 1-8, Jul. 2016.

- [6] P. Wisoram, "Enhancing energy performance of perennial grass feedstock," MS. thesis, Dept. Envi. Tech., Maharakham Univ., Maharakham, Thailand, 2020.
- [7] P. Luesopa, and W. Singhirunnusorn, "Blending agricultural residue as a source for biofuel production," *Journal of Science and Technology Maharakham University*, vol.42, no.4, pp. 127-137, Aug. 2023.
- [8] K. Hanaki and J. P. Pereira, "The effect of biofuel production on greenhouse gas emission reductions," in *Biofuel and Sustainability*, Ed. Tokyo: Springer Japan, 2018 pp. 53–71.
- [9] D. Sasongko, W. Wulandari, I. S. Rubani, and R. Rusydiansyah, "Effects of biomass type, blend composition, and co-pyrolysis temperature on hybrid coal quality," in *AIP Conference Proceedings*, vol.1805, no.1, Jan. 2017.
- [10] C. L. M. Martinez, E. Sermyagina, A. de C. O. Carneiro, E. Vakkilainen, and M. Cardoso, "Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil," *Biomass & Bioenergy*, vol.123, pp. 70–77, April. 2019.
- [11] W. Singhirunnusorn, P. Wisoram, and P. Boonruam, "Spatial distribution and potentiality of second-generation biofuels (SGBs): a case study of agricultural residues In Maha Sarakham province." in *Maharakham University Research Journal: Special Issues, 14<sup>th</sup> MSU Research Conference*, pp. 266-277, 2018.
- [12] D. Aller, S. Bakshi, and D. A. Laird, "Modified method for proximate analysis of biochars," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol.124, pp. 335-342, Mar. 2017.
- [13] J. Shen, S. Zhu, X. Liu, H. Zhang, and J. Tan, "The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no.5, pp. 983-987. May 2010.
- [14] N. Kaliyan and R. V. Morey, "Factors affecting strength and durability of densified biomass products," *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no.3, pp. 337-359, Mar. 2009.
- [15] Solid biofuel-biomass pellets, TIS standard 2772-2560, 2017.

# การใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันชนิด YOLOv8 ร่วมกับ หุ่นยนต์แบบคาร์ทีเซียนสำหรับการตรวจหาโรคและรดน้ำอัตโนมัติ

ดำรงศักดิ์ กิจเดช\* และ วีระพันธ์ ด้วงทองสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถนนเพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

รับบทความ 6 มกราคม 2568 แก้ไขบทความ 2 กรกฎาคม 2568 ตอรับบทความ 4 กรกฎาคม 2568

## บทคัดย่อ

ปัจจุบันสมาร์ตฟาร์มได้มีอิทธิพลกับงานเกษตรกรรมมากขึ้น เนื่องจากช่วยลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวิจัยพบว่าโรคที่เกิดขึ้นในพืชยังคงจำเป็นต้องใช้การสังเกตโดยคน งานวิจัยนี้จึงนำเสนอโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันชนิด YOLOv8 ร่วมกับหุ่นยนต์แบบคาร์ทีเซียนสำหรับการรดน้ำและการตรวจหาโรคอัตโนมัติ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้แคคตัสเป็นตัวอย่างในการทดลอง โดยหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปตำแหน่งต่างๆที่กำหนดเพื่อรดน้ำและถ่ายภาพเพื่อส่งให้ปัญญาประดิษฐ์ตรวจหาโรคเมื่อความชื้นในดินต่ำกว่าที่กำหนด หากพบโรค หุ่นยนต์จะทำการส่งภาพโรคที่เกิดขึ้นทางแอปพลิเคชันพร้อมเคลื่อนที่หัวฉีดไปยังตำแหน่งดังกล่าวเพื่อฉีดยากำจัดโรค ขั้นตอนการวิจัยเริ่มด้วยหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆพร้อมถ่ายภาพแคคตัส ต่อจากนั้นปัญญาประดิษฐ์จะทำการตรวจหาโรคพร้อมจับเวลาที่ใช้ จากนั้นนำภาพก่อนและหลังการตรวจหาโรคมาตรวจดูความถูกต้อง ผลที่ได้คือใช้เวลาในการประมวลผลแต่ละภาพโดยเฉลี่ย 0.57 วินาที ค่าความถูกต้องอยู่ที่ 90 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : โครงข่ายประสาทเทียม; คอนโวลูชัน; แคคตัส; คาร์ทีเซียน; ปัญญาประดิษฐ์

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 2807 4500-27 ต่อ 404, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: dumrongsakk@sau.ac.th

# Using the Convolution Neural Network (YOLOv8) with Cartesian Robot for Automatic Disease Detection and Watering

Dumrongsak Kijdech\* and Weerapun Duangthongsuk

Faculty of Engineering, Southeast Asia University

19/1 Phetkasem Road, Nongkangplu, Nongkham, Bangkok, 10160

---

*Received 6 January 2025; Revised 2 July 2025; Accepted 4 July 2025*

## Abstract

Currently, smart farm has influence to more agriculture. Due to production costs have decreased and productivity has increased. However, the study found that diseases occurring in plants still require human observation. A convolutional neural network (YOLOv8) with a cartesian robot for automatic disease detection and watering is proposed in this research. Which species of cactus are used as experimental model in this research. When the soil moisture falls below the target level, the robot is moved to the target location to watering the plants and collect images for disease detection using artificial intelligence. In case a disease is detected, the robot displays an alert on the LINE application and moves the injector to target position to spray disease eradication. During the research process, the robot moves to each target location and collects images of cactuses. After that, artificial intelligence is used for disease detection and measuring the usage time. Subsequently, the disease detection results from the before and after images are validated. The results indicated that the average prediction time was approximately 0.57 seconds and the accuracy was 90 percentage.

**Keywords :** AI; Cactus; Cartesian Robot; Convolution; Neural Networks

---

\* *Corresponding Author. Tel.: +66 2807 4500-27 ext. 404, E-mail Address: dumrongsakk@sau.ac.th*

## 1. บทนำ

แคคตัสเป็นไม้ดอกไม้ประดับซึ่งเป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน จึงทำให้มีราคาสูง การดูแลทำได้ค่อนข้างยากในกรณีที่แคคตัสต้นปริแตก เป็นแผล เนื่องจากแรงดันภายในต้น ที่เกิดจากการได้รับปุ๋ยและน้ำมากเกินไป หรือถูกแมงกินบางส่วน ในขณะที่ต้นยังอ่อนแออยู่ จนเกิดแผล หรือเป็นต้นที่ทำการกราฟมา ไม่ว่าจะมาเป็นแผลจากการฉีกได้ก็ตาม หากใช้หัวสปริงเกอร์ในการรดจะเกิดการฟุ้งกระจายของน้ำจนอาจโดนแผล เป็นเหตุให้แคคตัสเน่าได้ และยังมีประสิทธิภาพที่ต่ำ การรดน้ำควรรดบริเวณของโคนแคคตัสที่ละต้นทำให้ใช้เวลาในการรดน้ำต้นไม้ค่อนข้างใช้เวลามากยิ่งในกรณีในเชิงพาณิชย์ยิ่งใช้เวลามากขึ้น เกิดโรคได้ง่าย เช่น เพลี้ยแป้ง ทำให้แคคตัสตายอย่างรวดเร็ว งานวิจัยนี้จึงใช้แคคตัสเป็นตัวอย่างในการทดลอง โดยจากเหตุผลข้างต้นการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันชนิด YOLOv8 ร่วมกับหุ่นยนต์แบบคาร์ทีเซียนสำหรับการตรวจหาโรคและรดน้ำอัตโนมัติ โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการตรวจหาเพลี้ยเท่านั้น ในงานวิจัยนี้แบ่งการทบทวนวรรณกรรมเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ การหาปัญญาประดิษฐ์ที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ส่วนที่สองคือการหาวิธีการรดน้ำและการใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้

ส่วนแรก ปัญญาประดิษฐ์มีหลายชนิดที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย จึงจำเป็นต้องศึกษาว่าปัญญาประดิษฐ์ชนิดไหนเหมาะสมที่สุดโดยมีผลดังนี้ การเปรียบเทียบความเร็วในการฝึกข้อมูลและความเร็วในการตรวจจับวัตถุ โดยที่ A. Kuznetsova et al. [1] เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง YOLO V3 กับ YOLO V5 ซึ่งผลที่ได้คือ YOLO V5 มีความเร็วที่มากกว่าในส่วนของการฝึกข้อมูล ส่วนของความเร็วในการตรวจจับวัตถุและระบุตำแหน่งทำให้เร็วกว่าเมื่อใช้โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมขนาดเล็กสุด ในขณะที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมขนาดใหญ่จะได้ความเร็วในการระบุ

ตำแหน่งวัตถุที่เท่ากัน และ B. Benjdira et al. [2] ทำการเปรียบเทียบ Fast R-CNN กับ YOLO V3 ซึ่ง YOLO V3 มีประสิทธิภาพที่มากกว่า ที่ผ่านมามีการใช้ YOLOv3 YOLOv4 และ YOLOv5 ในงานต่างๆ มากมายดังแสดงตัวอย่างใน [3]-[5] ตามลำดับ โดยที่ Y. Tian et al. [3] ได้ YOLOv3 ในการตรวจหาผลแอปเปิลที่มีระดับความสุกที่เหมาะสมเพื่อให้หุ่นยนต์ทำการเก็บ Z. Jiang et al. [4] ทำการลดขนาดแบบจำลองของ YOLOv4 เพื่อให้สามารถทำงานแบบเรียลไทม์ได้ และ G. Yang et al. [5] ใช้ YOLOv5 ในการตรวจหาใบหน้าคน อย่างไรก็ตามได้มีบางงานวิจัยเช่นใน J. Du [6] ได้ทำการเปรียบเทียบทั้งฝั่งของ R-CNN, และฝั่งของ YOLO ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ YOLOv2 ซึ่งเป็นเวอร์ชันใหม่สุดในเวลานั้นสามารถตรวจจับวัตถุได้เร็วกว่า ยิ่งไปกว่านั้นได้มีการปรับปรุงปัญญาประดิษฐ์แบบต่างๆ ให้สามารถตรวจจับวัตถุในงานเฉพาะทางได้ดีขึ้นดังใน [7], [8] มีการใช้งาน YOLOv6 ใน Model ขนาดต่างๆในงานอุตสาหกรรม และใน C.-Y. Wang et al. [9] ได้นำเสนอการเปลี่ยนแปลงสถาปัตยกรรมบางส่วนของ YOLOv7 ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำและความเร็วได้มากกว่า YOLO รุ่นเก่า, ในขณะที่ J. Terven et al. [10] มีการใช้ YOLOv8 ซึ่งเป็น YOLO รุ่นใหม่สุดออกมาในปี ค.ศ. 2023 มีพื้นฐานมาจาก YOLOv5 โดยที่ YOLOv8 มี Model หลากหลายชนิดและหนึ่งในนั้นคือให้ mask ออกมาเหมือน Mask R-CNN จึงทำให้ปัจจุบันมีปัญหาประดิษฐ์ชนิดใหม่เพิ่มขึ้นตลอดเวลา หากมองหางานวิจัยที่นำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในด้านเกษตรคือ [11]-[13] โดยที่ D. Kijdech [11] ใช้ Convolution Neural Network ในการคัดแยกชนิดของวัชพืช โดยสามารถทำการคัดแยกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ D. Kijdech et al. [12] ใช้การควบคุมหุ่นยนต์แบบคาร์ทีเซียนเพื่อรดน้ำแคคตัสโดยกำหนดจุดรดน้ำโดยอัตโนมัติ และ K. P. Ferentinos

[13] ใช้ปัญญาประดิษฐ์ทั้งหมด 5 ชนิดมาเปรียบเทียบกันในการตรวจหาโรคที่เกิดขึ้นที่ใบพืช 25 ชนิดพืชและ 58 กลุ่มโรค ซึ่งได้ผลความแม่นยำที่ 37 เปอร์เซ็นต์ในสภาพแวดล้อมจริง เนื่องจากไม่ได้นำภาพจากสภาพแวดล้อมจริงเข้าฝึกด้วย อย่างไรก็ตามงานวิจัยเหล่านี้เป็น YOLO เวอร์ชันเก่าที่มีความช้ากว่าและไม่สามารถติดตามพื้นที่ที่สนใจได้ทำได้แค่ติกรอบสี่เหลี่ยมและตัวงานวิจัยเป็นแค่การจำแนกชนิดของแคคตัสมีได้นำมาตรวจหาโรค จากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นพบว่า ปัญญาประดิษฐ์ทางฝั่งของ YOLO มีความเร็วมากกว่า โดยที่ได้ผลลัพธ์เหมือนกัน หากมีการทำ YOLO เวอร์ชันใหม่กว่าออกมาจะมีความเร็วมากกว่าเสมอและมีโมเดลที่หลากหลายมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ YOLOv8 ซึ่งเป็นเวอร์ชันล่าสุดขณะนั้นมาใช้งาน

ส่วนที่สอง ได้ทำการศึกษาหาชนิดของหุ่นยนต์และชนิดของเซ็นเซอร์ที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ ในส่วนของ การรดน้ำต้นไม้ [14], [15] ได้ทำระบบรดน้ำต้นไม้เช่นกัน แต่เป็นการรับค่าความชื้นในดิน อุณหภูมิอากาศ และทำการสั่งหัวรดน้ำที่เป็นแบบไม่สามารถควบคุมไม่ให้ยอดต้นไม้โดนน้ำได้จึงเหมาะสมสำหรับต้นไม้ทั่วไป แต่ไม่ใช่สำหรับแคคตัส แต่มีการส่งข้อมูลขึ้นออนไลน์เพื่อให้เจ้าของดูแบบออนไลน์ได้ ในขณะที่ Y. Huang et al. [16] ใช้เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน อุณหภูมิ และความชื้นในอากาศเพื่อทำการรดน้ำอย่างเหมาะสม ส่วน N. Hema et al. [17] ใช้ Mobile Robot ช่วยในการรดน้ำโดยมี RFID Tag สำหรับระบุตัวของต้นไม้และกระถาง ซึ่งมีเซ็นเซอร์ต่างๆติดอยู่ที่แต่ละกระถางและส่งสัญญาณแบบไร้สายไปที่ตัว Mobile Robot โดยเส้นทางการเคลื่อนที่จะได้จากการติดตามเส้นสีดำที่พื้น ในขณะที่ P. Tangtisanon [18] ใช้สปริงเกอร์ในการรดน้ำต้นไม้โดยพิจารณาความชื้นในดินและใช้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในการกำจัดวัชพืชที่อยู่ในบริเวณการควบคุมจะ ใช้การควบคุมแบบ Fuzzy Logic จากงานวิจัยต่างๆ

ข้างต้นจะพบว่ามีการใช้ IoT หรือ Internet of thing ร่วมกับหุ่นยนต์ในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดและเหมาะสมกับงานนั้นๆ โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้หุ่นยนต์แบบคาร์ทีเซียนแนวตั้งเนื่องจากปลูกภายในอาคารช่วยประหยัดพื้นที่และต้นทุนในการทำต่ำกว่าการใช้ Mobile Robot มาก

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

ตัวแปรที่จะศึกษาคือความถูกต้องแม่นยำในการตรวจโรค ความสามารถในการรักษาโรค ปริมาณน้ำที่ใช้ในการรดน้ำแคคตัสที่ค่าความชื้นในดินเดียวกัน ในส่วนของค่าความแม่นยำในการตรวจโรคจะทำการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนต้นที่เป็นโรคทั้งหมดเทียบกับจำนวนต้นที่พบโรค ส่วนของความสามารถในการรักษาโรคจะทำการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนต้นที่ตรวจพบโรครกับจำนวนต้นที่ได้รับการฉีดยากำจัดโรค โดยระบบอัตโนมัติแล้วหา ส่วนของปริมาณน้ำที่ใช้ในการรดแคคตัสที่ค่าความชื้นในดินเท่ากันเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการรดแบบปกติที่ใช้หัวสปริงเกอร์แบบละเอียด (สปริงเกอร์ 1 ตัว ต่อแคคตัส 4 ต้น) เทียบกับการรดแบบใช้หุ่นยนต์รดน้ำของงานวิจัยนี้

ระเบียบวิธีวิจัยถูกแบ่งเป็น 4 คือ อุปกรณ์การทดลอง การพัฒนาระบบควบคุม การเตรียมข้อมูลและการฝึกข้อมูล และขั้นตอนนผลการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

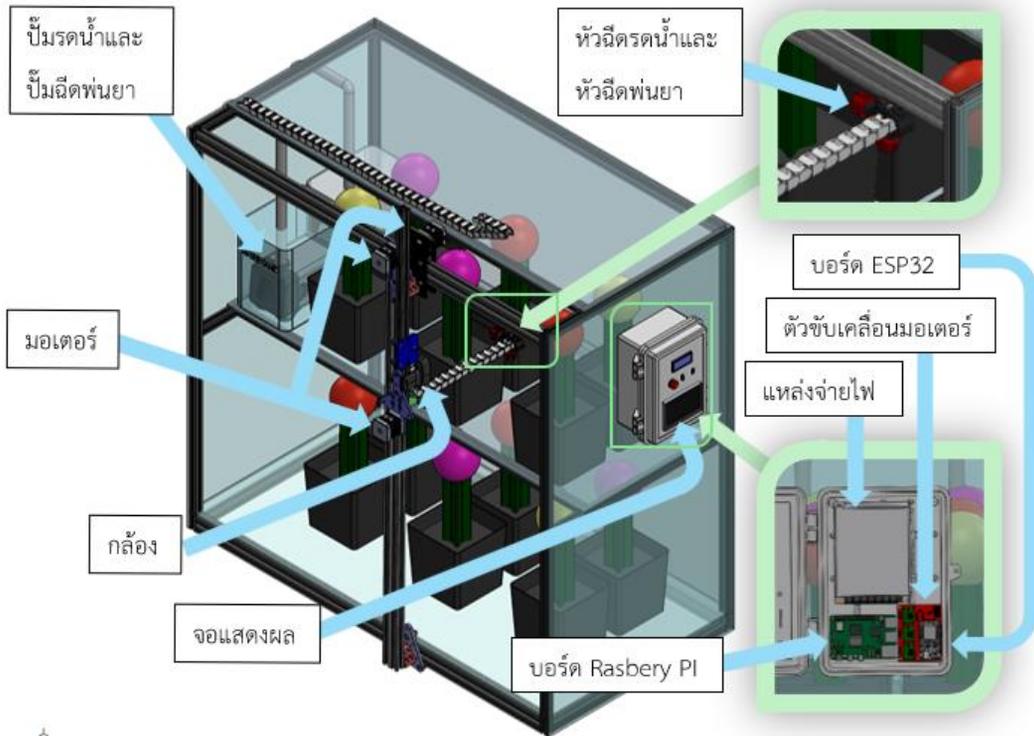
### 2.1 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีส่วนประกอบหลักคือ กล้อง Webcam Logitech C525 ความละเอียด 720p อัตราภาพ 30 fps ใช้ในการเก็บรวบรวมภาพสำหรับฝึกปัญญาประดิษฐ์ชนิด YOLOv8 และสำหรับตรวจจับโรคแบบเรียลไทม์ ส่วนต่อมาเป็นบอร์ด Rasberry Pi 5 ทำหน้าที่เป็นคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ส่วนถัดมาคือ จอแสดงผลแบบจอสัมผัส WAVESHARE

ขนาด 7 นิ้ว ใช้ในการแสดงผลภาพแคคตัสที่ตรวจพบโรค (เพลี้ย) ในระบบรดน้ำและพ่นยาจะมีหัวฉีดที่ฉีดเป็นฝอยละออง 2 หัวและมีปั้มน้ำแยกกัน

ส่วนชุดหุ่นยนต์ขับเคลื่อนคาร์ทีเซียนขนาด 50 ซม. x 100 ซม. x 100 ซม. ภายในมีสเต็ปมอเตอร์ Nema 17 3 ตัว ใช้ในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ใน 3 แกน

เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินรุ่น YL-69 และใช้บอร์ด ESP32 ในการควบคุมหุ่นยนต์และรับส่งข้อมูล ส่วนของตัวขับเคลื่อนมอเตอร์เป็น A4988 Driver ร่วมกับ CNC Shields V3 ส่วนแหล่งจ่ายไฟใช้เป็น Power supply 12V 30A โดยที่ภาพรวมโครงสร้างของหุ่นยนต์ถูกแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบหลักของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลอง

## 2.2 การพัฒนาระบบควบคุม

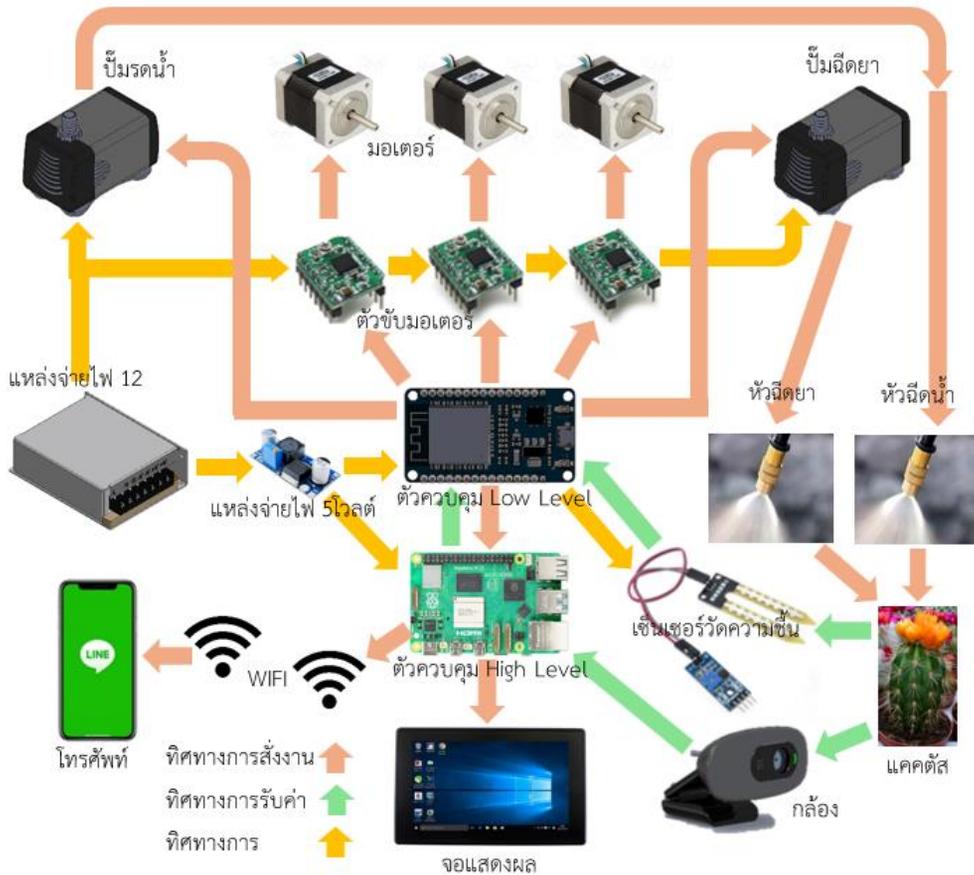
ภาพรวมของระบบรดน้ำอัตโนมัติและตรวจโรคในแคคตัสแสดงในรูปที่ 2 ระบบการทำงานเริ่มจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินถูกปิดไว้แล้วละ 1 ตัว เมื่อค่าความชื้นในดินต่ำกว่า 40% หุ่นยนต์จะทำการเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่กำหนดซึ่งถูกแสดงดังรูปที่ 3 โดยหุ่นยนต์จะเคลื่อนจากทางด้านล่างซ้ายไปขวาจากนั้นเคลื่อนที่ขึ้นไปยังชั้นที่ 2 และเคลื่อนที่จากขวาไปซ้าย ตามลำดับตัวเลขที่แสดงในรูปที่ 3 แต่ละตำแหน่งตัวหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่หัวฉีดรดน้ำเข้าไปด้านในเพื่อรดน้ำต้นแคคตัส

ด้านในด้วย โดยที่น้ำถูกเก็บอยู่ในถังพักและมีปั้มน้ำใช้ในการรดน้ำขึ้นมา เมื่อถึงจุดที่กำหนดบอร์ด ESP32 (Low Level) จะทำการสั่งให้ปั้มน้ำทำงานผ่านรีเลย์ในปริมาณน้ำที่กำหนด

ในส่วนของการตรวจจับเพลี้ยในแคคตัส เริ่มจากกล้องจะทำการเก็บภาพใน 6 จุด ที่กำหนด ซึ่งการเก็บภาพจะเกิดขึ้นเมื่อความชื้นในดินต่ำกว่าที่กำหนด ก่อนการรดน้ำของแต่ละแถว จะทำการการถ่ายภาพ 1 ครั้งโดยสามารถมองเห็นแคคตัสได้ทั้งแถว และส่งไปยังบอร์ด Rasbery Pi5 ปัญญาประดิษฐ์ชนิด YOLOv8 ภายใน

บอร์ดจะทำการตรวจหาโรคผ่านภาพที่ส่งมา หากพบเชื้อในแคคตัสระบบภายในบอร์ด Rasbery Pi5 (High Level) จะทำการส่งค่าตำแหน่งที่เกิดโรคไปยังบอร์ด ESP32 เพื่อควบคุมหุ่นยนต์ส่งงานปั๊มเพื่อฉีดน้ำยากำจัดเชื้อหลังจาก

รดน้ำแล้ว จากนั้นส่งรูปต้นแคคตัสที่เกิดโรคไปยังแอปพลิเคชันเพื่อแสดงผลและแจ้งเตือน ในส่วนของจอแสดงผลที่เชื่อมต่อกับบอร์ด Rasbery Pi5 จะทำการแสดงผลการตรวจหาโรคแบบเรียลไทม์

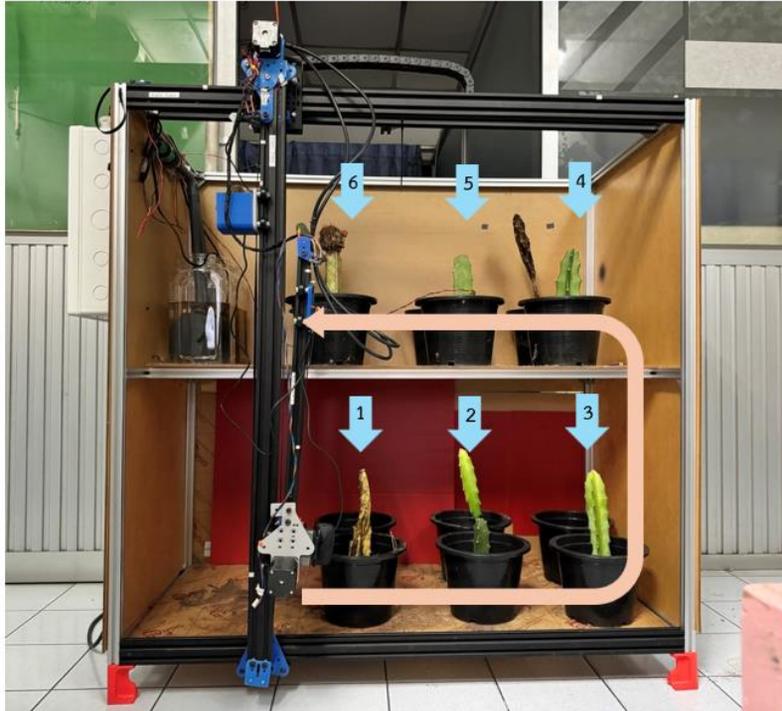


รูปที่ 2 ภาพรวมของระบบรดน้ำอัตโนมัติและตรวจโรคในแคคตัส

### 2.3 การเตรียมข้อมูล (Dataset) และการฝึกข้อมูล (Data Training)

งานวิจัยนี้ใช้ปัญญาประดิษฐ์ชนิด YOLOv8 (You Only Look Once Version 8) ในการตรวจหาเชื้อในแคคตัส โดยที่ YOLOv8 มีพื้นฐานมาจากเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolution Neural Networks) โดย Ultralytics

[20] แสดงให้เห็นว่า YOLOv8 ถูกแบ่งออกเป็น 5 แบบหลัก ได้แก่ (1) การจำแนกประเภทวัตถุ (Classify), (2) การตรวจจับตำแหน่งของวัตถุ (Detect), (3) การแยกขอบเขตของวัตถุ (Segment), (4) การติดตามการเคลื่อนไหวของวัตถุ (Track) และ (5) การระบุท่าทางของวัตถุ (Pose) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยงานวิจัยนี้เลือกการทำ Segment ซึ่งมีความเหมาะสมกับงานมากที่สุด



รูปที่ 3 ตำแหน่งที่กำหนดและทิศทางทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์



รูปที่ 4 รูปแบบในการทำปัญหาประดิษฐ์ของ YOLOv8 (Ultralytics [20])

ปัจจุบันเป็นเวอร์ชันล่าสุดที่นิยมมากในการนำมาใช้งานร่วมกับกล้อง เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้มีตัวเลือกการใช้งานที่หลากหลาย ใช้งานง่ายและใช้เวลาในการฝึกข้อมูลน้อยเมื่อเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดอื่น โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Networks) คือการจำลองโครงข่ายประสาทในสมองของมนุษย์ซึ่งช่วยให้สามารถตัดสินใจงานที่มีความซับซ้อนได้ เช่น พื้นหลัง แสงและเงา รวมไปถึงรูปร่างของ

ของวัตถุที่เปลี่ยนไปมา YOLOv8 มีความเร็วในการประมวลผลสูง ส่วนของความแม่นยำขึ้นอยู่กับจำนวนของภาพและความหลากหลายของภาพที่นำมาฝึกปัญหาประดิษฐ์

การฝึกปัญหาประดิษฐ์ ภาพที่ใช้ในการฝึกปัญหาประดิษฐ์จะใช้ภาพที่ได้จากกล้อง Webcam ถูกลดความละเอียดลงเหลือ 640 x 640 pixel โดยภาพที่ใช้ในการฝึกจะมีพื้นหลังที่หลากหลายและมีรูปร่างของ

โรคที่แตกต่างกันออกไป ภาพที่ใช้ในการฝึกข้อมูล (Dataset) อยู่ที่ 96 ภาพ ซึ่งภาพที่ใช้ในการฝึกทั้งหมดมาจากการถ่ายภาพแคดคัสที่ใช้ในการทดลองจริงและโหลดมาจากเว็บไซต์ออนไลน์ การทำ Label ให้กับ Dataset ทั้งหมดถูกทำบนเว็บไซต์ Roboflow ซึ่งภาพที่ถูกทำ Label แล้ว ถูกแสดงดังรูปที่ 5 และได้ทำการใช้กระบวนการทางภาพ ช่วยทำภาพเพิ่มเติม (Augmentations) ทำให้มีภาพที่ใช้ในการฝึกข้อมูลทั้งหมดเพิ่มจาก 96 ภาพ เป็น 240 ภาพ ภาพที่เพิ่มเข้ามาได้จากการกลับภาพแนวอน (Flip), การหมุนภาพ 90 องศาในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา (Rotate), การตัดภาพบางส่วน ชุม 26% (Crop), การทำภาพเอียง  $\pm 14$  องศา (Shear) และการทำภาพเบลอ (Blur) เป็นต้น โดยภาพทั้งหมดเป็นภาพที่ใช้ในการฝึกปัญญาประดิษฐ์ (Training) 216 ภาพ ภาพที่ใช้ในการประเมินผลการฝึก (Valid) 13 ภาพ และภาพที่ใช้ในการทดสอบ 11 ภาพ ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการฝึกปัญญาประดิษฐ์มีดังนี้ จำนวนชั้นในการฝึก (Layer) ทั้งหมด 261 เลเยอร์, มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 11,790,870 พารามิเตอร์, Optimizer เป็น Adam, อัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) อยู่ที่ 0.001667, Momentum อยู่ที่ 0.9, Batch size ใช้เป็น 60% ของ CUDA Memory จำนวนรอบในการฝึก (Epoch) อยู่ที่ 100 รอบ

โครงสร้างภายในของแบบจำลอง YOLOv8 เป็นการผสมกันหลายชั้นของ Convolution Layer, BN (Batch Normalization) Layer และ Leaky ReLU (Rectified Linear Unit) เพื่อช่วยให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถตรวจจับและตีเส้นขอบได้ดียิ่งขึ้น โดยที่ Convolution Layer คือการนำภาพมาใส่ตัวกรอง (Filter) แบบต่างๆ ส่วน Batch Normalization จะช่วยให้แต่ละ Layer ในโครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้ได้ด้วยตัวเองอย่างอิสระและลดการผูกติดกับ Layer อื่นๆ ส่วน Leaky ReLU คือการเปลี่ยนค่า

ต่างๆให้เป็นค่าบวกทั้งหมดเนื่องจากการกรองภาพโดยใช้ Convolution Layer จะทำให้ค่าที่ได้บางค่ามีค่าติดลบทำให้ไม่สามารถแสดงภาพได้ ตัวอย่างโครงสร้างภายในช่วงขาเข้า (Input) และขาออก (Output) ของ YOLOv8 ถูกแสดงดังรูปที่ 6

การฝึกปัญญาประดิษฐ์จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีการ์ดจอที่มีความสามารถในการประมวลผลที่สูงมาก สำหรับการการฝึกปัญญาประดิษฐ์งานวิจัยนี้ทำการฝึกบน Google Collab ซึ่งเป็น การประมวลผลแบบออนไลน์ โดยใช้การ์ดจอ NVIDIA Tesla T4 ใช้ Python เวอร์ชัน 3.10.12 ในการเขียนโปรแกรมฝึกและใช้ Pytorch เวอร์ชัน 2.3.0 เป็น Backbone ส่วนโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานการ์ดจอเป็น cu121 และใช้ CPU (Intel Xeon 2.20GHz) และ เวลาที่ใช้ในการฝึกข้อมูลทั้งหมด 0.284 ชั่วโมง หลังจากทำการฝึกเสร็จจะได้แบบจำลอง (Model) สำหรับการตรวจหาเปลี้ยและระบุตำแหน่งโดยการตีเส้นขอบวัตถุ

ในส่วนของ อัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) ไม่มีค่าที่ตายตัว ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งอัตราการเรียนรู้ควรมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการ Overfitting (การที่ไม่สามารถตรวจหาโรคจากรูปที่ไม่ได้ถูกนำมาฝึกได้) แน่นนอนว่าหากมีค่าน้อยเกินไปจะทำให้จำเป็นต้องใช้เวลาในการฝึกข้อมูลมากขึ้น อย่างไรก็ตามมีค่าที่แนะนำคือหากรูปที่ใช้ในการฝึกข้อมูลน้อยกว่า 1,000 รูป ควรใช้ค่าอัตราการเรียนรู้ในช่วง 0.001 - 0.005 โดยอ้างอิงจาก Smith et al. [19] ในส่วนของจำนวนรอบในการฝึก (Epoch) ไม่มีค่าตายตัวเช่นเดียวกับอัตราการเรียนรู้ หากใช้มากเกินไปเวลาในการฝึกข้อมูลจะมากขึ้นตามไปด้วย โดยงานวิจัยนี้ใช้ 100 รอบ หากมองที่ผลของการฝึกข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าสามารถฝึกข้อมูลเพิ่มได้อีก อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่าแบบจำลองที่ได้มีความแม่นยำเพียงพอแล้ว เนื่องจากการทดลองระบบปิด

## 2.4 ขั้นตอนในการทดลอง

ปกติหุ่นยนต์จะทำงานตาม Flow Chart ในรูปที่ 7 ในกรณีที่ความชื้นต่ำกว่า 40% ระบบจะเริ่มต้นอีกครั้งและพ่นยาซ้ำจนกว่าพืชจะตายหมด

โดยการทดลองถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การเก็บผลปริมาณน้ำที่สูญเสียการรดน้ำแบบปกติ นั่นคือการเปิดสปริงเกอร์รดน้ำจนกว่าค่าความชื้นในดินจะถึงจุดที่กำหนดเปรียบเทียบกับการรดเป็นรายต้นของงานวิจัยนี้ และอีกส่วนคือการนำแบบจำลองที่ได้จาก YOLOv8 มาทำการทดสอบกับภาพที่ไม่ได้ถูกนำมาทดลองเพื่อหาค่าความถูกต้องของปัญญาประดิษฐ์

ส่วนแรก จะทำการเก็บผลโดยการเปิดโซลินอยด์วาล์วจนกว่าค่าความชื้นในดินจะถึงจุดที่กำหนด (โดยในโหมดนี้ระบบทำการรดทุก 1 ชั่วโมง) จึงปิดโซลินอยด์วาล์วและจับเวลา จากนั้นนำหัวสปริงเกอร์มาใส่ในขวดและทำการเปิดและปิดโซลินอยด์วาล์วเท่ากับเวลาที่ได้จากการทดสอบ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักหาปริมาณน้ำที่ใช้ โดยแบ่งเป็นการรดแบบปกติคือสปริงเกอร์ 1 ตัว รดน้ำต้นไม้ 4 ต้น กับการรดน้ำเป็นรายต้นของงานวิจัยนี้ ทำการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง (หยุดรดน้ำโดยการรับค่าจากเซ็นเซอร์วัดความชื้นระบบตัดโซลินอยด์วาล์วอัตโนมัติ)



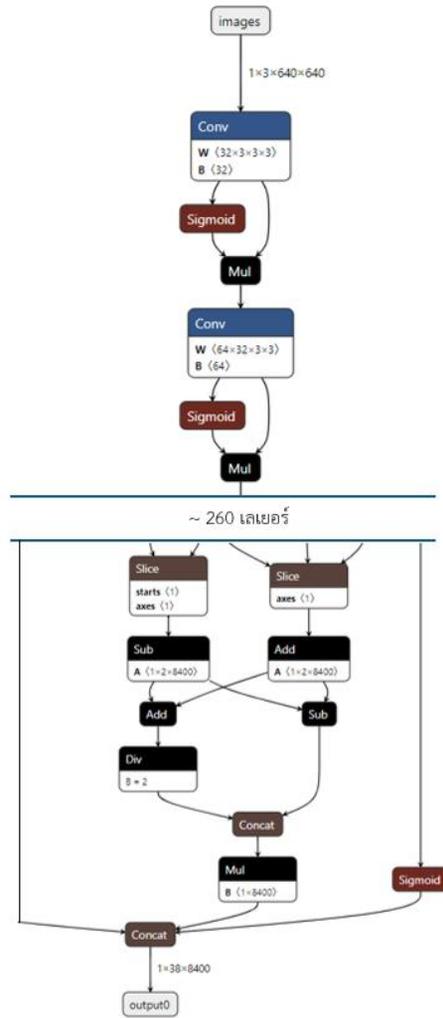
รูปที่ 5 แสดงตัวอย่าง Dataset ที่ถูกใช้ในการทดลองนี้ โดยสีม่วงเป็นตำแหน่งที่เกิดเพรี้ยและสีเหลืองคือต้นแคคตัส

ส่วนที่สอง ทำการเก็บผล 2 แบบ แบบแรก คือการเก็บผลการฝึกข้อมูล โดยผลที่ได้ถูกแสดงเป็นกราฟ แกน Y มีค่าเป็น 0 – 1 เป็นตัวแทนของ 0 – 100% ขณะที่แกน X เป็นจำนวนครั้งในการฝึกข้อมูล ค่าที่แสดงมี 2 ส่วน คือ ค่า Loss จากการฝึกข้อมูลและค่า Loss จากการประเมินผล ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยที่ค่ายิ่งน้อยยิ่งมีความแม่นยำมาก

Box loss เป็นการฝึกและประเมินผลเพื่อให้ดีกรอบสีเหลืองมวัตถุที่สนใจให้ถูกต้องและแม่นยำ, Seg (Segmentation) Loss เป็นการฝึกและประเมินผลเพื่อให้ดีกรอบตามรูปร่างวัตถุที่สนใจให้ถูกต้องและแม่นยำ, Cls (Classification) Loss เป็นการฝึกและประเมินผลเพื่อคัดแยกชนิดของวัตถุที่สนใจให้ถูกต้อง, Dfl (Distributed

Focal Loss) Loss เป็น Loss ที่เพิ่มขึ้นใหม่ใน YOLOv8 ถูกออกแบบมาเพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการตรวจจับวัตถุโดยมุ่งเน้นไปที่ตัวอย่างที่ตรวจพบได้ยาก ใช้การกำหนดค่าน้ำหนักที่ท้าทายมากขึ้น ทำให้เชื่อถือได้และแม่นยำมากขึ้นในสภาพแวดล้อมที่มีความหลากหลาย ในขณะที่รูปที่ 9 แสดงผลการฝึกข้อมูลในส่วนของค่า Precision คือความแม่นยำเป็นการวัดปริมาณสัดส่วนของผลในทางบวกที่แท้จริง จากการคาดการณ์เชิงบวกทั้งหมด โดยประเมินความสามารถของแบบจำลองเพื่อหลีกเลี่ยงผลบวกหลง ในขณะที่ค่า Recall คือการคำนวณสัดส่วนของผลบวกจริงเทียบกับผลทางบวกจริงทั้งหมด โดยวัดความสามารถของแบบจำลองที่ใช้กับตัวอย่างทั้งหมด,

mAP50 (mean Average Precision) คือความแม่นยำเฉลี่ยที่คำนวณที่มีความทับซ้อนกันระหว่างพื้นที่ (IOU, Intersection Over Union) ที่ 0.50 เป็นการวัดความแม่นยำของแบบจำลองโดยพิจารณาเฉพาะการตรวจจับที่ง่ายเท่านั้น ขณะที่ mAP50-95 คือความแม่นยำเฉลี่ยที่คำนวณที่มีความทับซ้อนกันระหว่างพื้นที่ ตั้งแต่ 0.50 ถึง 0.95 โดยครอบคลุมเกี่ยวกับประสิทธิภาพของแบบจำลองในระดับยาก แบบสอง เป็นการนำภาพที่ไม่ได้อยู่ในการฝึกข้อมูลและการประเมินผลข้อมูล ซึ่งเป็นภาพจริงที่ใช้ในการทดลอง โดยแบ่งเป็นภาพที่มีเปรียบเทียบกับภาพที่ไม่มีเปรียบมาอย่างละ 10 ภาพ จากนั้นทำการทำนายแล้วเทียบกับเฉลยและเวลาที่ใช้เฉลี่ย



รูปที่ 6 ตัวอย่างโครงสร้างภายในของแบบจำลอง YOLOv8

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \tag{1}$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \tag{2}$$

$$F_1 = \left( \frac{\text{Recall}^{-1} + \text{Precision}^{-1}}{2} \right)^{-1} \tag{3}$$

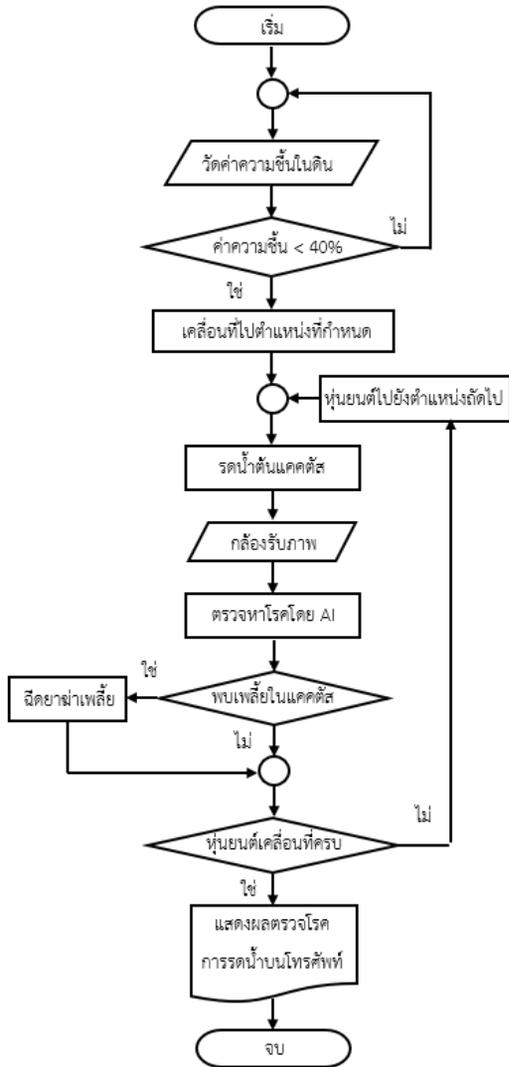
สมการที่ (1) แสดงการคำนวณค่า Precision และ สมการที่ (2) แสดงการคำนวณค่า Recall โดยค่า TP (True Positive) คือกรณีที่แบบจำลองทำนายว่ามี class และมี class จริง ส่วน FP (False Positive) คือ กรณีที่แบบจำลองทำนายว่ามี class แต่จริงๆแล้วไม่มี class (บางครั้งเรียก Type I error) และ FN (False Negative) คือ กรณีที่แบบจำลองทำนายว่าไม่มี class แต่จริงๆ แล้วมี class อยู่ (บางครั้งเรียก Type II error) ขณะที่การคำนวณหาค่า F1 Score โดยใช้สมการที่ (3) เป็นค่าเฉลี่ยของ Precision และ Recall ซึ่งจะได้การประเมินที่สมดุลของประสิทธิภาพของแบบจำลอง

### 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากรูปที่ 8 แสดงผลการฝึกข้อมูลและประเมินผล ข้อมูล ในส่วนของ Bounding Box, Segmentation, Classification และ Distributed Focal Loss มีค่า Loss ต่ำมากอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และในรูปที่ 9 แสดงความแม่นยำในการตอบถูก (Precision) ทั้งในส่วนของ Box และ Mask อยู่ที่ประมาณ 75% ขณะที่ค่า Recall ของ Box และ Mask อยู่ที่ประมาณ 55% และ 45% ตามลำดับ, ค่า mAP50 ของ Box และ Mask อยู่ที่ประมาณ 60% และ 50% ตามลำดับ และ ค่า mAP50-95 ของ Box และ Mask อยู่ที่ประมาณ 30% และ 25% ตามลำดับ

รูปที่ 10 แสดงผลการตรวจหาโรคที่ถูกส่งไปยัง แอปพลิเคชันไลน์ ในกรณีที่ตรวจพบโรค โดยภาพที่ได้จะเป็นภาพจากกล้องที่ติดอยู่ที่ตัวหุ่นยนต์ เมื่อมีสัญญาณจากบอร์ดควบคุมที่เครื่องแจ้งมา ระบบปัญญาประดิษฐ์ที่คอมพิวเตอร์จะทำการตรวจจับโรคและหากพบจะทำการส่งไปยังไลน์

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณน้ำที่ใช้ในการรดน้ำแบบ ปกติเปรียบเทียบกับแบบรดน้ำรายต้นของงานวิจัยนี้โดย



รูปที่ 7 แสดงการทำงานของระบบบรรดน้ำอัตโนมัติ และตรวจโรคในแคคตัส

ทำการทดลอง 3 ครั้ง ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำที่ใช้ในการรดน้ำแบบปกติอยู่ที่ 267 ลูกบาศก์เซนติเมตร ขณะที่ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำที่ใช้ในการรดน้ำแบบรายต้นคือ 82 ลูกบาศก์เซนติเมตร ประหยัดน้ำไป 185 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อการรดน้ำ 1 ต้น หรือ 69.29%

ตารางที่ 2 แสดงเวลาที่ใช้ในการการหาตำแหน่งและจำแนกเพลี้ยแป้งออกจากแคคตัสโดยเป็นภาพที่ไม่มีเพลี้ยแป้งอยู่ เวลาที่ใช้เฉลี่ย 437.3 มิลลิวินาที อัตราการหายถูกคือ 70% โดยผลการทดลองใน ตารางที่ 2 และ ตารางที่ 3 ใช้ภาพที่ถ่ายในตำแหน่งจริง แต่นำมาทดลองแยกเพื่อลด Error จากปัจจัยอื่น ๆ

ขณะที่ตารางที่ 3 แสดงเวลาที่ใช้ในการหาตำแหน่งและจำแนกเพลี้ยแป้งออกจากแคคตัสโดยเป็นภาพที่มีเพลี้ยแป้งอยู่ เวลาที่ใช้เฉลี่ย 570.1 มิลลิวินาที อัตราการหายถูกคือ 90%

Precision สำหรับการทดลองจริงคือ 0.75 ส่วนค่า Recall สำหรับการทดลองจริงคือ 0.9 และค่า F1 Score สำหรับการทดลองจริงคือ 0.81

ในส่วนของ Confusion matrix แสดงดังรูปที่ 13 ได้แสดงให้เห็นว่าหากทำการตรวจหา 3 ประเภท คือการรวมพื้นหลังเข้าไปด้วย ทำให้สามารถตรวจหาแคคตัสได้ 78% เพลี้ยแป้ง 50%

**ตารางที่ 1** แสดงปริมาณน้ำที่ใช้ในการรดน้ำแบบปกติเปรียบเทียบกับแบบรดน้ำรายต้น

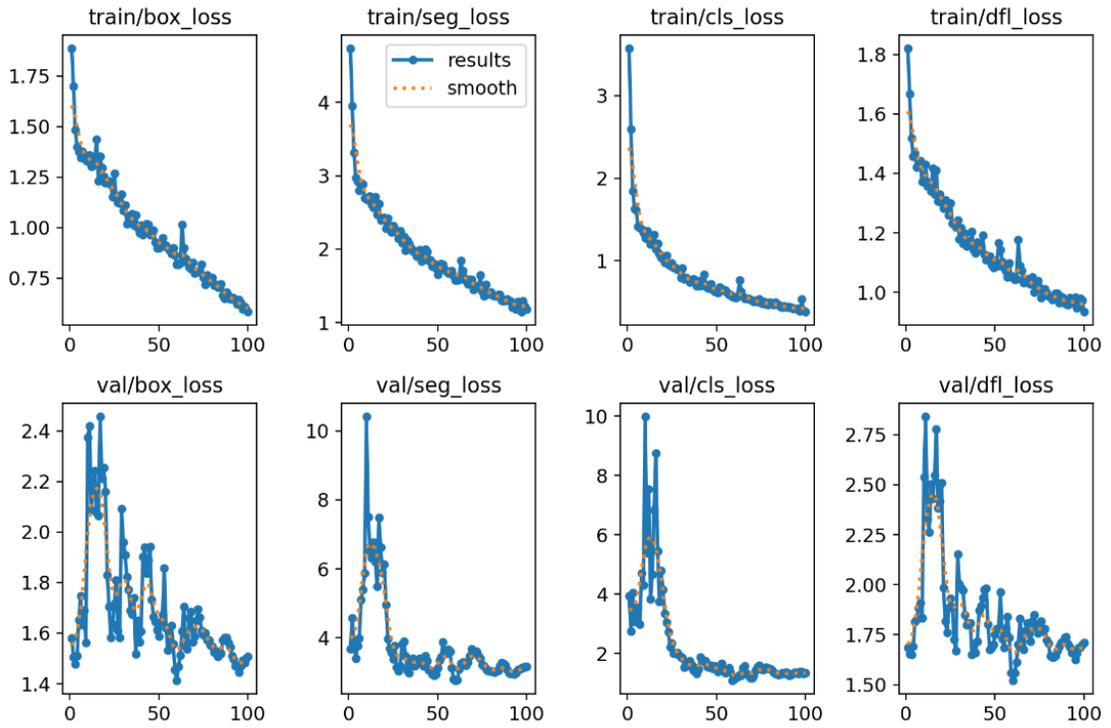
ครั้งที่	ปริมาณน้ำที่ใช้แต่ละต้น	
	แบบปกติ (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	จากการทดลอง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	115	80
2	114	83
3	116	83
เฉลี่ย	267	82

**ตารางที่ 2** แสดงเวลาที่ใช้ในการหาตำแหน่งและจำแนกเพลี้ยแป้งออกจากแคคตัสโดยเป็นภาพที่ไม่มีเพลี้ยแป้งอยู่

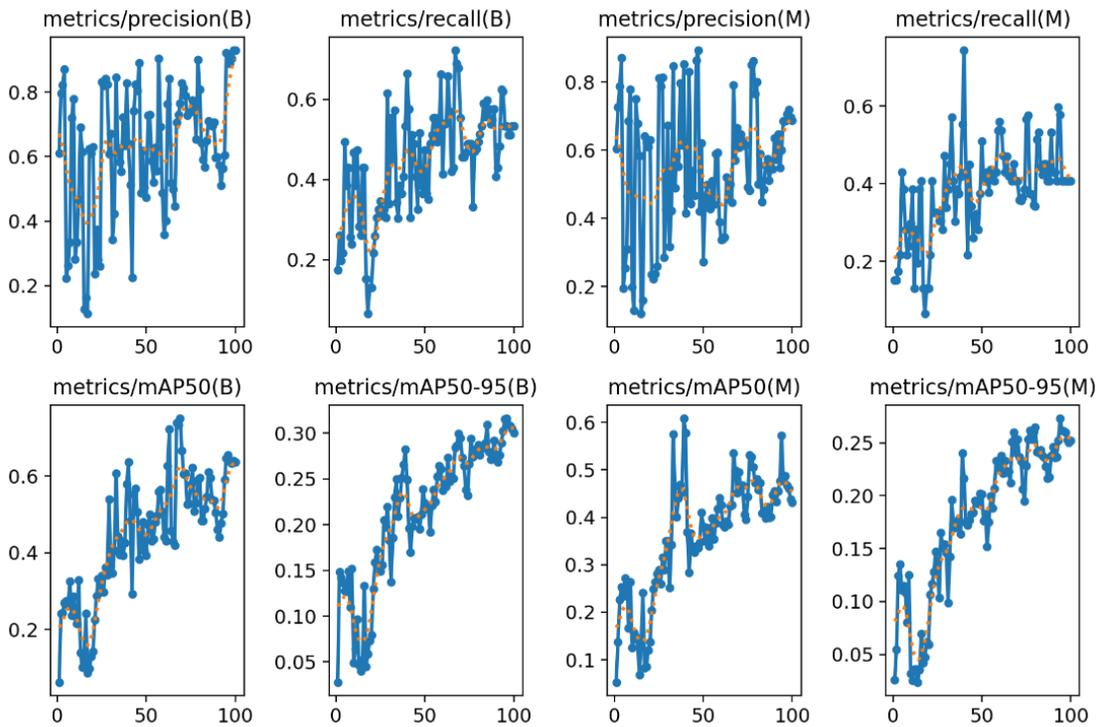
ภาพที่	ภาพที่ไม่มีเพลี้ยแป้ง	เวลาที่ใช้ (มิลลิวินาที)
1	ไม่พบ	583.5
2	ไม่พบ	516.1
3	ไม่พบ	461.6
4	ไม่พบ	419.5
5	พบ	660.3
6	ไม่พบ	583.1
7	พบ	365.8
8	พบ	346.7
9	ไม่พบ	225.3
10	ไม่พบ	211.5
เวลาเฉลี่ย		437.3

**ตารางที่ 3** แสดงเวลาที่ใช้ในการหาตำแหน่งและจำแนกเพลี้ยแป้งออกจากแคคตัสโดยเป็นภาพที่มีเพลี้ยแป้งอยู่

ภาพที่	ภาพที่มีเพลี้ยแป้ง	เวลาที่ใช้ (มิลลิวินาที)
1	พบ	620.1
2	พบ	723.9
3	พบ	614.9
4	พบ	384.4
5	พบ	696.2
6	ไม่พบ	535.6
7	พบ	489.2
8	พบ	584.6
9	พบ	516.0
10	พบ	536.0
เวลาเฉลี่ย		570.1



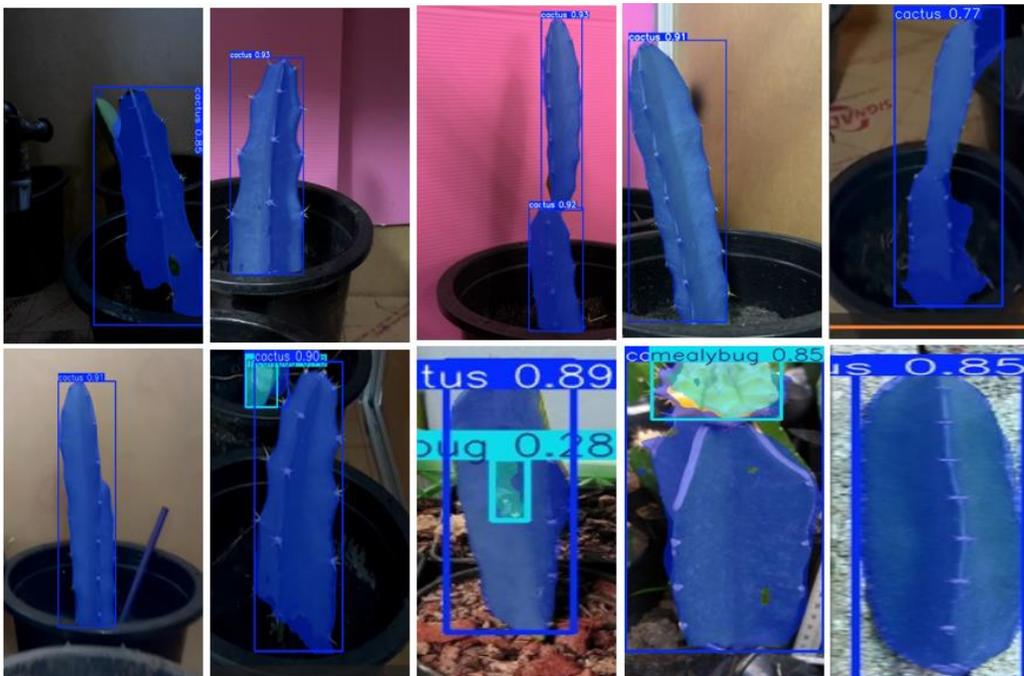
รูปที่ 8 ผลการฝึกข้อมูลและประเมินผลข้อมูล



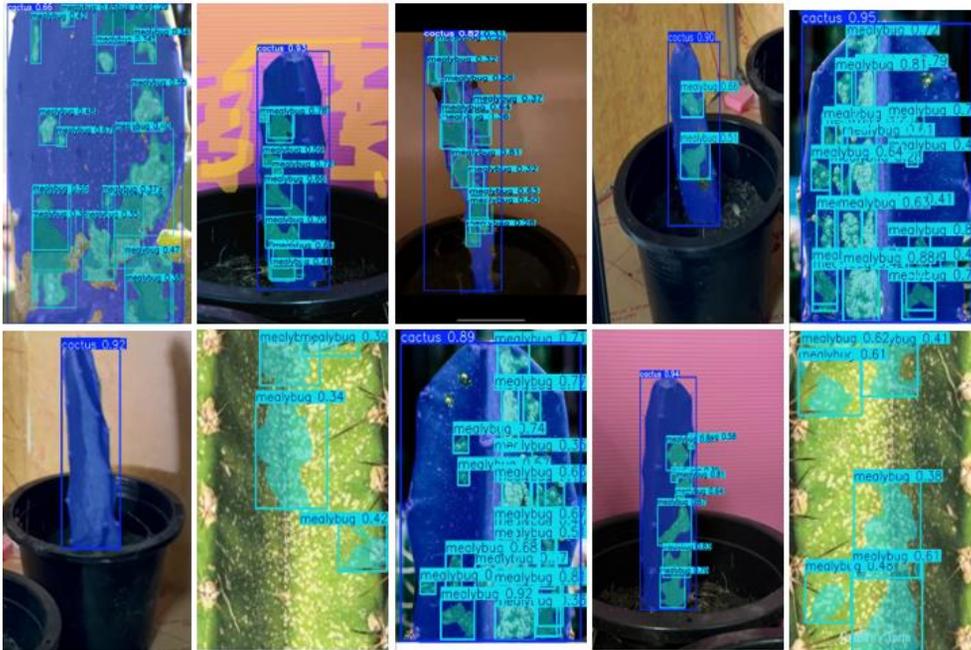
รูปที่ 9 ผลการประเมินผลข้อมูลโดยที่ (B) คือ Box และ (M) คือ Mask



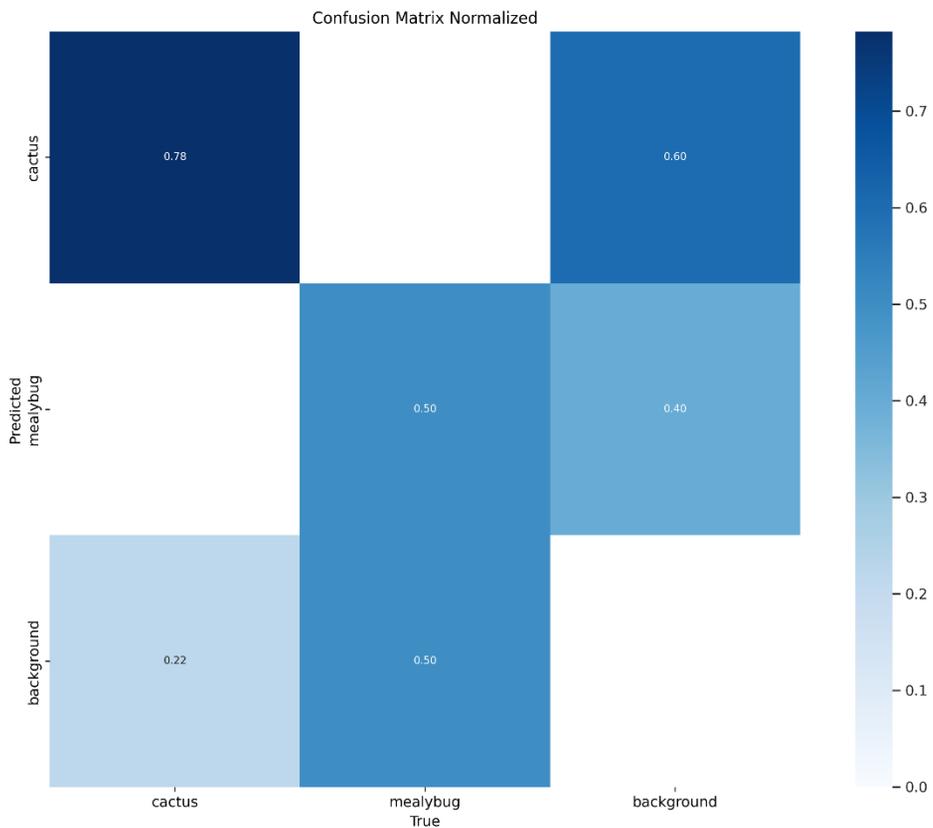
รูปที่ 10 ผลการตรวจหาถูกส่งไปยังแอปพลิเคชันไลน์



รูปที่ 11 แสดงผลการตรวจหาตำแหน่งและจำแนกเพลี้ยแบ่งออกจากแคคตัสโดยเป็นภาพที่ไม่มีเพลี้ยแบ่งอยู่



รูปที่ 12 แสดงผลการตรวจหาตำแหน่งและจำแนกเพลี้ยแป้งออกจากแคคตัสโดยเป็นภาพที่มีเพลี้ยแป้งอยู่



รูปที่ 13 แสดงผล Confusion matrix แบบ แบบ Normalized ของการตรวจหา แคคตัส เพลี้ยแป้ง และพื้นหลัง

#### 4. สรุป

จากผลการทดลองในรูปที่ 8 และ รูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าลักษณะความชันของกราฟที่ยังคงลดลง ทำให้เห็นว่าแบบจำลองยังมีศักยภาพในการปรับปรุงเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความแม่นยำได้อีก หากมีเพิ่มจำนวนครั้งในการฝึกข้อมูล ขณะที่รูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าค่า Precision, Recall, mAP50 และ mAP50-95 ในส่วนของ Mask มีค่าน้อยกว่า Box เนื่องจาก Mask คือการตีเส้นขอบรอบวัตถุที่ต้องการหาซึ่งทำได้ยากกว่าการตีกรอบสี่เหลี่ยมของ Box

ในส่วนของการใช้ปัญญาประดิษฐ์ตรวจหาเพลี้ยแป้งและหากเจอให้ส่งรูปไปยังแอปพลิเคชันไลน์ทำได้ดี และแอปพลิเคชันไลน์เป็นแอปพลิเคชันที่ผู้คนส่วนใหญ่เปิดอยู่เป็นประจำและมีระบบแจ้งเตือนทำให้สะดวกต่อบุคคลทั่วไปหรือธุรกิจขนาดเล็ก โดยจะช่วยให้สามารถพบปัญหาก่อนที่จะรุนแรงเกินกว่าจะแก้ไขได้

ผลการทดลองส่วนของการรดน้ำต้นไม้พบว่าการรดเป็นรายต้นจะช่วยประหยัดน้ำได้มากกว่าถึง 69.29% ซึ่งเป็นปริมาณที่มาก และการฟุ้งกระจายของน้ำยังต่ำเนื่องจากรดน้ำระยะใกล้ทำให้โอกาสเกิดโรคที่เกิดจากปริมาณความชื้นในอากาศที่มากเกินไปลดลงมาก

ส่วนของการตรวจหาโรคทำได้ดีมาก อย่างไรก็ตาม ผลจากตารางที่ 2 ที่ไม่ค่อยดีนัก เมื่อตรวจสอบพบว่าเกิดจากที่ปริมาณข้อมูลที่ใช้ในการฝึกลดลง ทำให้เข้าใจผิดว่าดินที่มีสีขาวเป็นเพลี้ยและต้นแคคตัสที่มีสีเหลืองซีดเป็นเพลี้ยดังแสดงในรูปที่ 12

จากสรุปผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปเป็นผลการทดลองรวมดังนี้ คือจำเป็นต้องเพิ่มภาพที่ใช้ในการฝึกข้อมูลให้มากกว่านี้ รวมไปถึงจำนวนครั้งในการฝึกข้อมูล เพื่อให้สามารถตรวจหาโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในส่วนของภาพรวมการทำงานของทุกระบบร่วมกันยังมีข้อผิดพลาดอยู่บ้างเป็นบางครั้ง จำเป็นต้องมีการปรับปรุงประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ที่เอื้อเพื่อ สถานที่ในการทดลอง และขอบคุณทุนวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Kuznetsova, T. Maleva, and V. Soloviev, "Detecting Apples in Orchards Using YOLOv3 and YOLOv5 in General and Close-Up Images," *Advances in Neural Networks – ISNN*, pp. 233-243, 2020.
- [2] B. Benjdira, T. Khursheed, A. Koubaa, A. Ammar, and K. Ouni, "Car Detection using Unmanned Aerial Vehicles: Comparison between Faster R-CNN and YOLOv3," in *Proceedings of the 1st International Conference on Unmanned Vehicle Systems (UVS)*, Muscat, Oman, 2019.
- [3] Y. Tian, G. Yang, Z. Wang, H. Wang, E. Li, and Z. Liang, "Apple detection during different growth stages in orchards using the improved YOLO-V3 model," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 157, pp. 417-426, Feb. 2019.
- [4] Z. Jiang, L. Zhao, S. Li and Y. Jia, "Real-time object detection method based on improved YOLOv4-tiny," in *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, USA, 2020.
- [5] G. Yang, W. Feng, J. Jin, Q. Lei, X. Li, G. Gui, and W. Wang, "Face Mask Recognition System with YOLOV5 Based on Image

- Recognition,” in *Proceedings of IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, Chengdu, China, 2020, pp. 1398-1404.
- [6] J. Du, “Understanding of Object Detection Based on CNN Family and YOLO,” in *Proceedings of 2nd International Conference on Machine Vision and Information Technology (CMVIT 2018)*, Hong Kong, 2018.
- [7] Y. J. Sang, Z. Wu, P. Guo, H. Hu, H. Xiang, Q. Zhang, and B. Cai, “An Improved YOLOv2 for Vehicle Detection,” *Sensors*, vol. 18, no.12, 2018.
- [8] C. Li, L. Li, H. Jiang, K. Weng, Y. Geng, L. Li, Z. Ke, Q. Li, M. Cheng, W. Nie, Y. Li, B. Zhang, Y. Liang, L. Zhou, X. Xu, X. Chu, X. Wei, and X. Wei, “YOLOv6: A single-stage object detection framework for industrial applications,” in *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, USA, 2022*, pp. 9387-9396.
- [9] C.-Y. Wang, A. Bochkovskiy, and H.-Y.M. Liao, “YOLOv7: Train able bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors,” in *Proceedings of 2022 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2023, pp. 7464-7475.
- [10] J. Terven, D. M. C. Esparza, and J. A. R. González, “A Comprehensive Review of YOLO: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS,” *Machine learning and knowledge extraction*, vol. 5, no. 4, pp. 1680-1716, Nov. 2023.
- [11] D. Kijdech, “Weed Classification by Using Convolution Neural Network for Studying and Weed Eliminate Robot,” in *Proceedings of the 7th SAU National Interdisciplinary Conference 2020*, Bangkok, Thailand, 2020, pp. 203-209.
- [12] D. Kijdech and S. Wongbunyong, “Artificial Intelligence in Localization and Classification of Cactus for Automatic Watering Works,” in *Proceedings of The 8th SAU National Interdisciplinary Conference 2021*, Bangkok, Thailand, 2021, pp. 814-821.
- [13] K. P. Ferentinos, “Deep learning models for plant disease detection and diagnosis,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 145, pp. 311-318, Feb. 2018.
- [14] D. Divani, P. Patil, and S.K. Punjabi, “Automated plant Watering system,” in *Proceedings of 2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC)*, Melmaruvathur, India, 2016, pp. 180-182.
- [15] M. S. Munir, I.S. Bajwa, and S. M. Cheema, “An intelligent and secure smart watering system using fuzzy logic and blockchain,” *Computer & Electrical Engineering*, vol. 77, pp. 109-119, Jul. 2019.
- [16] Y. Huang, Z. Liu, and Y. Dong, “Design of Remote Wireless Automatic Watering Robot Control System,” in *Proceedings of International Conference on Applications and Techniques in Cyber Intelligence ATCI 2019*, China, 2019, pp. 839-846.

- [17] N. Hema, R. Aswani, and M. Malik, "Plant Watering Autonomous Mobile Robot," *IAES International Journal of Robotics and Automation*, vol.1, no. 3, pp. 152, Sep. 2012.
- [18] P. Tangtisanon, "Small Gardening Robot with Decision-making Watering System," *Sensors and Materials*, vol. 31, no. 6, pp. 1905–1916, 2019.
- [19] L. N. Smith, "Cyclical learning rates for training neural networks," in *Proceedings of 2017 IEEE winter conference on applications of computer vision (WACV)*, USA, 2017, pp. 464-472.
- [20] Ultralytics, "YOLOv8 Docs – Modes: Detect, Segment, Classify, Pose, Track," [Online]. Available: <https://docs.ultralytics.com/modes/>. [Accessed: Jun. 6, 2025].

# การศึกษาประสิทธิภาพแห่งเชื้อเพลิงจากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน

ยุทธชัย จารุจิตร\* มงคล คธาพันธ์ และ ตั้งเฮง ยนต์สถิตย์กุล

สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเทคโนโลยีพนมวันท์  
198 ถ.มิตรภาพ-หนองคาย ต.บ้านโพธิ์ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30310

---

รับบทความ 11 กันยายน 2567 แก้ไขบทความ 5 กรกฎาคม 2568 ตอรับบทความ 31 กรกฎาคม 2568

## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการคาร์บอนในเซชัน เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนให้กับแห่งเชื้อเพลิง ของซีเลื่อยด้วยเทคนิคเกลียวอัดเย็น ครั้งนี้ได้ใช้เครื่องอัดแห่งเชื้อเพลิงขนาดมอเตอร์ไฟฟ้า 1 เฟส 3 HP ที่ความเร็วรอบเกลียวอัด 210 RPM โดยใช้โมลาสเป็นตัวประสานมีอัตราส่วนต่อน้ำอยู่ 2 ชนิด คือ 60:40, 70:30 และอัตราส่วนระหว่างซีมวลกับตัวประสานคือ 100:0, 95:5, 90:10, 85:15, 80:20 ซึ่งสมบัติทางกายภาพของแห่งเชื้อเพลิงแห่งที่ทดสอบ ได้แก่ ปริมาณความร้อน ค่าความร้อน และประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อนผลการทดลองพบว่าเมื่อนำอัตราส่วนที่ดีที่สุดของแห่งเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชัน และแห่งเชื้อเพลิงที่ไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชัน จะมีค่าความร้อนของแห่งเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเพราะในกระบวนการคาร์บอนในเซชัน จะทำให้ปริมาณคาร์บอนสูงขึ้น แต่แลกกับจำนวนที่ลดลงแห่งเชื้อเพลิงทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานที่เหมาะสม ซึ่งในอัตราส่วน 80:20 ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชัน สามารถให้ค่า ปริมาณความร้อน ค่าความร้อน และประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน 22.46 kJ, 19.80 MJ/kg, 72.44% ตามลำดับ จึงทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

**คำสำคัญ :** คาร์บอนในเซชัน; แห่งเชื้อเพลิง; เกลียวอัด; ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

---

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +666 3313 4344, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: yuttachai52@gmail.com

# A Study of the Efficiency of Fuel Rods Using the Carbonization Process

Yuttachai Jarujitr\* Mongkon Khathapan and Thanghang Yonsatidkun

Department of Automotive Engineering, Faculty of Engineering, Phanomwan College of Technology  
198 Mitraphap-Nong Khai Road, Ban Pho, Mueang, Nakhon Ratchasima, 30310

---

*Received 11 September 2024; Revised 5 July 2025; Accepted 31 July 2025*

## Abstract

This study aims to investigate the carbonization process to improve the thermal efficiency of sawdust fuel briquettes using a cold screw compaction technique. The briquettes were produced using a single-phase electric motor (3 HP) operating at a screw speed of 210 RPM. Molasses was used as a binder, mixed with water in two proportions (60:40 and 70:30), and combined with biomass at various ratios: 100:0, 95:5, 90:10, 85:15, and 80:20. The physical properties evaluated included heating value, amount of heat, and thermal efficiency. The experimental results revealed that the carbonization process significantly increased the calorific value of the briquettes due to the higher carbon content, albeit with a reduction in overall yield. Among the tested conditions, the briquettes produced with an 80:20 biomass-to-binder ratio and subjected to carbonization exhibited the highest performance, yielding an energy content of 22.46 kJ, a calorific value of 19.80 MJ/kg, and a thermal efficiency of 72.44%. These findings suggest that carbonization can effectively enhance the fuel properties of sawdust briquettes, with the 80:20 ratio offering an optimal balance between energy performance and material utilization.

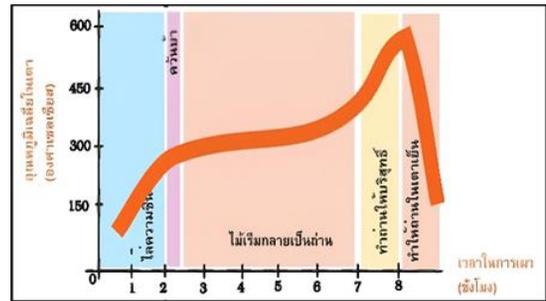
**Keywords :** Carbonization, Biomass, Screw, Thermal efficiency

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันการใช้ชีวมวลบนโลกมีส่วนสูงถึง 35-40% และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในประเทศไทยที่เป็นประเทศเกษตรกรรม ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพด้านการเกษตร ส่งผลให้มีผลผลิตและเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Biomass) จำนวนมากที่ไม่ถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เช่น ชี้อเลื้อย ซึ่งมักถูกกองทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ ทั้งที่วัสดุเหล่านี้มีศักยภาพเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่ดี โดยชี้อเลื้อยมีค่าความร้อนสูงประมาณ 4,500 kcal/kg และมีปริมาณขี้เถ้าต่ำเพียง 2.0% โดยน้ำหนัก ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานเชื้อเพลิงที่กำหนดไว้ว่าค่าความร้อนไม่ควรต่ำกว่า 3,000 kcal/kg และเถ้าไม่ควรเกิน 20% (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาในเชิงเศรษฐศาสตร์ หากนำชี้อเลื้อยมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง เชื้อเพลิงจะสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้มาก โดยราคาขายถ่านอัดแท่งอยู่ที่ประมาณ 30 บาทต่อกิโลกรัม ในขณะที่ชี้อเลื้อยดิบขายได้เพียง 10-14 บาทต่อกิโลกรัม [1], [2]

เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น กระบวนการ "คาร์บอนเซชัน" (Carbonization Process) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ ซึ่งเป็นกระบวนการแปลงสภาพทางเคมีความร้อน (Thermochemical Conversion) โดยการให้ความร้อนแก่ชีวมวลในสภาวะที่จำกัดหรือปราศจากออกซิเจน ที่อุณหภูมิระหว่าง 300–800°C เพื่อไล่ความชื้นและสารระเหย จนได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านที่มีความบริสุทธิ์สูง (Char) พร้อมผลพลอยได้ เช่น น้ำมันดิน (Tars), กรดน้ำส้ม (Acetic acid) และแก๊สเชื้อเพลิง กระบวนการนี้แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนสำคัญ ได้แก่ 1) ขั้นตอนการอบแห้ง (Drying stage) ที่อุณหภูมิ 150–300°C เพื่อไล่ความชื้น 2) ขั้นเริ่มสลายตัว (Initial Decomposition) ที่อุณหภูมิ 150–300°C ซึ่งโครงสร้างเซลลูโลสเริ่มสลายตัว 3) ขั้นสลายตัวอย่างรวดเร็ว (Active Decomposition) ที่อุณหภูมิ 300–500°C ซึ่งเป็นช่วงที่สารอินทรีย์สลายตัวกลายเป็นถ่าน และ 4) ขั้นทำให้

เสถียร (Cooling and Stabilization) โดยลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กระบวนการคาร์บอนเซชัน [3]

ประสิทธิภาพของถ่านที่ได้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก คือ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และระยะเวลา โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงตามไปด้วย แต่อาจทำให้ปริมาณผลผลิตถ่านลดลง ในขณะที่อัตราการให้ความร้อนที่เหมาะสมจะช่วยควบคุมรูพรุนและความว่องไวต่อปฏิกิริยาของถ่าน [3], [4] จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านอัดแท่งคืออุณหภูมิสูงสุด 500°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C/min [3]

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญในการนำกระบวนการคาร์บอนเซชันมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแท่งเชื้อเพลิงจากชี้อเลื้อย โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ปริมาณความร้อน ค่าความร้อน และประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน ระหว่างเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน ด้วยวิธีการทดสอบต้มน้ำเดือด (Water Boiling Test) [5]-[7] ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปสู่การปรับปรุงคุณภาพแท่งเชื้อเพลิงให้มีความเหมาะสมสำหรับการผลิตพลังงานความร้อน เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนตามยุทธศาสตร์ทางพลังงานของประเทศต่อไป [8]-[10]

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 เงื่อนไขการทดลอง

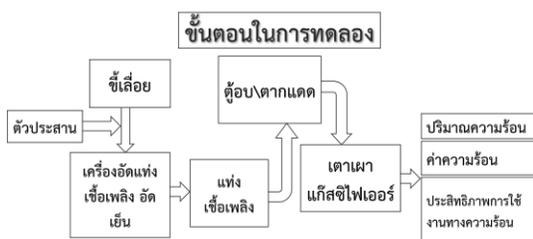
เงื่อนไขการทดลองการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจะกำหนดให้ใช้ซีลี้อย่างเป็นวัตถุดิบ และ โมลาส เป็นตัวประสานใช้ความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ 210 รอบต่อนาที แล้วทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อการผลิตแท่งเชื้อเพลิง และสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงโดยเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 10 อัตราส่วนมีดังนี้

**ตารางที่ 1** อัตราส่วนผสมในการทดลองระหว่างตัวประสานกับซีลีวมวล (อัตราส่วนโดยมวล)

ซีลีวมวล:ตัวประสาน อัตราส่วนตัวประสาน 70:30	ซีลีวมวล:ตัวประสาน อัตราส่วนตัวประสาน 60:40
100:0	100:0
95:5	95:5
90:10	90:10
85:15	85:15
80:20	80:20

จากตารางที่ 1 จะแสดงอัตราส่วนผสมในการทดลองระหว่างตัวประสานกับซีลีวมวลเป็นอัตราส่วนโดยมวล โดยจะศึกษาเกี่ยวกับ ปริมาณความร้อน ค่าความร้อน ตลอดจนประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

### 2.2 ขั้นตอนในการทดลอง



รูปที่ 2 ขั้นตอนในการทดลอง

ในการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิงครั้งนี้ ได้มีการจัดรูปแบบการอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบใช้ตัวประสาน โดยมีอัตราส่วนที่ใช้ผสมวัตถุดิบเป็นอัตราส่วนโดยมวล คือ ใช้เครื่องชั่งดิจิตอลและตราชั่ง เป็นเครื่องวัดตามอัตราส่วนที่กำหนด การใช้ตัวประสาน โดยการอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้วัตถุดิบที่มีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิง โดยการนำซีลี้อยผสม และตัวประสาน คือ โมลาส ที่เตรียมไว้มาทำการชั่งมวลแล้วเทลงไปในกระบะผสมวัตถุดิบ จะได้วัตถุดิบเชื้อเพลิงซีลีวมวลอัดแท่งที่มีส่วนผสม ซีลี้อยกับตัวประสานโดยมวล โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างตัวประสานกับน้ำเปล่าก่อนนำมาผสมกับซีลี้อยเผาอยู่ที่ 60:40 และ 70:30 อัดขึ้นรูปด้วยเทคนิคสกรูอัดเย็นด้วยความเร็วรอบของสกรูอัด 210 รอบต่อนาที โดยใช้อัตราส่วนผสมโดยมวลระหว่างซีลี้อยเผากับตัวประสาน 100:0, 95:5, 90:10, 85:15, 80:20 ตามลำดับ แท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากการอัด มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4 เซนติเมตร มีความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร จากนั้นจึงนำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากการอัดขึ้นรูปไปอบในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ก่อนที่จะนำมาทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ตลอดจนหาประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงต่อไป

### 2.3 เครื่องอัดที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องอัดแท่งแบบเกลียวไม่มีขีดลดความร้อน (อัดเย็น) เครื่องอัดแท่งชนิดนี้ใช้สำหรับอัดเศษวัสดุทางการเกษตรหรือผงถ่าน ให้เป็นแท่งเชื้อเพลิง โดยไม่มีการนำความร้อนเข้ามาช่วยในการทำให้วัสดุจับตัวกัน แต่จะใช้แรงอัดจากเกลียวที่บรรจุอยู่ในตัวเครื่องอัดและตัวประสาน ซึ่งจะลำเลียงวัตถุดิบไปตามร่องเกลียวสู่กระบอกอัดแล้วดันออกมาเป็นแท่งเชื้อเพลิง เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชนิดนี้มีคุณลักษณะดังนี้

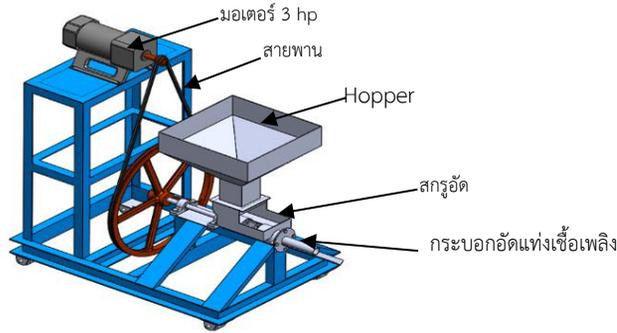
1. มอเตอร์ขับ 1 Phase กำลัง 3 แรงม้า
2. ความเร็วรอบ 210 รอบ/นาที

3. แรงดันไฟฟ้า ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 380 Volt, 50 Hz, 27 Ampere

4. ขนาดกระบอกอัด ความยาว 14.5 เซนติเมตร จำนวนร่อง 6 ร่อง

5. เส้นผ่าศูนย์กลางด้านเข้า (Inlet diameter) 8 เซนติเมตร

6. เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก (Outlet diameter) 6 เซนติเมตร

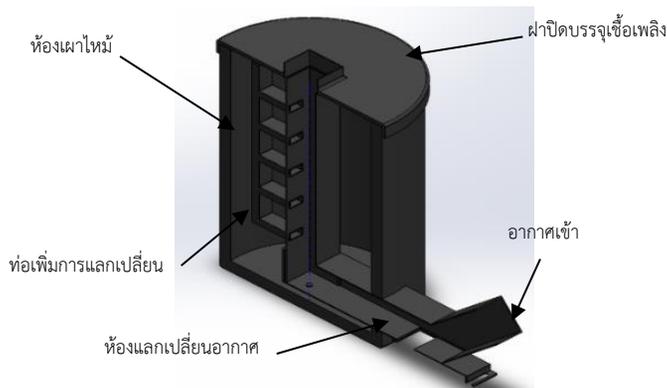


รูปที่ 2 เครื่องอัดแท่งขี้มวลงชนิดเกลียวอัด

## 2.4 เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์

เทคโนโลยีแก๊สซิไฟเคชันสำหรับเตาเผาขี้มวลง เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการหุงต้มและการประกอบอาหารในชีวิตประจำวันทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงแอลพีจี (LPG) ในครัวเรือนจะใช้หลักการของกระบวนการแก๊สซิไฟเคชันเป็นเทคโนโลยีสำหรับการเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงหรือจำกัดอากาศให้เหมาะสมกับเชื้อเพลิง โดยกระบวนการนี้จะเป็นกระบวนการที่เปลี่ยน

เชื้อเพลิงแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ถ่าน ไม้ ถ่านหิน แกลบ ชี้เลื่อย และวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรที่สามารถติดไฟได้ให้กลายเป็นแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ เป็นเตาเผาขนาด 200 ลิตร โดยใช้กระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิสูงสุด 500 °C ที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min และคงอุณหภูมิสูงสุดไว้เป็นเวลา 10 นาที ซึ่งเป็นกระบวนการที่เหมาะสมที่สุด เมื่ออ้างอิงจากผลวิจัยในอดีต [3] แล้วนำมาเปรียบเทียบกับเตาเผาถ่านแบบธรรมดา



รูปที่ 3 เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์

## 2.5 การทดลองการหาประสิทธิภาพการใช้งาน ทางความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

การทดสอบการเดือดของน้ำ (Water Boiling Test หรือ WBT) เป็นวิธีการที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของเตาและเชื้อเพลิง โดยการจำลองการปรุงอาหารด้วยการต้มน้ำให้เดือด การทดสอบนี้จะวัดอัตราการระเหยของน้ำเมื่อน้ำเดือดภายใต้สภาวะที่ไม่มีฝาปิดภาชนะ การทดสอบนี้ช่วยในการเปรียบเทียบคุณลักษณะของเตาและเชื้อเพลิงต่างๆ เป็นวิธีการที่สามารถทำการทดลองได้ครบทุกอัตราส่วนของการทดลอง และอุปกรณ์ไม่ซับซ้อน

### 2.5.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

1. แท่งเชื้อเพลิง ขนาด 250 กรัม โดยมีความชื้นไม่เกิน 15 %
2. หม้ออลูมิเนียมเบอร์ 16 ความจุ 1.5 ลิตร อาจจะใช้เบอร์อื่นได้ที่สามารถบรรจุได้ 1,000
3. เตาประสิทธิภาพสูง (เตาซูเปอร์อั้งโล่)
4. เทอร์โมมิเตอร์ (แบบวัดเฉพาะจุด)
5. นาฬิกาจับเวลา (Jadever JKH-500)
6. เครื่องชั่งดิจิตอล 10 กก.

### 2.5.2 วิธีการ

1. ชั่งแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลอย่างละ 250 กรัม
2. ชั่งน้ำ 1,000 กรัม ใส่ลงในหม้ออลูมิเนียมสำหรับต้มน้ำและวัดอุณหภูมิของน้ำก่อนต้ม
3. เสียบแท่งเทอร์โมมิเตอร์ไว้ที่ตัวหนีบเทอร์โมมิเตอร์ โดยระวังไม่ให้เทอร์โมมิเตอร์สัมผัสกับส่วนใดส่วนหนึ่งของหม้อ
4. ใช้แท่งเชื้อเพลิงชีวมวลชุบน้ำมันก๊าดประมาณ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร วางไว้ในเตาเพื่อให้เป็นเชื้อเพลิงติดไฟ (Starter)
5. วางแท่งเชื้อเพลิงที่เหลือลงในเตาอย่างโปร่งๆ ให้อากาศถ่ายเทได้สะดวกประมาณ 3 ใน 4 ของเตา แล้วจุดไฟ รอจนไฟติด

6. นำหม้อน้ำที่เตรียมไว้ขึ้นตั้งบนเตา บันทึกอุณหภูมิของน้ำทุก 3 นาที จนน้ำเดือดสูงสุด จากนั้นจับเวลาต่อไปอีก 30 นาทีแล้ววัดอุณหภูมิ

7. คำนวณหาประสิทธิภาพการใช้งานของความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล

## 2.6 สมการในการคำนวณ

### 2.6.1 การคำนวณหาค่าปริมาณความร้อน

การคำนวณปริมาณ ความร้อนที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ ช่วยให้เราเข้าใจผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถนำไปสู่การพัฒนากระบวนการผลิตที่ยั่งยืนมากขึ้น และเป็นพื้นฐานในการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ เช่น การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อน, การพัฒนาวัสดุที่มีคุณสมบัติทางความร้อนในการทำการ (standardized Calorimeter) เพื่อหา energy equivalent of calorimeter โดยใช้กรดเบนโซอิก (benzoic acid) ทำการทดลองเหมือนการหาค่าความร้อนทุกประการ

$$\Delta Q = mc_p \Delta t \quad (1)$$

โดยที่

$\Delta Q$  = ปริมาณความร้อนที่ได้รับหรือสูญเสียไป (cal)

$m$  = มวลของวัตถุ (g)

$c_p$  = ความจุความร้อนจำเพาะของวัตถุ (cal/g °C)

$\Delta t$  = อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป(°C )

### 2.6.2 การหาประสิทธิภาพการใช้งานของความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

การหาประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน (Heat Utilization Efficiency) ของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นการทดสอบการให้ความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่เผาไหม้ในเตาประสิทธิภาพสูง ในการศึกษาครั้งนี้ หลังจากที่ได้ตากแห้งแท่งเชื้อเพลิงจนแห้งดีแล้ว จึง

นำมาทดสอบโดยนำตัวอย่างในแต่ละอัตราส่วนที่ได้กำหนดไว้แล้วมาอย่างละ 250 กรัม และน้ำ 1000 กรัม เเผาะแห้งเชื้อเพลิงในเตาประสิทธิภาพสูงเพื่อต้มน้ำให้เดือด [11]

$$HU = \left[ \frac{[m_1 c (T_2 - T_1)] + (m_1 - m_2) L}{MH} \right] \times 100 \quad (2)$$

โดยที่

HU = ประสิทธิภาพการใช้งานของความร้อนของเชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์)

$m_1$  = น้ำหนักเริ่มต้นของน้ำ (กรัม)

$m_2$  = น้ำหนักที่เหลือของน้ำ (กรัม)

$c$  = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (1 แคลอรีต่อกรัม องศาเซลเซียส)

$L$  = ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (540 แคลอรีต่อกรัม)

$M$  = มวลของเชื้อเพลิงอัดแห้งเริ่มต้น

$T_1$  = อุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)

$T_2$  = อุณหภูมิของน้ำสุดท้าย (องศาเซลเซียส)

$H$  = ค่าความร้อนของแห้งเชื้อเพลิงแห้ง (แคลอรีต่อกรัม)

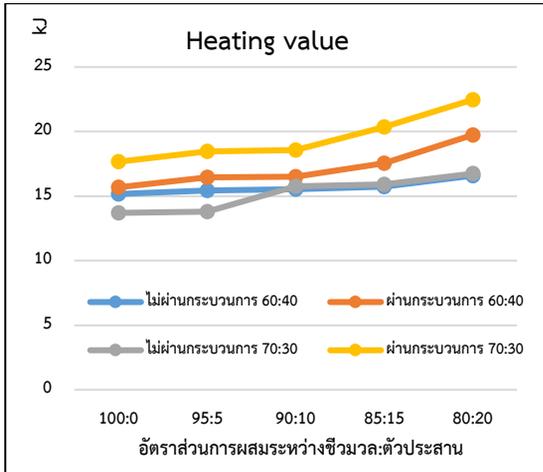
### 2.6.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแห้ง

ค่าความร้อน (Heating value) ของเชื้อเพลิงอัดแห้ง เป็นสมบัติทางความร้อน หาได้โดยการนำเชื้อเพลิงอัดแห้งที่ได้มาหาค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงโดยใช้เครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน (ESSOM oxygen bomb calorimeter) ตามมาตรฐาน ASTM ART.2060/2070 โดยเชื้อเพลิงอัดแห้งที่ผ่านตะแกรงร่อนจำนวนประมาณ 1 กรัม ใส่ในแคปซูลนำแคปซูลใส่ลงในบอมบ์ ร้อยลวด (fuse wire) ยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ทำการปิดบอมบ์แล้วเติมออกซิเจน 25-35 ความดันบรรยากาศ จากนั้นไล่แก๊สออก เติมออกซิเจนเข้าไปใหม่อีกครั้ง เพื่อไล่อากาศในบอมบ์ออก ใส่

บอมบ์ลงในแคลอริมิเตอร์บัคเก็ต (calorimeter bucket) ซึ่งอยู่ในแจ็กเก็ต (jacket) ต่อบางสำหรับการฟิวส์ (fuse) และไบกวน เติมน้ำกลั่นประมาณ 2 ลิตรลงในบัคเก็ต ปิดฝาแคลอริมิเตอร์ แล้วหย่อนเทอร์โมมิเตอร์ลงไป เริ่มกวนไบกวนให้อุณหภูมิคงที่รอประมาณ 5 min เมื่อถึงที่สมดุล (อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงลงเล็กน้อย) ให้เริ่มอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 1 นาที นาน 5 นาที กดปุ่มอิกนิชัน (Ignition) เริ่มเกิดการเผาไหม้ในนาทีที่ 6 บันทึกอุณหภูมิและเวลาที่อ่านค่า (อ่านทุก 15 วินาที หรือทุก 30 วินาที) ในช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นอ่านทุกๆ 1 นาที อ่านต่อไปใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 18-20 นาที อุณหภูมิจะเริ่มคงที่ ให้บันทึกอุณหภูมิที่คงที่ติดต่อกัน 5 นาที หยุดไบกวนแล้วปิดฝาแคลอริมิเตอร์ ยกบอมบ์ออกค่อยๆ ปล่อยความดันในบอมบ์ให้ลดลงจนไม่มีเสียงอากาศออกข้างภายในบอมบ์ด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด เก็บน้ำที่ล้างทั้งหมดไว้ในบีกเกอร์ แล้วนำไปไทเตรทกับ 0.0725 นอร์มอล (N) โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ใช้เมทิลเรด (Methylred) หรือเมทิล ออเรนจ์ (Methyl orange) เป็นอินดิเคเตอร์นำสารละลายที่ไทเตรทแล้วไปหาปริมาณ

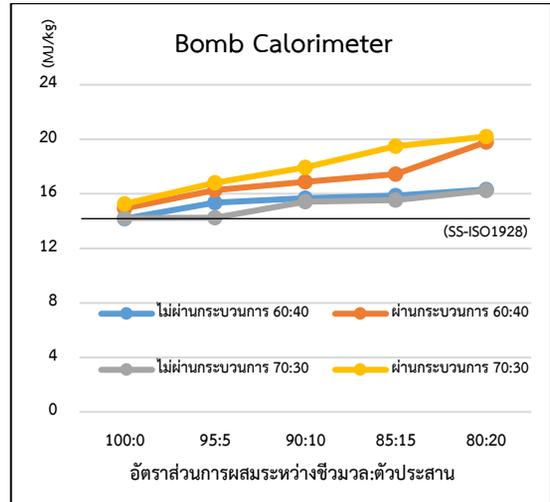
### 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการศึกษาศึกษากระบวนการคาร์บอนไอเซชันเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนให้กับแห้งเชื้อเพลิง ของซีลี้อยู่ด้วยเทคนิคเกลียวอัดเย็น ครั้งนี้ได้ใช้เครื่องอัดถ่านขนาดมอเตอร์ไฟฟ้า 1 เฟส 3 HP ที่ความเร็วรอบเกลียวอัด 210 RPM โดยใช้โมลาสเป็นตัวประสานมีอัตราส่วนต่อน้ำ คือ 60:40 , 70:30 และอัตราส่วนระหว่างซีวมวลกับตัวประสานคือ 100:0, 95:5, 90:10, 85:15, 80:20 ซึ่งสมบัติทางพลังงานแห้งเชื้อเพลิงทดสอบ ได้แก่ ปริมาณความ ค่าความร้อน และ ประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน ของแห้งเชื้อเพลิง



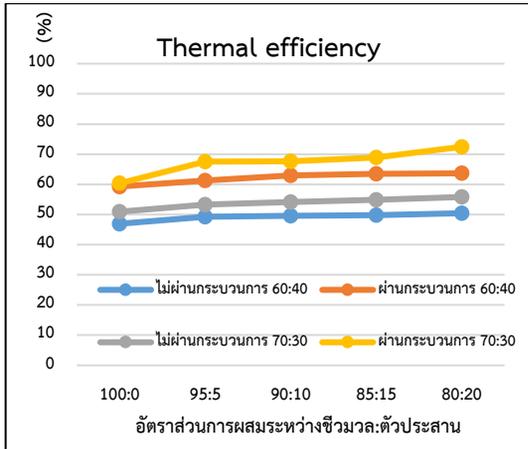
รูปที่ 4 ปริมาณความร้อน (Heating value)

จากรูปที่ 4 จากสูตรการคำนวณ (Heating value) แห่งเชื้อเพลิงในอัตราส่วน 80:20 ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวประสานจาก 0 เปอร์เซ็นต์ เป็น 5, 10, 15, 20 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นเกือบจะเป็นเชิงเส้นเพราะมีปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นทุกอัตราส่วนทุกครั้งเพิ่มตัวประสานโดยค่าความร้อนของโมลาสอยู่ที่ 9,000 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งก๊าซชีวภาพที่ได้ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน (65%) ซึ่งเป็นก๊าซที่ติดไฟได้ ในกรณีเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ไม่ผ่านกระบวนการนั้นมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณความร้อนเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณตัวประสาน จาก 0 เปอร์เซ็นต์ เป็น 5, 10, 15, 20 เปอร์เซ็นต์ และพบผลลัพธ์ในการทำงานเดียวกันกับผลลัพธ์ก่อนหน้านี้ อัตราส่วน 80:20 ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันมีค่าที่สูงกว่า โดยให้ปริมาณความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 22.46 kJ



รูปที่ 5 ค่าความร้อน (Bomb calorimeter)

จากรูปที่ 5 ค่าความร้อนที่ได้จากเครื่อง (Bomb calorimeter) แห่งเชื้อเพลิงในอัตราส่วน 80:20 ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน ให้ค่าความร้อนสูงสุด ที่ 20.20 MJ/kg จะเห็นว่าค่าความร้อนสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกันที่อัตราส่วน 60:40 และ 70:30 ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน และเมื่อเทียบกับมาตรฐาน (SS-ISO1928) พบว่า อัตราส่วน 80:20 ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันมีค่าที่สูงกว่า โดยให้ปริมาณความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 20.20 MJ/kg ส่วนที่ไม่ผ่านกระบวนการมีค่าที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามยังมีความหนาแน่นที่ยังไม่ได้ศึกษา จากการศึกษางานวิจัยในอดีตค่าความหนาแน่นสามารถขยายเวลาในการติดไฟของแท่งเชื้อเพลิงได้ อัตราส่วนที่แนะนำจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการทำงานว่าต้องการค่าความร้อนสูงหรือต้องการระยะเวลาของการติดไฟของแท่งเชื้อเพลิง ในกรณีนี้ชีวมวลเป็นชนิดเดียวกันทำให้ค่าความร้อนที่ได้ ออกมาจึงมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน (Thermal efficiency)

จากรูปที่ 6 แสดงค่าประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน (Thermal efficiency) ของแท่งเชื้อเพลิง ที่อัตราส่วน 80:20 ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน ได้ประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน สูงสุดที่ 72.44% และสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ใช้อัตราส่วนตัวประสานอื่นอย่าง เมื่อเทียบกับงานวิจัยในอดีตที่สอดคล้องกัน [12] แต่อัตราส่วนตัวประสานอีกสี่ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยประสิทธิภาพการใช้ความร้อนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 72.44 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนตัวประสานต่อชีวมวลเท่ากับ 80:20 และต่ำสุดเท่ากับ 49.27 เปอร์เซ็นต์ ที่เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีอัตราส่วนตัวประสานต่อชีวมวล 100:0 จากการเปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากซีลื้อเผาเมื่อใช้อัตราส่วนตัวประสาน 80:20 จะมีค่าสูงกว่าถึง 23.17 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่ประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน เพิ่มขึ้นจะเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานที่ยาวนานขึ้นเมื่อเทียบกับราคา โมลาสในปัจจุบัน ราคาไม่สูงมากก็ยังคุ้มค่าอยู่แต่ถ้า ราคาโมลาสสูงขึ้น ต้องมีการเป็นตัวประสานใหม่ที่มีคุณสมบัติยึดเกาะและราคาไม่สูงต่อไป

อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของการใช้ความร้อนนั้นจะมีปัจจัยหลายอย่างร่วมกัน เช่น ความหนาแน่นส่งผล

ให้ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนต่อหน่วยเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนที่มากไปจะทำให้เชื้อเพลิงไวไฟทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานความร้อนลดลง ดังนั้นหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งควรรหาแนวทางเพิ่มคุณสมบัติทั้งทางด้านกายภาพและความร้อนที่เหมาะสม

#### 4. สรุป

1. จากผลของการวิจัยที่ได้ทดลองมีความสอดคล้องและเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยในอดีตที่ได้ศึกษามา ทั้งในเรื่องค่าความร้อนตลอดจนประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน

2. การทดสอบการใช้งานเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชนิดสกรูอัดจากซีลื้อ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของซีลื้อ พบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมที่สามารถขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงแข็งได้ ในการอัดซีลื้อจะใช้เวลาในการอัดก้อนเพื่อให้ได้ความยาวเฉลี่ย 10 เซนติเมตร ในอัตราส่วน 80:20 ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน สามารถให้ค่า ปริมาณ ความร้อน , ค่าความร้อน , และประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน 22.46 kJ, 20.20 MJ/kg, 72.44% ตามลำดับ

3. กระบวนการคาร์บอนเซชันสามารถเพิ่ม ปริมาณความร้อน, ค่าความร้อน, และประสิทธิภาพความร้อน เฉลี่ย 34.16, 24.30, 23.17% ตามลำดับ

4. อัตราส่วนที่ผสมจะส่งผลต่อความแข็งแรง และปริมาณ ความร้อน ค่าความร้อนตลอดจนประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน เพราะตัวประสานที่ใช้มีคุณสมบัติทั้งยึดเกาะและมีค่าความร้อน โดยมีค่าอยู่ที่ 9,000 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำวิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเทคโนโลยีพนมวันท์ ซึ่งให้การสนับสนุนในการจัดทำวิจัย ตั้งแต่ต้นจนวิจัยประสบผลสำเร็จ

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Tangmankongworakoon, "The production of fuel briquettes from agricultural wastes and household wastes," *Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 66–77, Jun. 2014.
- [2] T. Ranaivoson, B. Rakouth, A. Buerkert, and K. Brinkmann, "Wood biomass availability for smallholder charcoal production in dry forest and savannah ecosystems of south-western Madagascar," *Fuel*, vol. 146, pp. 86–94, Nov. 2017.
- [3] S. Nomura, "Coal briquette carbonization in a slot-type coke oven," *Fuel*, vol. 185, pp. 649–655, Dec. 2016.
- [4] M. Faizal, "Utilization of biomass and coal mixture to produce alternative solid fuel for reducing emission of greenhouse gas," *International Journal of Advanced Science*, vol. 7, no. 3, pp. 950–956, Jun. 2017.
- [5] M. Hoque, M. Ota, and S. C. Bhattacharya, "Activated charcoal from coconut shell using  $ZnCl_2$  activation," *Biomass and Bioenergy*, vol. 22, no. 5, pp. 397–400, Nov. 2002.
- [6] Q. Wu, S. Zhang, B. Hou, et al., "Study on the preparation of wood vinegar from biomass residues by carbonization process," *Bioresource Technology*, vol. 179, pp. 98–103, Mar. 2015.
- [7] K. Namwong and M. Khathaphan, "Design and development of a briquette machine for briquettes production from dried neem leaves and burned sawdust," in *Proceedings of the 31st National Mechanical Engineering Conference*, Nakhon Nayok, Thailand, 2017, pp. 65–73.
- [8] A. Amarasekara, F. S. Tanylm, and E. Asmatalu, "The briquetting and carbonization processes of naturally grown algae biomass collected from regional lakes," *Fuel*, vol. 208, pp. 612–617, 2017.
- [9] K. Tippayawong, S. Santiteerakul, S. Ramingwong and N. Tippayawong, "Cost analysis of community scale smokeless charcoal briquette production from agricultural and forest residues," *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 310–316, Feb. 2019.
- [10] T. Counaphonviwat, A. Sawadkit, J. Gunha, P. Ratanasangwong, and W. Phankong, "A study of the possibility in producing biodiesel from rubber tree oil," in *Proc. 21st Nat. Mech. Eng. Conf.*, Chon Buri, Thailand, 2007, pp. 1–6.
- [11] S. Sangsuk, C. Buathong, and S. Suebsiri, "High-energy conversion efficiency of drum kiln with heat distribution pipe for charcoal and biochar production," *Energy*, vol. 59, pp. 1–7, Dec. 2020.
- [12] A. Srinoun and A. Chainawa, "A study of fuel briquettes from *Casuarina junghuhniana* Miq. leaf-lignite blends," *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 128–151, Sep. 2018.

# การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใช้น้ำแผ่นกรอบ

จुरีมาศ ดีอำมาตย์\*

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์  
1 หมู่ 20 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 13180

รับบทความ 27 ตุลาคม 2567 แก้ไขบทความ 21 กรกฎาคม 2568 ตอรับบทความ 4 กันยายน 2568

## บทคัดย่อ

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใช้น้ำแผ่นใช้น้ำเป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งเป็นพืชน้ำขนาดเล็กที่พบได้ตามแหล่งน้ำในท้องถิ่น มีคุณค่าทางสารอาหาร โปรตีนสูง โดยการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใช้น้ำแผ่นกรอบ นำมาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส และเพื่อการศึกษาทางกายภาพทางเคมี และองค์ประกอบทางเคมีในผลิตภัณฑ์ใช้น้ำแผ่น ซึ่งผลการศึกษาพบว่า สูตรที่ผ่านการคัดเลือกคือ สูตร B จากนั้นนำมาศึกษาปริมาณใช้น้ำที่เหมาะสม 3 ระดับ คือ ร้อยละ 20, 25 และ 30 ตามลำดับ นำมาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9-point hedonic scale โดยผู้ทดสอบให้การยอมรับการปริมาณใช้น้ำร้อยละ 20 ที่มีคะแนนความชอบอยู่ในช่วงชอบมากถึงชอบมากที่สุด ประกอบกับใช้น้ำแผ่นยังคงลักษณะที่ดี มีความพองตัว สีเขียวพอเหมาะ มีกลิ่นหอม รสชาติดี เป็นแผ่นบาง และมีความกรอบ เป็นต้น เมื่อทดสอบทางกายภาพของผลิตภัณฑ์พบว่า มีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ลดลง ค่าสีเขียว ( $a^*$ ) เพิ่มขึ้น และค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) ลดลง ส่วนค่าความชื้นและค่า  $a_w$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากใช้น้ำที่ใส่ในผลิตภัณฑ์เป็นแบบสด หากเพิ่มในปริมาณมากขึ้นมีผลต่อค่าความชื้นและค่า  $a_w$  เช่นกัน อีกทั้งนำผลิตภัณฑ์ใช้น้ำแผ่นในหม้อทอดไร้น้ำมันทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่า ความชื้น ไขมัน โปรตีน เถ้า เส้นใย และคาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 1.01, 0.21, 3.79, 3.36, 9.24 และ 91.39 ตามลำดับ

คำสำคัญ : ใช้น้ำ; ไข่ผ่า; ขนมอบเคี้ยว; หม้อทอดไร้น้ำมัน

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 4413 3991, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: jureemart@vru.ac.th

# Development of Crispy Wolffia Snack

Jureemart Deeammart\*

Faculty of Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage  
1 Moo. 20, Khlong Nueng Subdistrict, Khlong Luang District, Pathum Thani Province, 13180

---

*Received 27 October 2024; Revised 21 July 2025; Accepted 4 September 2025*

## Abstract

The development of crispy wolffia snack, which is a small aquatic plant found in local water. It has high nutritional and protein. This research to study the development of crispy wolffia snack, evaluate sensory qualities, study the physical chemistry and proximate of products. The results of study found that formula B. Then the ratio of wolffia studied at 3 levels: 20, 25 and 30 percent, respectively. Sensory evaluation by 9-point hedonic scale. Panelists with the 20 percent increase of wolffia, with the product was appropriate because the highest average sensory rating scale. The wolffia snack well, puffed up, brightly green, smell and taste good, thin and crispy. When the physical test of the product was performed, it was found that the lightness ( $L^*$ ) and yellowness ( $b^*$ ) decreased, while the greenness ( $a^*$ ) increased; the moisture and  $a_w$  increased, because wolffia in product. The chemical compositions of the product from air fryer including moisture, fat, protein, ash, fiber and carbohydrate were 1.01, 0.21, 3.79, 3.36, 9.24 and 91.39 %, respectively.

**Keywords :** Wolffia; Water meal; Snack; Air fryer

---

\* Corresponding Author. Tel.: +668 4413 3991, E-mail Address: jureemart@vru.ac.th

## 1. บทนำ

ไข่น้ำ (*Wolffia arrhiza* (L.) Wimm.) มีชื่อเรียกแตกต่างกันไปตามภูมิภาค เช่น ไข่น้ำ ไข่น้ำ ไข่น้ำ หรือ ลูกน้ำ ไข่น้ำมีลักษณะเป็นเม็ดสีเขียวกลมรีขนาดประมาณ 0.5-1.5 มิลลิเมตร ถือเป็นพืชดอกที่มีขนาดเล็กที่สุดในโลก ไข่น้ำไม่มีราก ไม่มีใบ และมีฟองอากาศแทรกอยู่ตรงกลาง จึงลอยอยู่บนผิวน้ำมีสีเขียวลอยเป็นแพ [1] มักเกิดในธรรมชาติที่น้ำใสนิ่ง เช่น บึง หนองน้ำ มักเจริญเติบโตอยู่บนผิวน้ำ มีคุณค่าทางโภชนาการได้แก่ โปรตีนร้อยละ 10-20 ของน้ำหนักแห้ง คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 1-5 ไขมันร้อยละ 25 และเส้นใยร้อยละ 5-16 มีสารออกซิเดชันอยู่ในรูปของเบต้าแคโรทีน 2.52 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ไข่น้ำมีสารสีเขียวปริมาณสูงพบในรูปของคลอโรฟิลล์ 30.17 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม [2] ไม่มีกลิ่นเหม็นเขียว กลิ่นหอมอ่อนคล้ายสาหร่ายหรือสาเขียว [3] นอกจากนี้มีไขมันต่ำและสัดส่วนของกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงกว่าร้อยละ 60 ของปริมาณไขมันทั้งหมด [4] จะเห็นได้ว่าไข่น้ำเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกจากพืชในด้านโภชนาการของมนุษย์ เป็นอาหารแห่งอนาคตที่สามารถต่อยอดสู่อุตสาหกรรมอาหารเพื่อสุขภาพได้ [5]

โดยงานวิจัยนี้พัฒนาเป็นผักแผ่น ที่ช่วยการเพิ่มมูลค่าผักพื้นบ้าน ซึ่งเป็นอาหารขบเคี้ยวที่มีคุณค่าทางโภชนาการ เพื่อเป็นอาหารสำหรับทุกช่วงวัย เนื่องจากผักมีคุณค่าทางโภชนาการเป็นประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น เกลือแร่ วิตามิน และใยอาหาร ซึ่งในปัจจุบันพบว่าเด็กไทยนิยมบริโภคขนมขบเคี้ยวมากเกินไปทำให้รับประทานอาหารมื้อหลักได้น้อย หรืออาจปฏิเสธอาหารมื้อหลัก ทำให้เกิดภาวะขาดสารอาหารส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของร่างกายและเสี่ยงทำให้เกิดภาวะโรคอ้วนได้ อีกทั้งส่วนใหญ่ขนมขบเคี้ยวมีส่วนผสมของไขมัน แป้ง น้ำตาล ในปริมาณมากขาดสารอาหารที่จำเป็น [6] ทำให้มีการวิจัยและพัฒนาโดยนำพืชผักหลายชนิดในท้องถิ่นให้เกิดผลิตภัณฑ์ผักแผ่นดังเช่น การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบ [7] การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักแผ่นจากผักโขมเสริมโปรตีนจากหอยเชอร์รี่ [8]

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด [9] การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักแผ่นเคลือบกรอบ [10] ผลของการใช้ผักน้ำและผักโขมต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบ [11] การพัฒนาผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวเสริมโปรตีนจากไข่น้ำ [12] ดังนั้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญขนมขบเคี้ยวที่ใช้น้ำจากพืชท้องถิ่นนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ไข่น้ำแผ่น เนื่องจากในปัจจุบันไข่น้ำได้รับความนิยมมากขึ้น แต่ยังมีการแปรรูปผลิตภัณฑ์หรือนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านอาหารยังไม่แพร่หลายประกอบกับไข่น้ำมีคุณค่าทางโภชนาการสูงซึ่งสามารถทานได้ทุกช่วงวัยและยังมีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มความหลากหลายให้แก่ผลิตภัณฑ์ เป็นอาหารสุขภาพเพื่อเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภค ประกอบกับสนับสนุนผลผลิตทางการเกษตรเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเชิงพาณิชย์อีกด้วย

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 ศึกษาสูตรพื้นฐานของไข่น้ำแผ่น

ทำการคัดเลือกสูตรผักแผ่นพื้นฐานโดยคัดเลือกจาก 3 สูตร สูตร A ดัดแปลงจาก [13] สูตร B ดัดแปลงจาก [9] สูตร C ดัดแปลงจาก [14] โดยการเตรียมตัวอย่างไข่น้ำล้างน้ำหลายครั้งให้สะอาด นำไปลวกในน้ำเดือด 1 นาที แช่น้ำเย็นทันที ตักใส่ในผ้าขาวบางพักให้สะเด็ดน้ำ ซึ่งผักแผ่นใช้วัตถุดิบหลักคือไข่น้ำและเห็ดเข็มทองและมีความแตกต่างของส่วนผสมในแต่ละสูตรดังตารางที่ 1 โดยมีแป้งมันสำปะหลังเป็นสารยึดเกาะผสมให้เป็นแผ่น จากนั้นนำส่วนผสมคนผสมให้เข้ากัน ยกขึ้นตั้งไฟกวนให้แป้งสุกใสข้นเหนียวใสไข่น้ำและเห็ดเข็มทองคนให้เข้ากัน เกลี่ยบนถาดรองแผ่นพลาสติก อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 5 ชั่วโมง แผ่นแป้งแห้งดิบควบคุมความชื้นร้อยละ 12 และแผ่นพร้อมบริโภคความชื้นไม่เกินร้อยละ 4 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนข้าวเกรียบ มผช.107/2546 [15] ทำให้สุกด้วยการทอดในน้ำมันท่วมจนสุกเหลืองกรอบ พักให้สะเด็ดน้ำมัน จากนั้นนำผลิตภัณฑ์มา

ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความกรอบ และความชอบโดยรวม โดยให้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน เป็นนักศึกษาเพศหญิงหรือเพศชาย อายุ 21-24 ปี ทำการทดสอบ 2 ซ้ำ วิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสให้คะแนน 9 ระดับ (9-Point hedonic scale) โดยมี คะแนน ระดับ 1 คะแนน หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด ไปถึง ระดับ 9 คะแนน หมายถึง ชอบมากที่สุด [16]

ตารางที่ 1 ปริมาณส่วนผสมไข่น้ำแผ่นทั้ง 3 สูตร

ส่วนผสม	ส่วนผสมไข่น้ำแผ่น (ร้อยละ)		
	สูตร A	สูตร B	สูตร C
ไข่น้ำ	6.02	6.67	8.90
เห็ดเข็มทอง	9.04	10	13.33
แป้งมันสำปะหลัง	6.02	13.33	6.67
น้ำตาลทราย	4.52	2	2.22
เกลือป่น	0.30	0.33	0.89
พริกไทยป่น	0.30	0.33	0.44
พริกป่น	0	0.33	0.44
ซีอิ๊วขาว	0	0.33	0.44
น้ำสะอาด	73.80	66.68	66.67

## 2.2 ศึกษาปริมาณไข่น้ำที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์ไข่น้ำแผ่นกรอบ

นำสูตรพื้นฐานจากข้อ 2.1 ที่ผ่านการยอมรับจากผู้ทดสอบ มาทดสอบปริมาณไข่น้ำ 3 ระดับ คือ ร้อยละ 20, 25 และ 30 ตามลำดับ คิดจากน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด 300 กรัม ปริมาณดังตารางที่ 2 โดยการเตรียมตัวอย่างทำเช่นเดียวกับการศึกษาสูตรพื้นฐานไข่น้ำแผ่นกรอบ ประกอบกับควบคุมการขึ้นรูปในขนาดขนาด 12x17 นิ้ว ใส่ส่วนผสมปริมาณ 250 กรัม เกลี่ยให้ทั่วเป็นแผ่นบาง อบแห้งตัดเป็นชิ้นขนาด 1x1 นิ้ว นำไปทอดให้สุก จากนั้นนำผลิตภัณฑ์มาทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ สีเขียว กลิ่น รสชาติ ความกรอบ และความชอบโดยรวม โดยให้ผู้ทดสอบจำนวน 30

คน เป็นนักศึกษาเพศหญิงหรือเพศชาย อายุ 21-24 ปี ทำการทดสอบ 2 ซ้ำ วิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสให้คะแนน 9 ระดับ (9-Point hedonic scale) จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลทางกายภาพและเคมี โดยการวัดค่าสี ได้แก่ ค่าความสว่าง (L\*) ค่าสีแดง (a\*) ค่าสีเหลือง (b\*) ด้วยเครื่องวัดค่าสี Colorimeter ยี่ห้อ Konica Minolta รุ่น CR-400 วัดเนื้อสัมผัสด้วย Brookfield รุ่น CT3 โดยนำผลิตภัณฑ์ไข่น้ำแผ่นวัดด้วยหัว Probe Sphere 12.7 mm TA18 ใช้แรง 7 กรัม บันทึกผลค่าความแข็งและค่าการแตกหัก วัดความชื้นด้วยเครื่อง Moisture Analyzer ยี่ห้อ Sartorius รุ่น MA37 และวัดน้ำอิสระ Water Activity ยี่ห้อ Novasina รุ่น LabSwift-aw

ตารางที่ 2 ปริมาณไข่น้ำในผลิตภัณฑ์ไข่น้ำแผ่นกรอบ

ไข่น้ำ (ร้อยละ)	ปริมาณ (กรัม)
20	60
25	75
30	90

## 2.3 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในผลิตภัณฑ์ไข่น้ำแผ่นกรอบ

การศึกษาไข่น้ำแผ่นทอดแบบน้ำมันท่วมสูตรพื้นฐานเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ไข่น้ำแผ่นกรอบที่ผ่านการพัฒนาทำสุกด้วยหม้อทอดไร้น้ำมันใช้อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที โดยวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เกล็ด เส้นใย และคาร์โบไฮเดรต ตามวิธีการของ AOAC [17]

## 2.4 สถิติที่ใช้ในการวิจัย

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ มีวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) และการวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพ มีการวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomized Design, CRD) จากนั้นนำผลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน

Analysis of Variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan’s New Multiple Range Test (DMRT) ส่วนองค์ประกอบทางเคมีมีการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Independent-samples T-test ที่ระดับความเชื่อมั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติร้อยละ 95

### 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

#### 3.1 ผลการศึกษาสูตรพื้นฐานของไข่น้ำแผ่นกรอบ

การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไข่น้ำแผ่นกรอบ มีผลการทดสอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความกรอบ และความชอบโดยรวม มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยมีคะแนนความชอบในแต่ละคุณลักษณะคือ 7.56-8.36 คะแนน อยู่ในระดับความชอบมากถึงชอบมากที่สุด ซึ่งคะแนนความชอบของสูตร B ผู้ทดสอบให้การยอมรับมากที่สุด (ตารางที่ 1) โดยผลิตภัณฑ์ไข่น้ำแผ่นที่ได้มีลักษณะเป็นแผ่น มีความพองกรอบทั้งชิ้น กลิ่นหอม รสชาติดี และมีความกรอบไม่แข็งกระด้าง (รูปที่ 1)

#### 3.2 ผลการศึกษาปริมาณไข่น้ำในผลิตภัณฑ์ไข่น้ำแผ่นกรอบ

จากการทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของการเพิ่มปริมาณไข่น้ำในผลิตภัณฑ์ไข่น้ำแผ่นกรอบ มีผลการทดสอบจากลักษณะปรากฏ สีเขียว กลิ่น รสชาติ

ความกรอบ และความชอบโดยรวม มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยคะแนนความชอบในแต่ละคุณลักษณะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณไข่น้ำในแต่ละระดับ ประกอบกับปริมาณไข่น้ำ ร้อยละ 20-30 ได้รับคะแนนความชอบในแต่ละคุณลักษณะคือ 6.68-8.52 คะแนน อยู่ในช่วงชอบปานกลางถึงชอบมากจากการทดสอบพบว่า ผลิตภัณฑ์ไข่น้ำแผ่นกรอบที่มีปริมาณไข่น้ำที่ร้อยละ 20 มีคะแนนความชอบคือ 8.14-8.52 คะแนน อยู่ในช่วงชอบมาก ส่วนปริมาณไข่น้ำที่ร้อยละ 25-30 มีคะแนนความชอบลดลง เนื่องจากไข่น้ำในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการผสมตัวของไข่น้ำแผ่นและความพองตัวลดลง มีกลิ่นเหม็นเขียว มีความสากลิ้นเมื่อเคี้ยวและกลืน และเนื้อสัมผัสแข็งกระด้าง เป็นต้น เนื่องจากมีแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวผสมและการพองตัวเมื่อใส่ไข่น้ำในปริมาณมากมีผลต่อการพองตัวลดลง ไข่น้ำมีกลิ่นหอมอ่อนคล้ายสาหร่าย มีเส้นใยสูง ประกอบกับแผ่นไข่น้ำนำไปอบแห้งทำให้มีการระเหยน้ำออกเป็นผลทำให้ผนังเซลล์ยุบตัวลง ทำให้เซลล์ที่ยาวลงเมื่อใส่ในปริมาณที่มากขึ้นจึงมีผลต่อเนื้อสัมผัส [3] ดังนั้นในผลิตภัณฑ์สามารถเพิ่มปริมาณไข่น้ำได้ไม่เกินร้อยละ 20 เนื่องจากผู้ทดสอบให้การยอมรับมากที่สุด ประกอบกับไข่น้ำแผ่นยังคงลักษณะที่ดี มีความพองตัว สีเขียวพอเหมาะ มีกลิ่นหอม มีรสชาติเค็มพอดี เป็นแผ่นบางมีความกรอบทั้งชิ้น (ตารางที่ 2 และรูปที่ 2)

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์จากการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไข่น้ำแผ่นกรอบทั้ง 3 สูตร

ปัจจัยคุณภาพ	สูตร A	สูตร B	สูตร C
ลักษณะปรากฏ	6.62±0.92 <sup>b</sup>	8.24±0.84 <sup>a</sup>	6.62±1.00 <sup>b</sup>
สี	7.18±0.77 <sup>ab</sup>	7.56±0.88 <sup>a</sup>	6.86±1.19 <sup>b</sup>
กลิ่น	7.26±0.80 <sup>b</sup>	7.76±0.65 <sup>a</sup>	7.24±1.11 <sup>b</sup>
รสชาติ	7.42±0.94 <sup>b</sup>	8.26±0.85 <sup>a</sup>	6.80±1.01 <sup>c</sup>
ความกรอบ	7.66±0.98 <sup>b</sup>	8.10±0.88 <sup>a</sup>	6.96±1.36 <sup>c</sup>
ความชอบโดยรวม	7.56±0.81 <sup>b</sup>	8.36±0.87 <sup>a</sup>	6.92±0.82 <sup>c</sup>

หมายเหตุ <sup>a-c</sup> หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )



รูปที่ 1 ใข้ น้ำแผ่นสูตรพื้นฐาน

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของปริมาณใข้ น้ำในผลิตภัณฑ์ใข้ น้ำแผ่นกรอบ

ปัจจัยคุณภาพ	ปริมาณใข้ น้ำ (ร้อยละ)		
	20	25	30
ลักษณะปรากฏ	8.32±0.79 <sup>a</sup>	7.82±0.62 <sup>b</sup>	6.68±0.89 <sup>c</sup>
สีเขียว	8.20±0.75 <sup>a</sup>	7.52±0.78 <sup>b</sup>	6.90±0.88 <sup>c</sup>
กลิ่น	8.14±0.72 <sup>a</sup>	7.48±0.67 <sup>b</sup>	6.96±0.69 <sup>c</sup>
รสชาติ	8.40±0.80 <sup>a</sup>	7.84±0.71 <sup>b</sup>	6.94±0.81 <sup>c</sup>
ความกรอบ	8.40±0.60 <sup>a</sup>	7.78±0.73 <sup>b</sup>	6.94±0.95 <sup>c</sup>
ความชอบโดยรวม	8.52±0.73 <sup>a</sup>	7.82±0.59 <sup>b</sup>	6.76±0.74 <sup>c</sup>

หมายเหตุ <sup>a-c</sup> หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกันที่มีตัวอักษรมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )



รูปที่ 2 ปริมาณใข้ น้ำในผลิตภัณฑ์ใข้ น้ำแผ่นกรอบ

### 3.3 ผลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของใข้ น้ำในผลิตภัณฑ์ใข้ น้ำแผ่นกรอบ

ผลิตภัณฑ์ใข้ น้ำแผ่นที่มีปริมาณใข้ น้ำเพิ่มขึ้นในแต่ละระดับ มีผลทำให้ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ลดลง ค่าสีเขียว ( $a^*$ ) เพิ่มขึ้น และค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) ลดลง เนื่องจาก

ใข้ น้ำให้สีเขียวที่มีสารประกอบคลอโรฟิลล์สูง [3] เมื่อนำมาผสมในผลิตภัณฑ์จึงมีผลต่อสีเขียวที่เข้มขึ้นในแต่ละระดับ ส่วนค่าความชื้นมีค่าในช่วง 1.38-2.42 และค่า  $a_w$  มีค่าในช่วง 0.26-0.31 ซึ่งค่าความชื้นและค่า  $a_w$  มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

( $p < 0.05$ ) แต่คงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ข้าวเกรียบที่กำหนดให้แผ่นแป้งพร้อมบริโภครวมความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 4 [15] และค่าเนื้อสัมผัสมีผลการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness) มีค่าในช่วง 909.66-1,549 กรัม ค่าการแตกหัก (Fracturability) มีค่าในช่วง 652.45-1,324 กรัม จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งและค่าการแตกหักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในการเพิ่มปริมาณไขมันแต่ละระดับ เนื่องจากไขมันมีเส้นใยสูงและมีขนาดเล็กละเอียด [12] ประกอบกับในส่วนผสมใช้แป้งมันสำปะหลังทำให้เกิดฟิล์มบางเคลือบไขมันและเป็นตัวประสานให้ไขมันเกาะตัวกันขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ [10] เมื่อใส่ไขมันในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้โครงสร้างของเจลในแป้งลดลง [19] เกิดความแน่นเนื้อทำให้มีผลต่อค่าความแข็งและค่าการแตกหักเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสอดคล้องกับผลการทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ปริมาณไขมัน ร้อยละ 20 เหมาะสมต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไขมันแผ่น (ดังตารางที่ 3)

### 3.4 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในผลิตภัณฑ์ไขมันแผ่น

นำผลิตภัณฑ์ไขมันแผ่นทอดน้ำมันท่วมสูตรพื้นฐานเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ไขมันแผ่นพัฒนาแล้วอบด้วยหม้อทอดไร้น้ำมัน ผลการวิเคราะห์ พบว่า

ผลิตภัณฑ์ไขมันแผ่นหม้อทอดไร้น้ำมันมีความชื้นและไขมันต่ำกว่า ส่วนโปรตีน ไขมัน เส้นใย และคาร์โบไฮเดรต มีปริมาณมากกว่าการทอดในน้ำมันท่วม โดยมีผลการวิเคราะห์ดังนี้ ความชื้น ไขมัน โปรตีน ไขมัน เส้นใย และคาร์โบไฮเดรตมีร้อยละ 1.01, 0.21, 4.79, 3.36, 9.24 และ 91.39 โดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ (ตารางที่ 4) จะเห็นได้ว่าไขมันแผ่นทอดน้ำมันท่วมสูตรพื้นฐานมีความชื้นและไขมันมากกว่าไขมันแผ่นอบด้วยหม้อทอดไร้น้ำมัน เนื่องจากไขมันแผ่นทำให้สุกด้วยวิธีการทอดด้วยน้ำมันท่วม เกิดจากการขยายตัวทำให้เกิดโพรงอากาศ เมื่อให้ความร้อนน้ำจะถูกระเหยเป็นไอทำให้เกิดแรงดันภายในส่งผลให้อาหารสุกเกิดการพองตัวและมีความกรอบขึ้น ขณะเดียวกันไขมันเข้าไปแทนที่ความชื้นที่ถูกกำจัดออกจากผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว [18] ส่งผลต่อความชื้นและไขมันที่เพิ่มขึ้น ส่วนไขมันแผ่นพัฒนาแล้วมีปริมาณไขมัน ร้อยละ 20 อบหม้อทอดไร้น้ำมัน พบว่ามีโปรตีน เส้นใย และคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากไขมันมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 10-20 มีกรดอะมิโนจำเป็นสูงใกล้เคียงกับความต้องการของร่างกาย โยอาหารร้อยละ 25 และมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 1-5 ของน้ำหนักแห้ง [4] ดังนั้นเมื่อใส่ไขมันในผลิตภัณฑ์จึงมีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน จึงเหมาะกับการประยุกต์ใช้ในอาหาร เพื่อเพิ่มศักยภาพอาหารเพื่อส่งเสริมสุขภาพ

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ทางภาพทางกายภาพและเคมีของการเพิ่มปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์ไขมันแผ่น

ปัจจัยคุณภาพ	ปริมาณไขมันในไขมันแผ่น		
	ร้อยละ 20	ร้อยละ 25	ร้อยละ 30
ค่าสี			
L*	36.48±0.01 <sup>a</sup>	35.29±0.18 <sup>b</sup>	30.33±0.14 <sup>c</sup>
a*	-2.13±0.03 <sup>a</sup>	-2.27±0.02 <sup>b</sup>	-2.46±0.01 <sup>c</sup>
b*	16.19±0.44 <sup>a</sup>	12.87±0.57 <sup>b</sup>	11.41±0.11 <sup>c</sup>
ค่าความชื้น	1.38±0.04 <sup>c</sup>	2.34±0.02 <sup>b</sup>	2.42±0.02 <sup>a</sup>
ค่า a <sub>w</sub>	0.26±0.00 <sup>b</sup>	0.28±0.00 <sup>b</sup>	0.31±0.02 <sup>a</sup>

ปัจจัยคุณภาพ	ปริมาณไชน้ำในไชน้ำแผ่น		
	ร้อยละ 20	ร้อยละ 25	ร้อยละ 30
ค่าเนื้อสัมผัส			
ค่าความแข็ง (Hardness/g.)	909.66±87.79 <sup>c</sup>	1,232.66±15.30 <sup>b</sup>	1,549±17.34 <sup>a</sup>
ค่าการแตกหัก (Fracturability/g.)	652.45±41.74 <sup>b</sup>	1,240.65±15.30 <sup>a</sup>	1,324±69.24 <sup>a</sup>

หมายเหตุ L\* หมายถึง ค่าความสว่าง (ดำ = 0,ขาว = 100), a\* หมายถึง สีแดงหรือสีเขียว (+สีแดง -สีเขียว), b\* หมายถึง สีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (+สีเหลือง - สีน้ำเงิน) , <sup>a-c</sup> หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแวนอนเดียวกันที่มีตัวอักษรเหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05)

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ไชน้ำแผ่นกรอบ

องค์ประกอบทางเคมี	ไชน้ำแผ่นสูตรพื้นฐาน	ไชน้ำแผ่นผ่านการพัฒนา
	ทอดน้ำมันท่วม	หม้อทอดไร้น้ำมัน
ความชื้น	3.13±0.23 <sup>a</sup>	1.01±0.01 <sup>b</sup>
ไขมัน	16.04±1.88 <sup>a</sup>	0.21±0.04 <sup>b</sup>
โปรตีน	2.20±0.09 <sup>b</sup>	4.79±0.12 <sup>a</sup>
เถ้า	2.54±0.73 <sup>b</sup>	3.36±0.75 <sup>a</sup>
เส้นใย	4.33±0.39 <sup>b</sup>	9.24±1.80 <sup>a</sup>
คาร์โบไฮเดรต	76.08±1.70 <sup>b</sup>	91.39±0.38 <sup>a</sup>

หมายเหตุ <sup>a-b</sup> หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแวนอนเดียวกันที่มีตัวอักษรมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05)

#### 4. สรุป

การวิจัยการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไชน้ำแผ่นพบว่าสูตรพื้นฐานที่ผ่านการคัดเลือกคือ สูตร B อยู่ในระดับความชอบมากถึงชอบมากที่สุด โดยผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นแผ่น มีความพองกรอบทั้งชิ้น กลิ่นหอม รสชาติดี และเนื้อสัมผัสกรอบไม่แข็งกระด้าง จากนั้นนำมาเพิ่มปริมาณไชน้ำในผลิตภัณฑ์ เมื่อนำไปทดสอบทางประสาทสัมผัสปริมาณไชน้ำที่เหมาะสมที่ผู้ทดสอบยอมรับ ไม่เกินร้อยละ 20 ซึ่งไชน้ำแผ่นยังคงลักษณะที่ดี มีความพองตัว สีเขียว

พอเหมาะ มีกลิ่นหอม รสชาติดี เป็นแผ่นบางมีความกรอบทั้งชิ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ไชน้ำแผ่น ได้แก่ ค่าสีที่มีค่าความสว่าง (L\*) ลดลง ค่าสีเขียว (a\*) เพิ่มขึ้น และค่าสีเหลือง (b\*) ลดลง ส่วนค่าความชื้นและค่า aw มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นแต่คงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และค่าเนื้อสัมผัส ได้แก่ ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าการแตกหัก (Fracturability) เพิ่มขึ้น มีผลต่อการพองตัวลดลง มีความกรอบแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนผลการศึกษารสชาติขององค์ประกอบทางเคมีในผลิตภัณฑ์ไชน้ำแผ่นที่ผ่านการพัฒนาแล้วทำสุกด้วยหม้อทอดไร้น้ำมัน มีความชื้นและไขมันต่ำ ส่วนโปรตีน เถ้า เส้นใย และคาร์โบไฮเดรตมีปริมาณมาก

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ นายติณภพ ศรีโสภณ และกนกพล คุ่มศักดิ์ ผู้ช่วยนักวิจัย บุคคลากร เจ้าหน้าที่นักศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย อีกทั้งให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกงานวิจัยสำเร็จลุล่วง

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Somboon, "Cultivation and utilization of Water Meal (Khai nam)," *Kasetsart*

- Extension Journal*, vol. 60, no. 2, pp. 61-74, Jan. 2015.
- [2] O. Monthakantirat, Y. Chulikhit, J. Maneenet, C. Khamphukdee, Y. Chotritthirong, S. Limsakul, T. Punya, B. Turapra, C. Boonyarat, and S. Daodee "Total active compounds and mineral contents in *Wolffia globosa*". *Journal of Chemistry*, 2022, vol. 2022, pp. 1-8, Sep. 2022.
- [3] P. Thongkham, "Effect of temperature on Antioxidant Activity in Dried Water meal (*Wolffia arrhizal* (L.) Wimm) and Application in Food Products," M.S. thesis, Dept. Home Econ., RMUTT., Thailand, 2019.
- [4] W. P. -utai, "Wolffia: Green aqua plant and alternative protein for human health", *Food Journal*, vol.50, no.4, pp. 28-36, 2020.
- [5] Faculty of Science, Mahidol University, "Phum", Native plants food the future to food and environmental crises," [Online]. <https://sustainability.mahidol.ac.th/th/case-study/SDGs/detail/541>. [Accessed: Aug. 5, 2024].
- [6] P. Thammapat, N.-A. Ongnarm, A. Yothawong, S. Raksarad, and C. P. N-Ayudhya, "Development of baked crispy snack of eggplant leaves fortified with protein from insects," *Prawarun Agricultural Journal*, vol.18, no.2, pp. 80–86, 2021.
- [7] P. Phugan, P. Pramai, S. Inket, and A. Chodnakarin, "Development of Vegetable Crisps," *Academic Journal of Uttaradit Rajabhat University*, vol.18, no.1, pp. 55–67, Jan.-Jun. 2023.
- [8] P. Dornchai, S. Raksarad, M. Yubolchoo and P. Thammapat, "Development of Vegetable Leathers from Amaranth Fortified with Protein from Channeled Apple Snail," *Naresuan Agriculture Journal*, vol.19, no.1, pp. 1–13, 2022.
- [9] A. Dholvitayakhun, J. Krisomros, P. Chantharasiri, W. Wutthichat, and A. Sanguanval, "Development of Crispy Vegetable Chip with Protein Supplement from Crickets," *Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal*, vol. 15, no.1, pp. 60-73, Jan.-Apr. 2023.
- [10] T. Rithmanee, "Development of Crispy Vegetable Chip from Kale," *PSRU Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 72-82, May.- Aug. 2024.
- [11] K. Chumkaew, A. Jantapo, and C. Punfujinda, "The Effect of Using Watercress (*Nasturtium officinale*) and Chaya spinach (*Cnidioscolus chayamansa* McVaugh) on the Quality of Crispy Vegetable Sheet Products," *Journal of Sustainable Home Economics and Culture*, vol. 5, no. 2, pp. 56-70. 2023.
- [12] A. Phonpanawit and S. Klomjoho. "Development of Noodle Product Protein Fortification with Watermeal (*Wolffia arrhizal* (L.) Wimm.)," *Science Journal Chandrakasem Rajabhat University*, vol.34, no.2, pp. 160-169. Jul.-Dec. 2023.
- [13] W. Saengthongpinit, S. Thakum, P. Thepthaptim, and P. Fuengfuang, "Development of Okra (*Abelmoschus*

- esculentus (L.) Moench) and Water Spinach (Ipomoea aquatica Var. reptans) Sheet as a Healthy Snack,” in Proceedings of the 11th NPRU National Academic Conference, Nakhon Pathom Rajabhat University, Thailand, 2015, pp. 771-780.
- [14] A. Jangchud, S. Khemthong, S. Wongwat, and R. Kitisirimongkon, “Development of vegetable leather,” in Proceedings of 43rd Kasetsart University Annual Conference Animals, Agro-Industry: Thailand, 2005, pp. 602-609.
- [15] Thai Community Product Standard. Crispy Snack (Khaogriab), TCPS Standard, TISI 107/2554, 2011.
- [16] N. Rungjindarat, T. Jaiyai, A. Sinthupachee, and N. Phansaita. “Analyzing Food and Beverages Through Sensory Evaluation for Acceptance Testing: Concepts, Experimental Planning, and Selection of Appropriate Statistics,” *Dusit Thani College Journal*. vol.17 no.3 pp. 190-204, Sep.–Dec. 2023.
- [17] A.O.A.C., *Official Method of Analysis: Association of Analytical Chemists*, 19th ed. Washington DC. 2012.
- [18] *Research Reports*, The Development Fish Cracker from Surimi Supplement with Pumpkin,” Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat, 2017.
- [19] D. Sukboonyasatit, P. Singporn, and S. Sawangwong. “Effects of bamboo grass powder supplementation on chemical and physical properties of rice noodle,” *Agricultural Science Journal*. vol.49 no.2 pp. 237-240 2018.

## ผลของการพรีทรีตเมนต์ด้วยไมโครเวฟและเทคนิคการพัพฟิงต่อคุณภาพของแครีรอตอบแห้ง

ประยูร จอมหล้าพีรติกุล ภูษิสส์ ตันวานิชกุล และ อภาภรณ์ จอมหล้าพีรติกุล\*

สาขาวิศวกรรมอาหารและชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น  
150 หมู่ 6 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

รับบทความ 17 ธันวาคม 2567 แก้ไขบทความ 7 สิงหาคม 2568 ตอรับบทความ 4 กันยายน 2568

### บทคัดย่อ

การพัพฟิงเป็นเทคนิคในการเพิ่มคุณภาพทางเนื้อสัมผัสให้แครีรอตอบแห้งมีความกรอบแต่การพัพฟิงต้องใช้อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ จึงต้องมีวิธีการพรีทรีตเมนต์ ที่เหมาะสมเพื่อลดปัญหานี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเวลาพรีทรีตเมนต์โดยการลวกด้วยไมโครเวฟ (1 2 และ 3 นาที) อุณหภูมิพัพฟิง (140 150 และ 160 องศาเซลเซียส) และเวลาพัพฟิง (1 2 และ 3 นาที) ต่อคุณภาพของแครีรอตอบแห้ง ในด้านความแตกต่างสี และความแข็งของเนื้อสัมผัส ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีพัพฟิงแบบสองขั้นตอนใช้เวลาในการลวกด้วยไมโครเวฟ 2 นาที อุณหภูมิพัพฟิง 147.5 องศาเซลเซียส และเวลาพัพฟิง 1.75 นาที จะได้ค่าความแตกต่างสี 14.45 ความแข็งของเนื้อสัมผัส 8.29 N

คำสำคัญ : การอบแห้ง; เทคนิคการพัพฟิง; แครีรอต

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 5716 0057, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: apaporn.jo@rmuti.ac.th

# Effect of Pretreatment using Microwave and Puffing Technique on the Quality of Dried Carrots

Prayoon Jomlaperatikul Bhuchiss Tanwanichkul and Apaporn Jomlaperatikul\*

Department of Food and Biological Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus

150 Moo. 6, Srichan Road, Tambon Nai-Muang, Amphur Muang, KhonKaen, 40000

---

*Received 17 December 2024; Revised 7 August 2025; Accepted 4 September 2025*

## Abstract

Puffing is a technique used to enhance the crispness and textural quality of dried carrots. Nevertheless, high temperature puffing accelerates non-enzymatic browning reactions. A pretreatment method that is appropriate is necessary to mitigate this issue. The objective of this work was therefore to study the effects of microwave blanching time (1, 2, and 3 minutes), puffing temperature (140, 150, and 160 °C), and puffing time (1, 2, and 3 minutes) on carrot qualities such as colour, and textural property. The optimisation using response surface methodology was used for a trade-off between colour and textural properties. To obtain a good quality product should be operated at the microwave blanching for 2 minutes, a puffing temperature of 147.5 °C, and a puffing time of 1.75 minutes. Due to these parameters, the color difference value was 14.45 and the textural hardness was 8.29 N.

**Keywords :** Drying; Puffing Technique; Carrots

---

\* *Corresponding Author. Tel.: +668 5716 0057, E-mail Address: apaporn.jo@rmuti.ac.th*

## 1. บทนำ

ปัจจุบันผักและผลไม้อบแห้งเป็นขนมขบเคี้ยวที่มีความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความกรอบอร่อย ไม่อมน้ำมันและไม่มีปัญหากลิ่นหืนเหมือนกับอาหารขบเคี้ยวที่ผ่านการทอด แคร้รอตเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่นำมาแปรรูปด้วยการอบกรอบ จากคุณสมบัติของแคร้รอตที่มีทั้งสารเบต้าแคโรทีนช่วยบำรุงสายตา อีกทั้งมีวิตามินและแร่ธาตุที่มีประโยชน์หลายชนิด เช่น วิตามินเอ วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 วิตามินซี วิตามินอี ธาตุแคลเซียม ธาตุโพแทสเซียม ธาตุฟอสฟอรัส ธาตุเหล็ก และปริมาณสารฟอลคารินอล (falcarinol) [1], [2] ซึ่งช่วยต่อต้านเซลล์มะเร็ง [2] ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ แคร้รอตจึงน่าสนใจที่จะนำมาแปรรูปเป็นแคร้รอตอบกรอบ

การแปรรูปด้วยกระบวนการอบแห้งเป็นการรักษาคุณภาพและเพิ่มมูลค่าของผักผลไม้ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามในกระบวนการอบแห้งยังมีข้อเสียด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น เนื้อสัมผัสที่แห้งแข็งและการเปลี่ยนแปลงของสี เป็นต้น ในการแก้ไขปัญหาคุณภาพเนื้อสัมผัสให้มีความกรอบนั้น สามารถนำเทคนิคการพัพฟิงที่มีการใช้อุณหภูมิสูง และระยะเวลาสั้นๆ ในการอบแห้ง ส่งผลให้การระเหยของน้ำภายในผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว ทำให้โครงสร้างภายในเกิดการพองและมีการขยายตัว ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความกรอบมากขึ้น [3] ถึงแม้ว่าการพัพฟิงจะช่วยแก้ปัญหาในด้านความกรอบ แต่ด้วยเทคนิคการใช้อุณหภูมิสูงก็ส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านสี ทำให้เกิดสีน้ำตาลเข้มหรือไหม้บางส่วน โดยการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาพัพฟิงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ที่มาจากน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดอะมิโนโปรตีน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาจากการศึกษาทางวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การพัพฟิตเมนต์โดยการลวกแคร้รอตด้วยไมโครเวฟจะช่วยลดความแน่นเนื้อและการเปลี่ยนแปลงสีน้อยกว่าการพัพฟิตเมนต์ด้วยวิธีอื่น เช่น การลวกด้วยน้ำร้อนและการนึ่ง [4], [5] เนื่องจากการลวกด้วยไมโครเวฟจะทำลาย เพคติน

ในผนังเชื่อมยึดระหว่างเซลล์ ทำให้ลดความแข็งของเนื้อสัมผัส [6] และช่วยกำจัดเอนไซม์ในผลิตภัณฑ์ได้รวดเร็วกว่าวิธีอื่น ทำให้การทำงานของเอนไซม์ลดลง [7] งานวิจัยของ Surapit et al. [8] พบว่าการลวกด้วยไมโครเวฟช่วยลดการเกิดสีน้ำตาลของกล้วยกรอบ เมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยกรอบที่ไม่ผ่านการลวก และยังมีงานวิจัยของ F. Salehi et al. [9] ที่พบว่าการลวกด้วยไมโครเวฟจะเพิ่มปริมาณสารฟอลคารินอล (falcarinol) ในเซอร์รีหวาน ดังนั้นการลวกด้วยไมโครเวฟเป็นทางเลือกใหม่ของการพัพฟิตเมนต์ก่อนอบแห้งผลิตภัณฑ์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาเวลาในการลวกด้วยไมโครเวฟ อุณหภูมิพัพฟิงและเวลาพัพฟิง ต่อคุณภาพแคร้รอตอบแห้ง ได้แก่ ความแตกต่างสี และความแข็งของเนื้อสัมผัส โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดลอง

นำแคร้รอตลอกเปลือกและล้าง จากนั้นใช้มีดฝานที่สามารถปรับระดับความหนาได้ ที่ระดับความหนา 2.5 มิลลิเมตร จำนวน 90 กรัม (ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ  $90.83 \pm 0.07$  มาตรฐานเปียก) โดยมีวิธีการเตรียมตัวอย่างด้วยการพัพฟิตเมนต์ โดยใส่จานเซรามิกไม่ใส่น้ำ ลวกด้วยไมโครเวฟ (Sharp, R-220, Japan) กำลังไฟ 700 วัตต์ เป็นเวลา 1 2 และ 3 นาที จากนั้นนำมาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน (JSR, รุ่น JSOF-050, Korea) มี 3 ขั้นตอนทำต่อเนื่องกันด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน โดยขั้นตอนแรกอบแห้งที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขั้นตอนที่สองนำมาพัพฟิงด้วยอุณหภูมิ 140 150 160  $^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 2 และ 3 นาที และขั้นตอนสุดท้ายอบแห้งที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 10 มาตรฐานเปียก จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งมาวิเคราะห์คุณภาพต่อไป

## 2.2 การวิเคราะห์คุณภาพ

### 2.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

วิเคราะห์ความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน (JSR, รุ่น JSOF-050, Korea) และเครื่องชั่งน้ำหนักแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Sartorius, รุ่น CP3202S, Germany) ความแม่นยำ  $\pm 0.01$  กรัม การวิเคราะห์ความชื้นตามวิธี AOAC [10]

### 2.2.2 การวิเคราะห์ค่าสี

การวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Hunter Lab, USA) วิเคราะห์ค่าสี  $L$ ,  $a$  และ  $b$  โดยวัดค่าสีในแต่ละกลุ่มตัวอย่างมาหาค่าความแตกต่างของสี ( $\Delta E$ ) จากสมการ (1)

$$\Delta E = \sqrt{(L_0 - L)^2 + (a_0 - a)^2 + (b_0 - b)^2} \quad (1)$$

โดยที่

$L_0$  และ  $L$  = ค่าความสว่างของสีก่อนและหลังอบแห้ง  
 $a_0$  และ  $a$  = ค่าสีแดงหรือเขียวก่อนและหลังอบแห้ง  
 $b_0$  และ  $b$  = ค่าสีเหลืองหรือน้ำเงินก่อนและหลังอบแห้ง

### 2.2.3 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

การทดสอบเนื้อสัมผัสด้านความแข็งของแคร่รอด โดยใช้เครื่องวัดแรงกดอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ยี่ห้อ Lloyd Instruments รุ่น LRX-Plus ผู้ผลิตบริษัท AMETEK Lloyd Instrument Ltd. ประเทศอังกฤษ การทดสอบใช้แรงกดโดยใช้หัวกดแบบทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร ในการทดสอบกำหนดความเร็วในการทดสอบที่ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที

### 2.2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

ทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของแคร่รอด ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น TM3030 Hitachi Japan โดยนำแคร่รอดอบแห้งมาเพื่อ

ดูโครงสร้างตามแนวขวาง โดยใช้พลังงานในการเร่งอิเล็กตรอนเท่ากับ 10 kv กำลังขยาย 500 เท่า

## 2.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวดอปสนอง

ตัวแปรที่ต้องการศึกษาในการอบแห้งแคร่รอดเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อความชื้น ความแตกต่างสีโดยรวม ( $\Delta E$ ) และความแข็งเนื้อสัมผัสของแคร่รอดอบแห้ง ประกอบด้วย 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ การพффิง เวลาการลวกด้วยไมโครเวฟ และเวลาการพффิง โดยคุณภาพที่ต้องการศึกษาจะกำหนดให้เป็นตัวแปร ( $Y$ ) ซึ่งการประมาณค่าของตัวแปร  $Y$  จะใช้สมการกำลังสองเชิงถดถอย (Second Order Polynomial Regression) อ้างอิงตาม D.C. Montgomery [11] ดังสมการที่ (2)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i \neq j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

โดยที่

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  = ค่าสัมประสิทธิ์

$X_i$  เป็นที่ต้องการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิการพффิง ( $X_1$ ) เวลาในการลวกด้วยไมโครเวฟ ( $X_2$ ) และเวลาในการพффิง ( $X_3$ ) โดยกำหนดค่าของตัวแปรดังนี้  $X_1$  มีค่าเท่ากับ 140 150 และ 160 °C สำหรับ  $X_2$  และ  $X_3$  มีค่าเท่ากับ 1 2 และ 3 นาที ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรศึกษา

ตัวแปรต้น	ตัวแปร	ระดับ		
		-1	0	1
อุณหภูมิการพффิง (°C)	$X_1$	140	150	160
เวลาลวกด้วยไมโครเวฟ (นาที)	$X_2$	1	2	3
เวลาพффิง (นาที)	$X_3$	1	2	3

### 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

#### 3.1 สมการถดถอยและการวิเคราะห์ ค่าความแปรปรวน

ผลการศึกษาหาความเหมาะสมในการอบแห้งแคร้รอตด้วยเทคนิคการพัพฟิงต่อคุณภาพด้านความชื้น ความแข็งเนื้อสัมผัส และค่าความแตกต่างสีโดยรวมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองและการออกแบบการทดลอง Box-Behnken โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา 3 ตัวแปร คือ อุณหภูมิพัพฟิง เวลาในการลวกด้วยไมโครเวฟ และเวลาพัพฟิง จากผลการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและการตอบสนองของตัวแปร สามารถนำมาสร้างเป็นสมการถดถอยของความชื้น ( $Y_1$ ) ความแข็งเนื้อสัมผัส ( $Y_2$ ) และความแตกต่างของสี ( $Y_3$ ) ดังสมการที่ (3)-(5) ตามลำดับ

$$Y_1 = 9 - 0.63X_1 - 3.25X_2 - 2.38X_3 + X_1X_2 + 0.25X_1X_3 + 0.5X_2X_3 + 1.88X_1^2 + 1.13X_2^2 + 0.88X_3^2 \quad (3)$$

$$Y_2 = 6.79 - 0.71X_1 - 3.77X_2 - 0.93X_3 + 0.04X_1X_2 - 0.13X_1X_3 + 1.65X_2X_3 + 0.22X_1^2 + 1.21X_2^2 + 0.02X_3^2 \quad (4)$$

$$Y_3 = 15.33 + 1.75X_1 + 3.25X_2 + 2X_3 + 1.75X_1X_2 + 4.25X_1X_3 + 2.75X_2X_3 - 0.29X_1^2 + 5.21X_2^2 + 0.21X_3^2 \quad (5)$$

จากผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมในรูปแบบกำลังสอง (Quadratic) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีค่านัยสำคัญ  $\alpha=0.05$  ค่า p-value มีความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ค่า p-value ของ lack of fit ไม่มีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูง โดยมีค่า  $R^2$  ของสมการ (3)-(5) ได้แก่ 0.985 0.981 และ 0.911 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองดังสมการที่ (2) มีความเหมาะสมสำหรับแบบจำลอง เพื่อนำไปทำนายคุณภาพของการอบแห้งแคร้รอตโดยการพัพฟิง

ด้วยการลวกด้วยไมโครเวฟและเทคนิคการพัพฟิง โดยแสดงผลในกราฟความสัมพันธ์ทั้ง 3 ตัวแปร จากสมการ (3)-(5) ที่มีความเหมาะสมและค่า  $R^2$  ที่สูงสามารถนำมาวิเคราะห์นอกช่วงการทดลองทำให้เกิดความน่าเชื่อถือได้ โดยคำนวณอุณหภูมิเพิ่มคือ 130 และ 170 °C (การทดลอง 140 150 และ 160 °C) เวลาในการลวกด้วยไมโครเวฟและเวลาพัพฟิง 0 ถึง 4 นาที (การทดลอง 1 2 และ 3 นาที) ดังรูปที่ 1 และ 2

#### 3.2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพ

การทดลองได้กำหนดคุณภาพด้านความชื้นของแคร้รอตอบแห้งให้มีความชื้นสุดท้ายที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 10 มาตรฐานเปียก [12] จากรูปที่ 1 ก) จะเห็นว่าเวลาลวกแคร้รอตด้วยไมโครเวฟและเวลาพัพฟิงมากขึ้นจะทำให้ความชื้นลดลง โดยเฉพาะเวลาในการลวกด้วยไมโครเวฟมีอิทธิพลต่อความความชื้นมากกว่าเวลาพัพฟิง สังเกตได้จากความชันของกราฟ เป็นผลเนื่องจากการลวกด้วยไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้เกิดพลังงานความร้อน ทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น [13] โดยเฉพาะช่วงการลวกด้วยไมโครเวฟ 0-2 นาที จะสังเกตได้ว่ากราฟมีความชันมากกว่าช่วง 2-4 นาที

เมื่อวิเคราะห์รูปที่ 1 ข) จะเห็นว่าเมื่อเวลาพัพฟิงเพิ่มขึ้นความแข็งมีค่าลดลง (ที่ช่วงการลวกด้วยไมโครเวฟ 0-2 นาที) หลังจากนั้นความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สอดคล้องกับผลการศึกษาของ N.C. Shilton et al.[14] ที่พบว่าความชื้นผลิตภัณฑ์ก่อนการพัพฟิงเหลือน้อย เนื่องจากใช้เวลาในการพัพฟิงที่เร็วขึ้นโดยการลวกด้วยไมโครเวฟนานขึ้น การระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ก็จะมากขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ไม่เพียงพอต่อการเดือดและการระเหยจนกลายเป็นไอ เกิดการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ได้น้อย ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งขึ้น แต่ถ้าความชื้นของผลิตภัณฑ์สูง ก่อนการพัพฟิงก็จะไปลดประสิทธิภาพการพัพฟิง เพราะฉะนั้นระดับความชื้นก่อนการพัพฟิงต้องมีความเหมาะสม เพื่อทำให้เกิดการขยายตัวที่ดีนำไปสู่การเพิ่มความกรอบของผลิตภัณฑ์

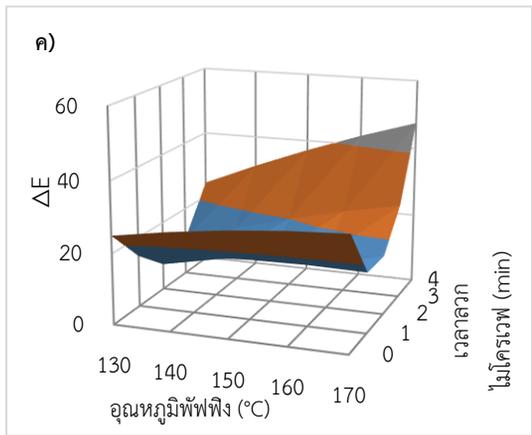
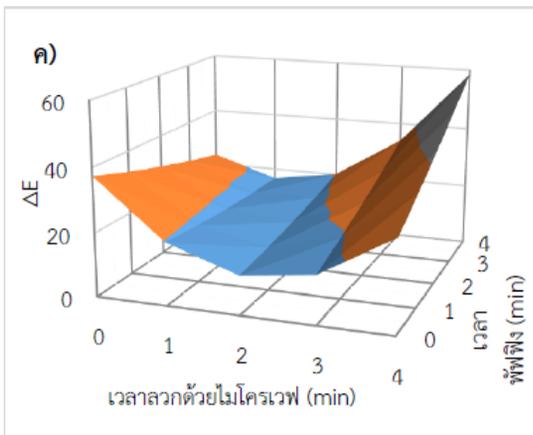
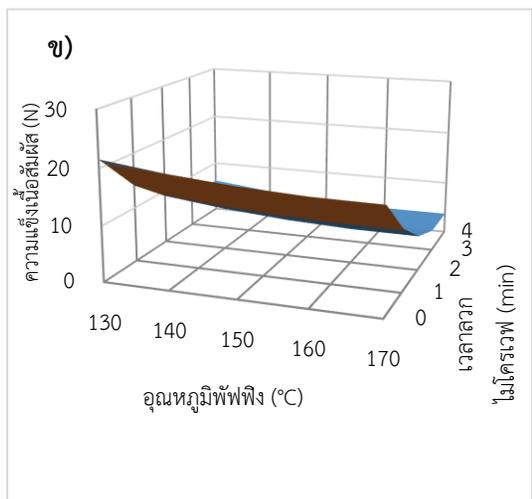
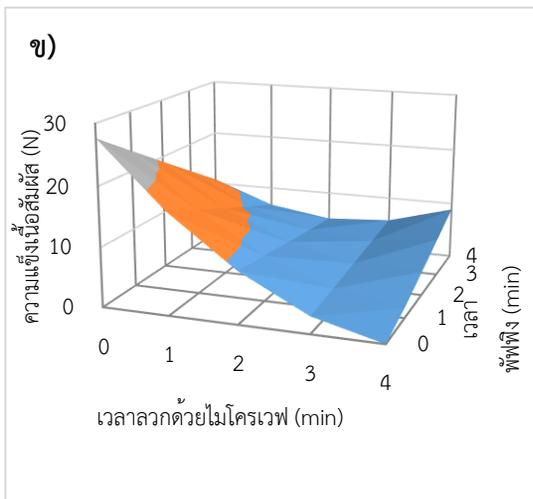
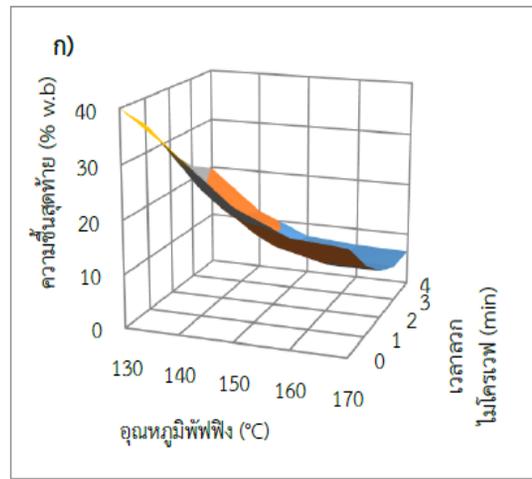
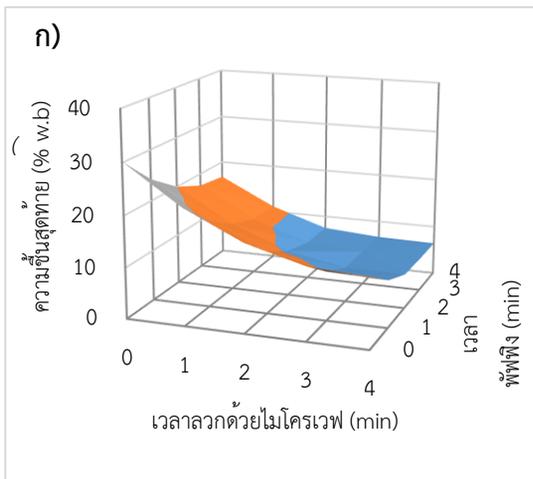
นอกจากนี้ตามรูปที่ 1 ค) จะเห็นว่าเวลาในการลวกด้วยไมโครเวฟและเวลาในการพัพฟิง ส่งผลต่อค่า  $\Delta E$  ใน 2 ช่วงเวลา คือ ระยะแรก 0-2 นาที ค่า  $\Delta E$  มีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับหลายๆงานวิจัยที่ พรีทรีตเมนต์ด้วยไมโครเวฟในเวลาที่เหมาะสมที่สุด ไม่เกิน 2 นาที เช่น งานวิจัยของ M. A. Hamid et al. [15] ที่พบว่าเวลาลวกด้วยไมโครเวฟเป็นเวลา 1 นาทีเป็นวิธีที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับการลวกด้วยไอน้ำ เนื่องจากยังคงสภาพสี ลดการทำงานของเอนไซม์ PPO และงานวิจัยของ C. Severini et al. [16] ที่พบว่าเวลาที่เหมาะสมในการลวกบรอกโคลีด้วยไมโครเวฟ เป็นเวลา 80 วินาที จะช่วยคงสภาพสีได้ดีที่สุด ส่วนระยะเวลา 2-4 นาที ค่า  $\Delta E$  จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการรายงานของ T. V. L. Nguyen et al. [17] ที่กล่าวว่าเวลาลวกเป็นเวลาที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการสูญเสียวิตามิน และเนื้อสัมผัสเหนียวเกินไป

การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิพัพฟิงและเวลาลวกด้วยไมโครเวฟต่อคุณภาพแครอทอบแห้ง ดังรูปที่ 2 (ก) พิจารณาอุณหภูมิพัพฟิงและเวลาในการลวกด้วยไมโครเวฟส่งผลต่อความชื้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นมีแนวโน้มลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ T. Surapit et al. [8] ที่อบแห้งกล้วยแผ่น พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิพัพฟิงจะทำให้กล้วยแผ่นใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง เนื่องจากอุณหภูมิพัพฟิงสูงจะทำให้ความชื้นมีอัตราการระเหยสูงขึ้น และการลวกด้วยไมโครเวฟนานขึ้น จะทำให้ความชื้นลดลง เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุทะลวงเข้าไปในวัสดุโดยตรง เป็นผลให้ความชื้นบางส่วนระเหยออกไปจากวัสดุ ส่วนผลของอุณหภูมิพัพฟิงและเวลาลวกด้วยไมโครเวฟต่อคุณภาพแครอทอบแห้งต่อความแข็งของเนื้อสัมผัส ตามรูปที่ 2 ข) จะเห็นว่าอุณหภูมิพัพฟิง เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความแข็งของเนื้อสัมผัสลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ J.Thavorn [18] และสอดคล้องกับงานวิจัยของ C. Raikham et al. [19] ที่รายงานว่าอุณหภูมิและเวลาในการพัพฟิงสูงชันทำให้การหดตัวลดลง และเนื้อสัมผัสกรอบขึ้น เนื่องจากการพัพฟิงด้วยอุณหภูมิสูง ทำให้ความดันไอที่เกิดจาก

การเดือดของน้ำในผลิตภัณฑ์สูงชัน ทำให้โครงสร้างภายในผลิตภัณฑ์มีรูพรุนมากขึ้น ลักษณะโครงสร้างดังกล่าวจะทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างลดลง ส่งผลให้แครอทมีความแข็งแรงลดลง จึงทำให้แครอทกรอบขึ้น แต่ถ้าใช้เวลาในการพัพฟิงนานเกินไปจะทำให้เนื้อสัมผัสแข็งและมีสีเข้มเกินไปดังรายงานของ T. Surapit et al. [20] ที่ใช้เวลาการพัพฟิงกล้วยกรอบที่ 2 นาที ดังนั้นเวลาในการพัพฟิงควรเป็นเวลาที่เหมาะสม ไม่สั้นหรือนานจนเกินไป และการวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงสี ดังรูปที่ 2 ค) จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงชันมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับงานวิจัยของ C. Raikham et al. [21] ที่พบว่าอุณหภูมิพัพฟิงสูงชันทำให้เกิดสีน้ำตาล เข้มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิพัพฟิงจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสีน้ำตาล ส่งผลให้ค่า  $\Delta E$  สูงชันอย่างมีนัยสำคัญ [8],[20] ส่วนเวลาในการลวกด้วยไมโครเวฟมีความไม่แน่นอนในการเปลี่ยนแปลงสี ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในการลวก ที่เวลาลวกด้วยไมโครเวฟ 2 นาที มีการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงาน [7],[8] รายงานว่าผลของเวลาในการลวกด้วยไมโครเวฟสามารถลดการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากไมโครเวฟช่วยลด polyphenol oxidase activity ได้ [8], [22]

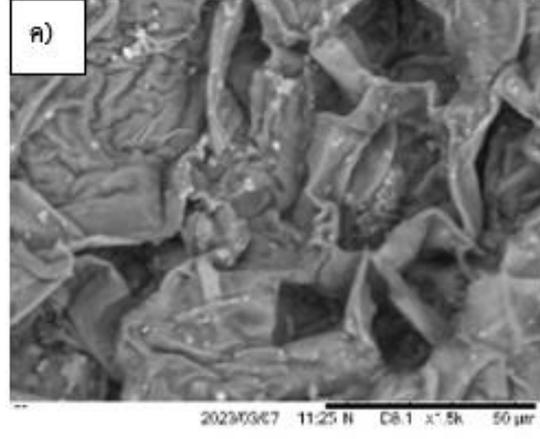
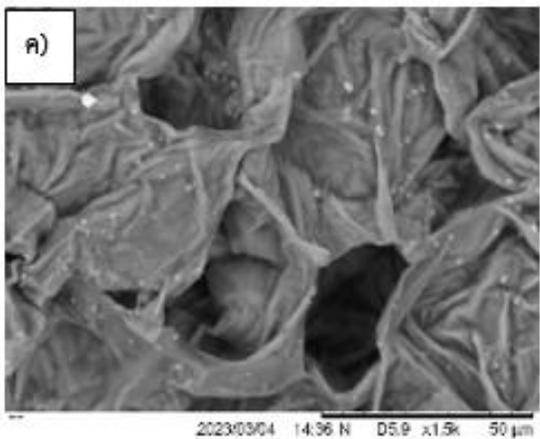
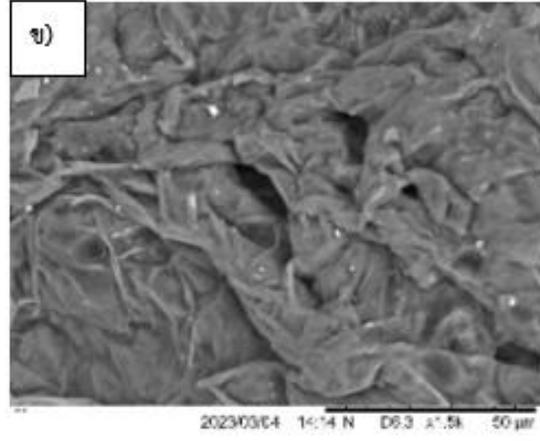
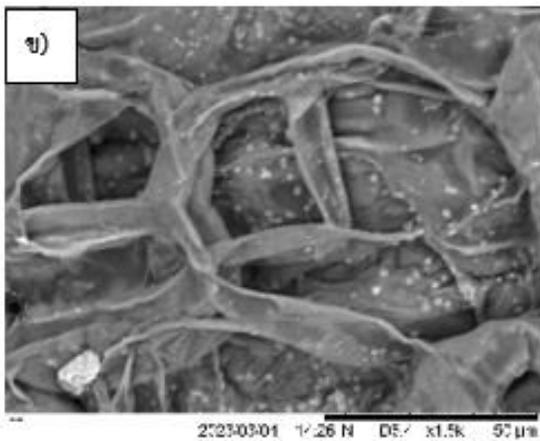
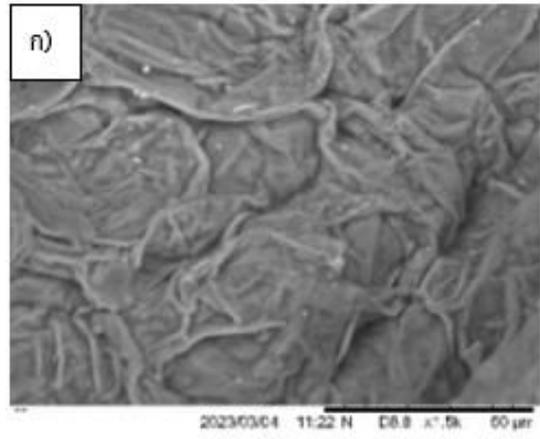
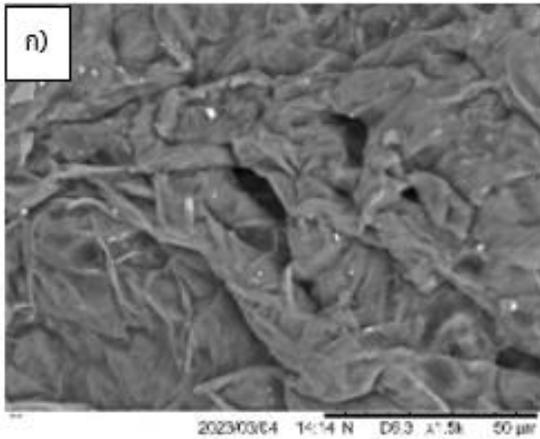
### 3.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง

เมื่อวิเคราะห์ภาพถ่ายจาก SEM โดยเลือกวิเคราะห์ที่การลวกด้วยไมโครเวฟ 2 นาที เนื่องจากเป็นสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยเปรียบเทียบอุณหภูมิและเวลาในการพัพฟิงที่สภาวะต่างๆ ดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ พบว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการพัพฟิงมากขึ้น จะทำให้เกิดการแตกร้าวจากเล็กน้อยจนขยายใหญ่ขึ้นเป็นรูพรุนกว้างมากขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการพัพฟิงด้วยอุณหภูมิสูง และเวลาที่มากขึ้น จะมีการถ่ายโอนพลังงานความร้อนมากขึ้น ส่งผลให้น้ำภายในผลิตภัณฑ์เกิดการเดือด ก่อให้เกิดความดันไอสูงชัน เป็นผลให้ขยายปริมาตรและเกิดรูพรุนบริเวณผิวผลิตภัณฑ์ [23], [24]



รูปที่ 1 ผลของเวลาลวกด้วยไมโครเวฟและเวลา พuffing ต่อคุณภาพแคร้รอตบแห้ง ก) ความชื้นสุดท้าย ข) ความแข็งเนื้อสัมผัส ค)  $\Delta E$

รูปที่ 2 ผลของอุณหภูมิพuffing และเวลาลวกด้วย ไมโครเวฟต่อคุณภาพแคร้รอตบแห้ง ก) ความชื้น สุดท้าย ข) ความแข็งเนื้อสัมผัส ค)  $\Delta E$



รูปที่ 3 ภาพถ่ายจาก SEM ของแอโรเจลที่เวลาในการลวกด้วยไมโครเวฟ 2 นาที และเวลาพิ้ง 1 นาที ก) อุณหภูมิพิ้ง 140 °C ข) อุณหภูมิพิ้ง 150 °C ค) อุณหภูมิพิ้ง 160 °C

รูปที่ 4 ภาพถ่ายจาก SEM ของแอโรเจลที่เวลาในการลวกด้วยไมโครเวฟ 2 นาที และอุณหภูมิพิ้ง ก) เวลาพิ้ง 1 นาที ข) เวลาพิ้ง 2 นาที ค) เวลาพิ้ง 3 นาที

#### 4. สรุป

จากผลการวิจัยเวลาในการพรีทรีตเมนต์โดยการลวกด้วยไมโครเวฟ อุณหภูมิพัฟฟิงและเวลาในการพัฟฟิงต่อคุณภาพของแครอทอบแห้ง พบว่าเวลาลวกด้วยไมโครเวฟ อุณหภูมิและเวลาพัฟฟิงมากขึ้น จะทำให้ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วและทำให้ความแข็งของเนื้อสัมผัสมีแนวโน้มลดลง แต่จะทำให้การเปลี่ยนแปลงสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และจากการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมของแครอทอบแห้งที่มีผลต่อคุณภาพได้ค่าความแตกต่างสีเท่ากับ 14.45 ความแข็งของเนื้อสัมผัส 8.29 N และมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10 มาตรฐานเปียกโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมในรูปแบบกำลังสอง มีค่านัยสำคัญ  $\alpha=0.05$  ค่า p-value มีความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.05$ ) โดยมีค่า  $R^2$  ได้แก่ 0.985 0.981 และ 0.911 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งคืออุณหภูมิพัฟฟิง 147.5 °C เวลาในการลวกด้วยไมโครเวฟ 2 นาที และเวลาพัฟฟิง 1.75 นาที

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอาหารและชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ รวมถึงเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. K.-Larsen, R. B. E-Houri, L. P. Christensen, I. A-Najami, X. Fretté, and G. Baatrup, "Dietary polyacetylenes, falcarinol and falcarindiol, isolated from carrots prevents the formation of neoplastic lesions in the colon of azoxymethane-induced rats," *Food & Function*, vol. 8, no. 3, pp. 964–974, Mar. 2017.
- [2] S. Purup, E. Larsen, and L. P. Christensen, "Differential Effects of Falcarinol and Related Aliphatic C17-Polyacetylenes on Intestinal Cell Proliferation," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 57, no. 18, pp. 8290–8296, Aug. 2009.
- [3] T. Pisut, P. Suwit, and T. Surapit, "Effects of ripening level and puffing temperature on qualities of puffed Homtong banana slices," *Creative Science (SNRU Journal of Science and Technology)*, vol. 10, no. 2, pp. 116-123, May–Aug. 2018.
- [4] D. Başkaya Sezer and A. Demirdöven, "The Effects of Microwave Blanching Conditions on Carrot Slices: Optimization and Comparison: Effects of Microwave Blanching on Carrot Slices," *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 39, no. 6, pp. 2188–2196, Dec. 2015.
- [5] N. Turkmen, E. S. Poyrazoglu, F. Sari, and Y. Sedat Velioglu, "Effects of cooking methods on chlorophylls, pheophytins and colour of selected green vegetables," *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 41, no. 3, pp. 281–288, Mar. 2006.
- [6] L. Katia, B. Ilaria, and E. Marco, "Effect of microwave power and blanching time in relation to different geometric shape of vegetables," *LWT- Food Science and Technology*, vol. 99, no. 6, pp. 497-504, 2019.

- [7] L. Peng, M. S. Arun, M. Zhang, and J. Hao, "Comparison of three blanching treatments on the color and anthocyanin level of the microwave assisted spouted bed drying of purple flesh sweet potato," *Drying Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 66-71, 2014.
- [8] T. Surapit, P. Suwit, and S. Somchart, "Effects of Microwave Blanching Time and Puffing Temperature on Drying Time and Qualities of Crisp Banana," *Journal of Food Technology, Siam University*, Vol. 16, no. 1, pp.144-153, 2021.
- [9] F. Salehi, M. Inanloodoghuz, and S. Ghazvineh, "Influence of microwave pretreatment on the total phenolics, antioxidant activity, moisture diffusivity, and rehydration rate of dried sweet cherry," *Food Science & Nutrition*, vol. 11, no. 12, pp. 7870–7876, Sep. 2023.
- [10] AOAC. Official Methods of Analysis of AOAC International, 17th ed., Rev.1, Gaithersburg, MD, USA. 2002.
- [11] D. C. Montgomery, *Introduction to Linear Regression Analysis*, 4th ed. Wiley & Sons, 2006.
- [12] J. Apaporn and J. Prayoon, "Mathematical Models Developing of Different Pattern of Dried Agricultural Products," *KKU Science Journal*, Vol. 47, no. 1, pp.144-153, Jan.-Mar. 2019.
- [13] S. Pongpon, N. Nukrob, and A. Rittichai, "Study of the optimum conditions for microwave drying of turmeric by response surface methodology," *Life Sciences and Environment Journal*, vol.14, no.2, pp 44-52, 2014.
- [14] N. C. Shilton, A. A. Bekhit, and K. Niranjana, "Optimisation of a Dehydration Process for Potato Cubes using an Intermediate Puffing Step," *Potato Research*, vol. 41, pp. 203–209, Sep.1998.
- [15] A. H. Manzoor, C. H. See, O. Martony, and M. Devi, "Effect of steam and microwave blanching against enzymatic browning of chilled saba banana (*Musa spp.*, BBB)," *Bulletin of Culinary Art and Hospitality*, vol. 4, no. 1, pp. 21–28, 2024.
- [16] C. Severini, R. Giuliani, A. D. Filippis, A. Derossi, and T. D. Pilli, "Influence of different blanching methods on colour, ascorbic acid and phenolics content of broccoli," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 53, no. 1, pp. 501–510, 2016.
- [17] T. V. L. Nguyen, T. Y. N. Tran, D. T. Lam, L. G. Bach, and D. C. Nguyen, "Effects of microwave blanching conditions on the quality of green asparagus (*Asparagus officinalis* L.) butt segment," *Food Science & Nutrition*, vol. 7, no. 11, pp. 3513–3519, 2019.
- [18] J. Thavorn, "Effect of Puffing Conditions on Quality of Crispy Banana," *Thaksin University Journal*, vol.20, no.3, pp. 141-148, 2017.
- [19] C. Raikham, S. Prachayawarakorn, A. Nathakarakakule, and S. Soponronnarit,

- "Optimum Conditions of Fluidized Bed Puffing for Producing Crispy Banana," *Drying Technology*, vol. 31, no. 6, pp. 726-739, Apr. 2013.
- [20] T. Surapit, P. Somkiat, and S. Somchart, "Optimum condition of producing crisp osmotic banana using superheated steam puffing," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 97, no. 4, pp. 1244-1251, Mar. 2017.
- [21] A. Nathakaranakule, S. Soponronnarit, and S. Prachayawarakorn, "Influences of pretreatments and drying process including fluidized bed puffing on quality attributes and microstructural changes of banana slices," *Drying Technology*, vol.33, no.8, pp. 915-925, 2015.
- [22] J. Prayoon, M. Dechawut, T. Bhuchiss, S. Prasit, L. Chainarong, J. Apaporn and K.Sirithon, "Effect of Sample Pretreatment and Drying Methods on Quality of Dates," *KKU Research Journal (Graduate Studies)*, Vol. 23 no. 4, pp.120-130, 2023.
- [23] R. Chonlada and R. Orawan, "Effect of Temperature and Puffing Time on the Qualities of Puffed Rice Produced by RD6 Glutinous Rice," *Journal of Science Ladkrabang*, vol. 27, no. 1, pp. 42-54, Jan.-Jun. 2018.
- [24] T. Surapit, "Effects of Hot Water Blanching and Puffing Temperature Level on Qualities of Namwa and Homtong-Banana Chips," *RMUTP Research Journal*, vol.17, no. 2, pp.1-14, Jul.-Dec. 2023.

# ผลของการทดแทนเนื้อมากุ้งด้วยผงจิ้งหรีดที่มีต่อคุณภาพทางกายภาพเคมี และประสาทสัมผัสของแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชัน (*Clitoria ternatea* L.)

วัชรีย์ เทพโยธิน\* อรทัย บุญทะวงค์ สุรพล ใจวงศ์ษา และ เกรียงศักดิ์ ลือชัย

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง  
200 หมู่ 17 ตำบลพิชัย อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 52000

รับบทความ 28 ตุลาคม 2567 แก้ไขบทความ 24 สิงหาคม 2568 ตอรับบทความ 10 กันยายน 2568

## บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาไส้เบอร์เกอร์หรือแพตตี้เบอร์เกอร์ด้วยโปรตีนทางเลือกจากผงจิ้งหรีดเพื่อทดแทนเนื้อมากุ้งที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวดอกอัญชันที่ใช้ข้าวเหนียวย้อมสีธรรมชาติด้วยสารสกัดดอกอัญชันแทนขนมปังสำหรับเบอร์เกอร์ โดยการนำข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ย้อมสีด้วยสารสกัดดอกอัญชันร้อยละ 2 นำไปนึ่งสุก ขึ้นรูปเป็นแผ่น ประกอบกับแพตตี้ทดแทนเนื้อมากุ้งด้วยผงจิ้งหรีด 3 ระดับ คือ ร้อยละ 30 60 และ 90 ของน้ำหนักเนื้อมากุ้ง พบว่า การทดแทนเนื้อมากุ้งด้วยผงจิ้งหรีดร้อยละ 60 ให้ผลดีที่สุด มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 17.12 ความชื้นร้อยละ 38.14 ค่าแอดอร์แอคทีวิตี ( $a_w$ ) 0.90 ความแข็ง 19.27 นิวตัน และพลังงาน 274.34 กิโลแคลอรีต่อ 150 กรัม แอนโทไซยานิน 0.36 ไมโครกรัมต่อกรัม มีปริมาณฟีนอลทั้งหมด 11.11 มิลลิกรัมกรดแกลลิกต่อ 100 มิลลิกรัม ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี DPPH ร้อยละ 37.56 และ ABTS ร้อยละ 5.31 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยคะแนนความชอบ โดยวิธี 9 point hedonic scale พบว่าผู้บริโภคมีความชอบมาก (คะแนน 8.50 - 8.67) บรรจุผลิตภัณฑ์ในถุง PET/PE ขนาด 150 กรัม จำหน่ายในราคา 35 บาทต่อชิ้น ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคร้อยละ 94 และตัดสินใจซื้อร้อยละ 88 ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารรูปแบบใหม่ที่มีคุณค่าทางโภชนาการ และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

คำสำคัญ : ผงจิ้งหรีด; เบอร์เกอร์ข้าวเหนียว; สารสกัดดอกอัญชัน; แอนโทไซยานิน; โปรตีนทางเลือก

# Effects of Chicken Breast Replacement with Cricket Powder on Physical, Chemical, and Sensory Quality of Sticky Rice Patty Burger dyed with Butterfly Pea Flower (*Clitoria ternatea* L.)

Watcharee Thepyothin\* Orathai Bunthawong Suraphon Chaiwongsar and Kriangsuk Luechai

Faculty of Science and Agriculture Technology Rajamangala University of Technology Lanna Lampang  
200 Moo 17, Pichai, Mueang, Lampang, 52000

---

Received 28 October 2024; Revised 24 August 2025; Accepted 10 September 2025

## Abstract

This study aimed to develop burger patties made from cricket powder as an alternative protein source to replace chicken breast in butterfly pea flower sticky rice burgers, which use naturally dyed sticky rice with butterfly pea flower extract instead of bread. The experiment employed RD 6 sticky rice that had been dyed with 2% extract from butterfly pea flowers. It was steamed, shaped into burger buns, and paired with patties that replaced chicken breast with cricket powder at three different levels: 30%, 60%, and 90% of the weight of chicken breast. It was found that replacing chicken breast with 60% cricket powder yielded the best results. This patty had a protein content of 17.12%, a moisture content of 38.14%, a water activity (aw) of 0.90, a hardness of 19.27 Newtons, and an energy content of 274.34 kilocalories per 150 grams. It contained 0.36 micrograms of anthocyanins per gram, 11.11 milligrams of phenolic compounds (based on gallic acid) per 100 milliliters, and showed 37.56% antioxidant activity in DPPH tests and 5.31% in ABTS tests. Sensory quality evaluation using a 9-point hedonic scale showed high consumer preference (scores of 8.50 - 8.67). The product, packaged in 150-gram PET/PE bags and sold at 35 baht each, received 94% consumer acceptance and 88% purchase intent. This study demonstrates the potential to develop a new food product with nutritional value that is popular among consumers.

**Keywords :** Cricket powder; Sticky rice burger; Butterfly pea extract; Anthocyanins; Alternative protein

---

\* Corresponding Author. Tel.: +668 1472 3916, E-mail Address: [tapyotin@rmutl.ac.th](mailto:tapyotin@rmutl.ac.th)

## 1. บทนำ

ความต้องการแหล่งโปรตีนทางเลือกที่มีความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากจำนวนประชากรโลกจะขยายเข้าสู่ 9.7 พันล้านคน ภายในปี 2050 ผลิตภัณฑ์ประเภทเบอร์เกอร์จากพืชหรือแมลงจึงได้รับความสนใจในงานวิจัยและอุตสาหกรรมอาหาร [1]-[3] แพตตีเบอร์เกอร์ที่ปรับสูตรโดยผสมโปรตีนผงแมลง (*insect protein powder*) และแป้งอื่นๆ ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้ใกล้เคียงทั้งด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการกับเบอร์เกอร์เนื้อสัตว์ [1], [4], [5]

ข้าวเหนียวจัดเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ได้รับความนิยมในอาหารไทยและมีคุณสมบัติในการจับตัวดี จึงเหมาะสำหรับใช้เป็น “ฐาน” ในการทำแพตตี ซึ่งให้เนื้อสัมผัสนุ่มและเหนียวพอดี การเสริมโปรตีนจากแมลง เช่น ผงจิ้งหรีด (*Acheta domesticus*) หรือหนอนกะล่อน (*Tenebrio molitor*), ร่วมกับวัตถุดิบเพื่อสุขภาพ เช่น ถั่วเหลืองหรือเห็ด สามารถยกระดับคุณค่าทางโภชนาการได้ [1], [6] นอกจากนี้ การย้อมสีข้าวเหนียวด้วยสารสกัดจากดอกอัญชัน (*Clitoria tematea*) ยังช่วยเพิ่มความสวยงามและคุณค่าทางสุขภาพให้กับผลิตภัณฑ์ โดยสารแอนโทไซยานินในดอกอัญชันมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระและทนต่อความร้อน จึงเหมาะกับการแปรรูปในรูปแบบอาหารพร้อมรับประทาน [7], [8]

จิ้งหรีดสายพันธุ์ *Acheta domesticus* เป็นหนึ่งในแมลงกินได้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง และได้รับการส่งเสริมให้เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกในอนาคต โดยสามารถให้โปรตีนสูงถึงร้อยละ 46.76–70.00 ของน้ำหนักแห้ง [9] นอกจากนี้ยังอุดมด้วยกรดอะมิโนจำเป็นครบถ้วน มีกรดไขมันโอเมกา-3 และแร่ธาตุ เช่น ธาตุเหล็กและสังกะสี ในปริมาณที่สูงกว่าเนื้อวัวหรือเนื้อไก่ในปริมาณที่เท่ากัน [10] โดยจิ้งหรีด 100 กรัม ให้โปรตีนประมาณ 63 กรัม พลังงาน 447 กิโลแคลอรี โอเมกา-3 ประมาณ 0.25 กรัม และธาตุเหล็กประมาณ

5.0 มิลลิกรัม ขณะที่เนื้อวัวและเนื้อไก่ให้โปรตีนน้อยกว่าและมีปริมาณธาตุเหล็กต่ำกว่าตามลำดับ [11]

นอกจากนี้ การเพาะเลี้ยงจิ้งหรีดยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการเลี้ยงปศุสัตว์ โดยสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากถึง 100 เท่าเมื่อเทียบกับการผลิตเนื้อสัตว์จากวัวหรือสุกร [12] ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว ทำให้จิ้งหรีดได้รับความสนใจในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในผลิตภัณฑ์อาหารประเภทโปรตีนสูง รวมถึงผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ทางเลือก เช่น แพตตีเบอร์เกอร์จากพืชหรือจากแหล่งโปรตีนทางเลือก [13]

การศึกษาการเติมผงแมลงในเบอร์เกอร์ถั่วเหลืองร้อยละ 5 มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น pH สี และไขมันเล็กน้อย โดยไม่มีผลเสียต่อปริมาณโปรตีนหรือผลผลิตหลังปรุงสุก [1], [2] นอกจากนี้ การปรับสมดุลระหว่างส่วนผสมยังช่วยให้เนื้อเบอร์เกอร์มีความยอมรับทางประสาทสัมผัสสูง โดยเฉพาะรสชาติและเนื้อสัมผัสที่ใกล้เคียงเบอร์เกอร์เนื้อ [2], [3], [6] การผสมผงจิ้งหรีด (*cricket powder*) ลงในเนื้อแพตตีช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเมื่อเทียบกับเนื้อแดง [14], [15] งานทดลองในระดับอุตสาหกรรม เช่น การพัฒนา *Cricket One* และ *Ento* พบว่าแป้งจิ้งหรีดช่วยให้เนื้อแพตตีมีรสชาติ สี และเนื้อสัมผัสใกล้เคียงเบอร์เกอร์เนื้อ โดยผู้บริโภคริโกลาตเอเชีย “ไม่สามารถแยกความแตกต่างจากเนื้อวัวได้” [16], [17] แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดด้านทัศนคติของผู้บริโภคที่ไม่เคยบริโภคแมลงอาจจะไม่คุ้นเคยกับสีและกลิ่นของจิ้งหรีด และมีความกลัวแมลง ผู้ผลิตจึงจำเป็นต้องสร้างความมั่นใจให้กับผู้บริโภคว่าผลิตภัณฑ์จากแมลงมีคุณภาพ ประโยชน์ สะอาด ปลอดภัย และมีรสชาติดี [18] ในด้านแนวโน้มตลาด ผู้บริโภคในปัจจุบันให้ความสนใจกับผลิตภัณฑ์อาหารทางเลือกที่มีความสะดวกในการบริโภค มีคุณค่าทางโภชนาการสูง และใช้วัตถุดิบธรรมชาติ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ประเภท “เบอร์เกอร์ข้าวเหนียว” ที่เริ่มมีการวางจำหน่ายใน ตลาดเอเชีย เช่น ญี่ปุ่นและเกาหลีใต้ ซึ่งได้รับการตอบ

รับที่ดีจากกลุ่มผู้บริโภควัยทำงาน [19] ข้อมูลจาก Euromonitor (2023) ระบุว่าตลาดอาหารพร้อมรับประทานในประเทศไทยมีอัตราเติบโตเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 6 ต่อปี และมีแนวโน้มเติบโตต่อเนื่องในกลุ่มสินค้าโปรตีนทางเลือกและอาหารยั่งยืน [20] ดังนั้นการนำจิ้งหรีดมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารจึงควรพิจารณาถึงความเข้ากันได้ของผลิตภัณฑ์และการยอมรับของผู้บริโภคเป็นสำคัญ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนาแพตตี้ที่มีส่วนผสมของผงจิ้งหรีดและเบอร์เกอร์ที่ทำจากข้าวเหนียว ซึ่งให้ลักษณะเนื้อสัมผัสเฉพาะตัว โดยให้ความสำคัญกับการประเมินคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี โภชนาการ และความยอมรับทางประสาทสัมผัส เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์โปรตีนทางเลือกที่ตอบโจทย์ทั้งด้านโภชนาการ ความยั่งยืน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเหมาะกับผู้บริโภคชาวไทย

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 วัตถุดิบ

ผงจิ้งหรีดพันธุ์ทองแดงลาย หรือ จิ้งหรีดขาว และดอกอัญชันอบแห้ง จากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนต้นน้ำวัง อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดลำปาง เนื้ออกไก่ จากร้านหมูอินเตอร์ และหอมหัวใหญ่ ตลาดต้นยาง อำเภอมะนัง จังหวัดลำปาง น้ำมันรำข้าว ตราคิง เกลือปน ตราปรุngthipy พริกไทยและเม็ดผักชี ตราไร่ทิพย์ น้ำตาลทราย ตรามิตรผล ผงปรุงรส ตราคนอร์

### 2.2 การเตรียมเบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสี สารสกัดดอกอัญชัน และแพตตี้ทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีด

การเตรียมเบอร์เกอร์ข้าวเหนียว โดยนำข้าวเหนียวพันธุ์ กข. 6 ล้างน้ำ 3 รอบ แช่ข้าวในน้ำสกัดดอกอัญชันแห้งร้อยละ 2 นาน 12 ชั่วโมง นึ่งสุก นาน 45 นาที ทำให้เย็น ชั่งน้ำหนักข้าวเหนียวก่อนละ 50 กรัม กดลงพิมพ์ทรงกลมสูง 1 เซนติเมตร

การเตรียมสูตรพื้นฐานแพตตี้หรือสูตรควบคุม จากศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ปศุสัตว์เชียงใหม่ [21] จากนั้นทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีดจำนวน 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 30 60 และ 90 ของน้ำหนักเนื้ออกไก่ (ตารางที่ 1) บดส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกัน ชั่งน้ำหนักแพตตี้ก่อนละ 50 กรัม กดลงพิมพ์ทรงกลมสูง 1 เซนติเมตร ทำให้สุกด้วยการอบในเตาไมโครเวฟ ด้านละ 1 นาที นำแพตตี้มาประกบกับเบอร์เกอร์ข้าวเหนียว บรรจุในถุงพลาสติกแบบประกบ 2 ชั้น คือ การประกอบชั้นของ PET/PE (Polypropylene Terephthalate/Polyethylene) หน้าใสหลังขาว ขนาด 11x15 เซนติเมตร ปิดผนึก ดังภาพที่ 1 ทำการแช่แข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส จนกระทั่งนำไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพเคมี และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ตามวิธีข้อ 2.3 และคืนรูปด้วยไมโครเวฟก่อนการบริโภค

ตารางที่ 1 ปริมาณส่วนผสมของสูตรแพตตี้ทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีด

ส่วนผสม	น้ำหนักส่วนผสม (ร้อยละ)			
	สูตรควบคุม	สูตร A	สูตร B	สูตร C
เนื้ออกไก่	86.52	60.56	34.61	8.65
ผงจิ้งหรีด	0	25.96	51.91	77.87
น้ำเปล่า	4.74	4.74	4.74	4.74
หอมหัวใหญ่	4.30	4.30	4.30	4.30
น้ำมันรำข้าว	2.15	2.15	2.15	2.15
เกลือปน	1.08	1.08	1.08	1.08
พริกไทย	0.43	0.43	0.43	0.43
เม็ดผักชี	0.43	0.43	0.43	0.43
น้ำตาลทราย	0.26	0.26	0.26	0.26
ผงปรุงรส	0.09	0.09	0.09	0.09

หมายเหตุ น้ำหนักส่วนผสมคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักทั้งหมด; สูตร A ทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีดร้อยละ 30 สูตร B ทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีดร้อยละ 60 สูตร C ทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีดร้อยละ 90



ภาพที่ 1 ลักษณะของการประกบแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีด และบรรจุในถุงประกบ 2 ชั้น (PET/PE)

## 2.3 การวิเคราะห์คุณภาพของแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีด

### 2.3.1 การวิเคราะห์ทางกายภาพ

วิเคราะห์ค่าสีของเบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชัน และแพตตี้ทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีด (วัดค่า 3 ค่า) ระบบ CIE L\* a\* และ b\* ด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter) รุ่น Ultrar Scan PRO ยี่ห้อ Hunter Lab ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 โดยค่าความสว่าง (L\*) มีค่า 0-100 โดย 0 หมายถึงวัตถุสีเข้ม, 100 หมายถึง วัตถุมีสีอ่อน ค่าสี a\* คือวัตถุสีแดง (+) วัตถุสีเขียว (-) และค่าสี b\* คือ วัตถุสีเหลือง (+) วัตถุน้ำเงิน (-) เพื่อเปรียบเทียบสีของแพตตี้ทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีดแต่ละสูตร

วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของแพตตี้ทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีด ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) รุ่น TA-XT Plus ยี่ห้อ stable Micro System, USA วัดโดยใช้โปรแกรม Texture profile Analysis (TPA) วัดค่าความแข็ง (Hardness) ค่าการเกาะติด (Cohesiveness) และค่าความทนทานการเคี้ยว (Chewiness) ทำการทดสอบค่าละ 5 ซ้ำ ด้วยหัววัด Cylinder p/36 ด้วยแรงกด 20 กรัม ความเร็วก่อนทดสอบ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วหลังการทดสอบ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที และความเร็วระหว่างการทดสอบ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที

[22] (วัดค่า 10 ซ้ำ) หาค่าเฉลี่ยของแรงกดสูงสุดที่ได้เพื่อเปรียบเทียบลักษณะเนื้อสัมผัสของแพตตี้ทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีดแต่ละสูตร

### 2.3.2 การวิเคราะห์ทางเคมี

1. ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ( $a_w$ ) ด้วยเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี รุ่น GBX: FA-st/1 ประเทศฝรั่งเศส นำตัวอย่างแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีดแต่ละสูตรบรรจุไม่น้อยกว่าครึ่งลงในภาชนะใส่ตัวอย่าง และนำตัวอย่างลงในช่องใส่ตัวอย่าง ปิดฝาครอบ กดปุ่มอ่านเครื่องหมุน เพื่ออ่านค่า รอกระทั่งเครื่องทำงานเสร็จจะมีเสียงเตือน จากนั้นจดบันทึกค่าที่ได้ (จำนวน 5 ซ้ำ) เพื่อเปรียบเทียบค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ( $a_w$ ) แต่ละสูตร

2. ปริมาณความชื้น ด้วยการชั่งตัวอย่างแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีด 5 กรัม ใส่ในกระป๋องอลูมิเนียมที่อบและชั่งน้ำหนักไว้แล้ว นำไปอบในตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมัน ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง กระทั่งน้ำหนักคงที่ (ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งสองครั้งติดต่อกันไม่เกินร้อยละ 0.1) นำไปคำนวณหาปริมาณความชื้น (จำนวน 5 ซ้ำ) [23] ดังสมการ

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (5 กรัม)}} \times 100$$

### 2.3.3 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

นำแพตตี้เบอร์เกอร์ย้อมสีดอกอัญชันทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีด ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-point Hedonic Scale) ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นของผงจิ้งหรีด รสชาติคือรวมรสหวาน เค็ม และอูมามิ เนื้อสัมผัสคือความนุ่ม และความชอบโดยรวม [24] ให้คะแนน 1-9 โดย 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และ 9

หมายถึง ชอบมากที่สุด โดยผู้ทดสอบจะทดสอบตัวอย่างทีละ 1 ตัวอย่าง ระหว่างการทดสอบให้ผู้ทดสอบดื่มน้ำล้างปาก ก่อนการทดสอบตัวอย่างถัดไป ใช้ผู้ทดสอบทั่วไป จำนวน 50 คน มีอายุอยู่ในช่วง 20-45 ปี [25]

## 2.4 การวิเคราะห์ค่าคุณภาพของแพตตีเบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันทดแทนเนื้อมันจากไข่แดงจิ้งหรีด

นำแพตตีเบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันทดแทนเนื้อมันจากไข่แดงจิ้งหรีดร้อยละ 60 (สูตร B) ที่ผ่านการคัดเลือก วิเคราะห์คุณภาพดังต่อไปนี้

1. วิเคราะห์ปริมาณความชื้น [23]
2. วิเคราะห์หาปริมาณเถ้า [23]
3. วิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ด้วยเครื่องวิเคราะห์โปรตีนแบบอัตโนมัติ ยี่ห้อ Gerhardt KB8S ประเทศเยอรมนี
4. วิเคราะห์ปริมาณไขมัน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ไขมันแบบอัตโนมัติ ยี่ห้อ Gerhardt S306 AK ประเทศเยอรมนี
5. วิเคราะห์หาเส้นใย ด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบอัตโนมัติ ยี่ห้อ Gerhardt FT12 ประเทศเยอรมนี
6. การคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรต
7. การคำนวณปริมาณพลังงาน
8. วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด โดยวิธี Folin-Ciocalteu colorimetric assays [26]
9. วิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานิน [27]
10. วิเคราะห์ค่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant activity) โดยวิธี DPPH ใช้หลักการวิเคราะห์เทียบกับอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS [28], [29]

## 2.5 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แพตตีเบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันทดแทนเนื้อมันจากไข่แดงจิ้งหรีด ด้านคุณภาพทางกายภาพเคมี วางแผนการทดลองแบบ Complete Randomized Design, (CRD) [30] และการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design, (RCBD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ย และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $P \leq 0.05$ )

## 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการวัดค่าสีของแพตตีเบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันที่ระดับสารสกัดร้อยละ 2 (ตารางที่ 2) พบว่า ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) เท่ากับ 24.58 ซึ่งจัดอยู่ในช่วงค่าต่ำ บ่งชี้ถึงลักษณะสีเข้มคล้ำของผลิตภัณฑ์ อันเป็นผลจากแอนโทไซยานินชนิด *tematin* ที่มีอยู่ในดอกอัญชัน (*Clitoria ternatea* L.) ซึ่งให้เฉดสีฟ้าถึงน้ำเงินในสถานะที่เป็นกลางถึงเบสอ่อน [27], [31] ค่า  $a^*$  เฉลี่ยที่  $-3.98$  และ  $b^*$  เฉลี่ยที่  $-8.88$  ยังแสดงลักษณะโทนสีเขียวและน้ำเงิน สอดคล้องกับรายงานของ Kungsuwan., et al. [32] ที่พบว่าสารสกัดจากดอกอัญชันให้สีฟ้าหรือเขียวอ่อนในค่าพีเอชดังกล่าว ลักษณะสีเหล่านี้แม้จะผิดไปจากผลิตภัณฑ์เบอร์เกอร์ทั่วไป แต่กลับมีความน่าสนใจในกลุ่มผลิตภัณฑ์ทางเลือกหรือกลุ่ม "plant-based" ซึ่งเน้นความเป็นธรรมชาติ และใช้สีจากพืชอย่างปลอดภัย โดยงานของ Yang et al. [33] และ Choo et al. [34] ยืนยันว่าค่าสี  $L^*$  ต่ำ และ  $b^*$  เป็นลบในผลิตภัณฑ์ที่มีแอนโทไซยานินนั้นไม่ส่งผลเสียต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัส หากยังคงไว้ซึ่งรสชาติและเนื้อสัมผัสที่ดี

ผลการวิเคราะห์ค่าสีของแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวทั้ง 4 สูตร (ตารางที่ 3) พบว่า ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) โดยสูตรควบคุมซึ่งไม่มีการเติมผงจิ้งหรีดมีความสว่างสูงที่สุด (72.09) ขณะที่สูตร C ซึ่งมีการทดแทนเนื้อออกไปด้วยผงจิ้งหรีดในระดับสูงสุด มีความสว่างต่ำที่สุด (31.73) แสดงให้เห็นว่าการเติมผงจิ้งหรีดส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีเข้มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Osimani et al. [35] และ Sogari et al. [36] ที่รายงานว่าผงโปรตีนจากแมลงมีแนวโน้มทำให้สีผลิตภัณฑ์เข้มขึ้น เนื่องจากมีเม็ดสีจากสารฮีมิลินท์และเมลานินในตัวแมลง ความเป็นสีแดง ( $a^*$ ) มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยสูตรที่มีผงจิ้งหรีดให้ค่า  $a^*$  สูงกว่า แสดงถึงเฉดสีแดงเด่นชัดมากขึ้น ในขณะที่ค่าความเป็นสีเหลือง ( $b^*$ ) มีค่าลดลงอย่างชัดเจน ตามปริมาณผงจิ้งหรีดที่เพิ่มขึ้น สะท้อนถึงผลของการทดแทนต่อโทนสีโดยรวม ซึ่งผลนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zielińska et al. [37] ที่ชี้ว่าการใช้ผงแมลงในผลิตภัณฑ์อาหารสามารถเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างและค่าสีระบบ CIE LAB อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์โปรตีนสูงที่ผ่านการแปรรูป

ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ ( $a_w$ ) ของแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันที่ทดแทนเนื้อออกไปด้วยผงจิ้งหรีดทั้ง 4 สูตร (ตารางที่ 4) พบว่า สูตรควบคุมมีปริมาณความชื้นสูงที่สุดร้อยละ 43.96 และค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้สูงสุด 0.95 ขณะที่สูตร C ซึ่งมีการทดแทนเนื้อออกไปด้วยผงจิ้งหรีดในระดับสูงสุด มีปริมาณความชื้นและค่า  $a_w$  น้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) โดยมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 37.25 และ 0.88 ตามลำดับ ทั้งนี้การลดลงของปริมาณความชื้นอาจสัมพันธ์กับคุณสมบัติในการดูดซับน้ำของผงจิ้งหรีดที่ต่ำกว่าเนื้อออกไป ส่งผลให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์เก็บน้ำไว้ได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Zielińska et al. [37] และ Bawa et al. [38] ที่ชี้ว่าการใช้ผงแมลงสามารถลดค่าความชื้นและค่า  $a_w$  ใน

ผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ จากลักษณะโครงสร้างโปรตีนและเส้นใยที่แตกต่างกัน สำหรับค่า  $a_w$  ที่อยู่ในช่วง 0.88–0.95 นั้น ยังถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ที่ปรุงสุกและเก็บในภาชนะปิดสนิท ซึ่งค่าที่เหมาะสมต่อการชะลอการเจริญของจุลินทรีย์และการเสื่อมคุณภาพทางเคมีมักอยู่ในช่วง 0.60–0.90 [35] โดยสูตร C ที่มีค่า  $a_w$  ต่ำที่สุด จึงมีแนวโน้มว่าผลิตภัณฑ์จะมีอายุการเก็บรักษาได้นานกว่าสูตรอื่น

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าสีของเบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันร้อยละ 2

ค่าสี	เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชัน
$L^*$	24.58±2.21
$a^*$	-3.98±0.62
$b^*$	-8.88±0.74

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าสีของแพตตี้ทดแทนเนื้อออกไปด้วยผงจิ้งหรีด

สูตรแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียว	ค่าสี		
	$L^*$	$a^*$	$b^*$
สูตรควบคุม	72.09±0.69 <sup>a</sup>	2.53±0.21 <sup>b</sup>	18.01±0.23 <sup>a</sup>
สูตร A	45.17±0.95 <sup>b</sup>	4.88±0.11 <sup>a</sup>	13.99±0.42 <sup>b</sup>
สูตร B	35.35±0.73 <sup>c</sup>	5.00±0.16 <sup>a</sup>	11.82±0.61 <sup>c</sup>
สูตร C	31.73±0.30 <sup>d</sup>	5.25±0.30 <sup>a</sup>	10.47±0.65 <sup>d</sup>

หมายเหตุ: a, b, c และ d ในแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ ( $a_w$ ) ของผลิตภัณฑ์แพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันเสริมเนื้อออกไปด้วยผงจิ้งหรีด

สูตรแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียว	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ ( $a_w$ )
สูตรควบคุม	43.96±1.58 <sup>a</sup>	0.95±0.00 <sup>a</sup>
สูตร A	39.21±1.13 <sup>b</sup>	0.91±0.00 <sup>b</sup>
สูตร B	38.14±0.89 <sup>b</sup>	0.90±0.13 <sup>b</sup>
สูตร C	37.25±1.62 <sup>b</sup>	0.88±0.02 <sup>b</sup>

หมายเหตุ: a และ b ในแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

ผลการวัดค่าเนื้อสัมผัสของแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีด ทั้ง 4 สูตร (ตารางที่ 5) พบว่า ค่าความแข็ง (Hardness) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) โดยสูตร A มีค่าความแข็งสูงสุด (23.80 N) ขณะที่สูตร C มีค่าต่ำที่สุด (13.53 N) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณผงจิ้งหรีดที่ใช้ทดแทนมีผลต่อโครงสร้างและค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ และมีผลต่อค่าการเกาะติด (Cohesiveness) และค่าความหนานทานการเคี้ยว (Chewiness) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยสูตร A ซึ่งมีการทดแทนผงจิ้งหรีดในปริมาณน้อยที่สุด มีค่าความหนานทานการเคี้ยวสูงที่สุด (7.09 N) สะท้อนถึงความสมดุลของโครงสร้างภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่งผลต่อประสบการณ์การเคี้ยวของผู้บริโภค ทั้งนี้ ลักษณะเนื้อสัมผัสดังกล่าวได้รับอิทธิพลจากองค์ประกอบของโปรตีนในจิ้งหรีดที่สามารถสร้างโครงสร้างเจลร่วมกับโปรตีนจากเนื้ออกไก่และข้าวเหนียวได้ดีในบางระดับของการทดแทน [39], [40] โดยค่าความแข็งและค่าความหนานทานการเคี้ยวที่เหมาะสมมักมีบทบาทสำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภคในผลิตภัณฑ์จำพวกเบอร์เกอร์ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Joo and Jung. [41] ที่ระบุว่าค่าความแข็งที่สูงเกินไปหรือต่ำเกินไปอาจลดความพึงพอใจของผู้บริโภคได้

จากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชัน

ทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีดทั้ง 4 สูตร (ตารางที่ 6) โดยใช้แบบประเมิน 9-point Hedonic Scale ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส (ความนุ่ม) และความชอบโดยรวม พบว่าสูตร B ได้รับคะแนนความชอบเฉลี่ยของคุณลักษณะที่ทดสอบสูงที่สุด ( $P \leq 0.05$ ) รองลงมาคือสูตร A และสูตรควบคุมตามลำดับ ส่วนสูตร C ที่มีสัดส่วนผงจิ้งหรีดสูงสุดได้รับคะแนนต่ำที่สุดในทุกคุณลักษณะที่ทดสอบ โดยเฉพาะในด้านกลิ่นและลักษณะปรากฏ ซึ่งมีค่าคะแนนเฉลี่ยต่ำกว่าสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

ผลลัพธ์ดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่าการทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีดในระดับที่เหมาะสม (สูตร B) เป็นที่ยอมรับได้ทางประสาทสัมผัส และอาจช่วยเพิ่มมูลค่าโภชนาการได้โดยไม่ลดความพึงพอใจของผู้บริโภคกลับกัน สูตรที่มีปริมาณผงจิ้งหรีดสูงเกินไป (สูตร C) ส่งผลให้กลิ่นและสีของผลิตภัณฑ์มีลักษณะที่ไม่เป็นที่ยอมรับ เช่น กลิ่นเฉพาะของแมลงหรือสีที่เข้มจนผิดธรรมชาติ ซึ่งตรงกับรายงานของ Megido et al. [42] ที่พบว่าแมลงที่มีปริมาณสูงในผลิตภัณฑ์อาจลดคะแนนความชอบหากไม่มีการควบคุมกลิ่นเฉพาะอย่างเหมาะสม ขณะเดียวกัน งานของ Nam et al. [43] และ Kyriakopoulou et al. [44] สนับสนุนว่าการใช้แมลงในระดับปานกลางสามารถรักษาเนื้อสัมผัสและรสชาติที่ดีไว้ได้ และเป็นระดับที่ผู้บริโภคทั่วไปยอมรับได้ โดยเฉพาะกลุ่มที่มีแนวโน้มเปิดรับนวัตกรรมอาหารสูง

ตารางที่ 5 ผลการตรวจวัดค่าเนื้อสัมผัสของแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีด

สูตรแพตตี้เบอร์เกอร์	ค่าเนื้อสัมผัส			
	ข้าวเหนียว	Hardness (N)	Cohesiveness (N)	Chewiness (N)
สูตรควบคุม		18.012±5.63 <sup>b</sup>	0.39±0.08 <sup>ab</sup>	4.33±1.40 <sup>b</sup>
สูตร A		23.80±3.87 <sup>a</sup>	0.46±0.14 <sup>a</sup>	7.09±2.23 <sup>a</sup>
สูตร B		19.24±1.35 <sup>b</sup>	0.44±0.12 <sup>ab</sup>	4.99±1.54 <sup>b</sup>
สูตร C		13.53±3.02 <sup>c</sup>	0.32±0.09 <sup>b</sup>	2.48±0.07 <sup>c</sup>

หมายเหตุ: a, b และ c ในแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

ตารางที่ 6 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์แพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีด

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	สูตรแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียว			
	สูตรควบคุม	สูตร A	สูตร B	สูตร C
ลักษณะปรากฏ	7.83±0.38 <sup>b</sup>	7.83±0.38 <sup>b</sup>	8.67±0.78 <sup>a</sup>	5.67±0.76 <sup>c</sup>
สี	7.00±0.00 <sup>c</sup>	7.83±0.38 <sup>b</sup>	8.67±0.48 <sup>a</sup>	5.67±0.76 <sup>d</sup>
กลิ่น	7.33±0.48 <sup>c</sup>	8.00±0.00 <sup>b</sup>	8.50±0.78 <sup>a</sup>	5.67±1.12 <sup>d</sup>
รสชาติ	7.83±0.38 <sup>b</sup>	8.33±0.76 <sup>a</sup>	8.67±0.48 <sup>a</sup>	5.67±0.76 <sup>c</sup>
ความนุ่ม	6.33±0.48 <sup>b</sup>	8.17±0.91 <sup>a</sup>	8.50±0.78 <sup>a</sup>	4.83±0.91 <sup>c</sup>
ความชอบโดยรวม	7.33±0.48 <sup>c</sup>	7.83±0.38 <sup>b</sup>	8.67±0.48 <sup>a</sup>	5.17±0.38 <sup>d</sup>

หมายเหตุ: a, b, c และ d ในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพของแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีดสูตร B พบว่า มีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ที่ 35.35 ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม และค่า  $a^*$ ,  $b^*$  ที่ 5.00 และ 11.82 ตามลำดับสะท้อนถึงเม็ดสีน้ำตาลแดงอ่อนที่เกิดจากการผสมของข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันและผงจิ้งหรีด ซึ่งมีเม็ดสีเมลานินและพอลิฟินอลที่อาจมีผลต่อสี [35] ด้านเนื้อสัมผัส พบว่าค่าความแข็ง (Hardness) อยู่ที่ 19.23 N, ค่าการเกาะติด (Cohesiveness) 0.44 และค่าความทนทานการเคี้ยว (Chewiness) 4.99 N แสดงถึงโครงสร้างที่สามารถยึดเกาะกันได้ดี และมีลักษณะเหนียวพอดี ไม่แห้งแข็งจนเกินไป [45] ปริมาณโปรตีนของสูตร B เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12.68 เป็น 17.12 เป็นผลโดยตรงจากการทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีดซึ่งมีปริมาณโปรตีนสูง เช่นเดียวกับพลังงานที่เพิ่มขึ้นเป็น 252.90 กิโลแคลอรี จากเดิม 226.75 กิโลแคลอรี ปริมาณความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 38.14 และค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ( $a_w$ ) ต่ำกว่า 0.90 (ตารางที่ 4) แสดงให้เห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มจะมีอายุการเก็บรักษาได้นานเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์เกิดการเจริญได้ช้า [46] ขณะที่ปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 17.12 ถือเป็นข้อได้เปรียบหลักจากการเติมผงจิ้งหรีด ซึ่งเป็นแหล่ง

โปรตีนสมบูรณ์ [47] และมีไขมันเพียงร้อยละ 1.46 ทำให้เหมาะสำหรับผู้บริโภคที่ควบคุมไขมันหรือกำลังมองหาโปรตีนทางเลือก ส่วนคาร์โบไฮเดรตอยู่ที่ร้อยละ 48.20 ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการใช้ข้าวเหนียวเป็นวัตถุดิบหลักด้านโครงสร้าง สำหรับปริมาณสารประกอบฟีนอลิก 11.11 mg GAE/100 ml แอนโทไซยานิน 0.36  $\mu\text{g/g}$  และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH ร้อยละ 37.56 และ ABTS ร้อยละ 5.31 แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติด้านการต้านอนุมูลอิสระได้จากสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในดอกอัญชัน [48] ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์สูตร B จัดเป็นอาหารเพื่อสุขภาพและเป็นผลิตภัณฑ์โปรตีนทางเลือกที่เน้นคุณค่าทางโภชนาการความปลอดภัย และความเป็นธรรมชาติ

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพเคมีของแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชันทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีดร้อยละ 60 (สูตร B)

คุณภาพทางกายภาพ	ตัวอย่างควบคุม	แพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียว
การวิเคราะห์สี		
$L^*$	72.09±0.69	35.35±0.73
$a^*$	2.53±0.21	5.00±0.16
$b^*$	18.01±0.23	11.82±0.61
ความแข็ง (N.)	18.01±5.63	19.23±1.35

คุณภาพทางกายภาพ	ตัวอย่าง	แพตตี้เบอร์เกอร์
	ควบคุม	ข้าวเหนียว
ค่าการเกาะติด	0.39±0.08	0.44±0.12
ค่าความทนทานการเคี้ยว (N.)	4.33±1.40	4.99±1.55
คุณภาพทางเคมี		
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	43.96±1.58	38.14±0.89
ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)	1.04±0.02	1.08±0.41
ปริมาณโปรตีน (ร้อยละ)	12.68±0.25	17.12±0.29
ปริมาณไขมัน (ร้อยละ)	1.35±0.03	1.46±0.00
ปริมาณเยื่อใย (ร้อยละ)	0.15±0.01	0.72±0.05
ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	40.97±1.19	42.82±0.80
พลังงาน (กิโลแคลอรี)	226.75	252.90
สารประกอบฟีนอลิก ทั้งหมด (mgGAE/100 ml)	-	11.11±0.38
แอนโทไซยานิน (µg/g)	-	0.36±1.12
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (ร้อยละ)		
DPPH	-	37.56±1.96
ABTS	-	5.31±1.29

#### 4. สรุป

ผลจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการทดแทนเนื้ออกไก่ด้วยผงจิ้งหรีดในปริมาณที่แตกต่างกันในการผลิตแพตตี้เบอร์เกอร์ข้าวเหนียวย้อมสีดอกอัญชัน ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน โดยสูตรที่ใช้ผงจิ้งหรีดในสัดส่วนร้อยละ 60 (สูตร B) มีคุณภาพเหมาะสมที่สุด ทั้งในด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการ และยังมีสารต้านอนุมูลอิสระจากดอกอัญชัน ผลิตภัณฑ์นี้จึงมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นอาหารโปรตีนทางเลือกที่ดีต่อสุขภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เหมาะกับผู้บริโภคยุคใหม่ที่ใส่ใจเรื่องโภชนาการและธรรมชาติ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (มหาชน) และ หน่วยวิจัยและพัฒนา ด้านการบริหารเทคโนโลยีและนวัตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง ที่สนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณสาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านอุปกรณ์และเครื่องมือในการปฏิบัติการวิจัยในครั้งนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Krawczyk, J. F.-López, and A. Z.-Korzycka, "Insect protein as a component of meat analogue burger," *Foods*, vol. 13, no. 12, pp. 1806, Jun. 2024.
- [2] A. Krawczyk, J. Fernández-López, and A. Zimoch-Korzycka, "Insect Protein as a Component of Meat Analogue Burger," *Preprints*, May 07, 2024.
- [3] R. S. D. Albuquerque, Y. A. Bernardo, and C. A. C.-Junior, "Edible insects as an alternative protein source in meat products: advantages, challenges, limitations, and gaps," *European Food Research and Technology*, vol. 251, pp. 2927-2943, Jun. 2025.
- [4] P. Ardila, A. Honrado, P. Marquina, J. A. Beltrán, and J. B. Calanche, "Innovative plant-based burger enriched with *Tenebrio molitor* meal: characterization and shelf-life," *Foods*, vol. 12, no. 18, pp. 3460, 2023.

- [5] B. Purschke, P. Meinlschmidt, C. Horn, O. Rieder, and H. Jäger, "Improvement of techno-functional properties of edible insect protein from migratory locust by enzymatic hydrolysis," *European Food Research and Technology*, vol. 244, pp. 999–1013, 2018.
- [6] B. F. Locus, D. T. Cunha, J.-B. Luce, and T. Brunner, "Factors influencing insect burger choice in a real-life setting: A study in university restaurants in Switzerland," *Future Foods*, vol. 11, pp. 100602, Jun. 2025.
- [7] L. Handayani, S. Aprilia, N. Arahman, and M. R. Bilad, "Anthocyanin extraction and pH-modulated color alterations in butterfly pea flower (*Clitoria ternatea* L.)," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1359, pp. 1–12, 2024.
- [8] C. Novais, A. K. Molina, R. M. V. Abreu, C. S.-Buelga, I. C. F. R. Ferreira, C. Pereira, and L. Barros, "Natural Food Colorants and Preservatives: A Review, a Demand, and a Challenge," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 70, no. 9, pp. 2789-2805, 2022.
- [9] P. Sukkhown and N. Saisombut, "Development and Texture Improvement of Healthy Meat Analogue Products using Jackfruit Seed Flour," *Journal of Health and Food Creation*, vol. 1, no. 1, pp. 1-19, Jan. – Jun. 2023.
- [10] S. Ghosha, S.-M. Leeb, C. Jungb, and V. B. M.-Rochow, "Nutritional composition of five commercial edible insects in South Korea," *Journal of Asia-Pacific Entomology*, vol. 20, no. 2, pp. 686–694, 2017.
- [11] T. Kueachan, T. Worrarat, P. Chalermchaiwat, and D. Sangteerakij, "Effects of Wheat Flour Substitution with Cricket Powder (*Gryllus bimaculatus*) on Physical, Chemical, and Sensory Properties of Brownie Brittle," *Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal*, vol. 16 no. 2, pp. 316-329, May.-Aug. 2024.
- [12] M. Bawa, S. Songsermpong, and C. Kaewtapee, and W. Chanput, "Effect of diet on the growth performance, feed conversion, and nutrient content of the house cricket," *Journal of Insect Science*, vol. 20, no. 2, pp. 1-10, Mar. 2020.
- [13] K. Phesatcha, B. Phesatcha, K. Chunwijittra, and M. Wanapat, "Effect of local feed resources on the production performance and nutritional composition of the cricket (*Gryllus bimaculatus* De Geer)," *Khon Kaen Agriculture Journal*, vol. 50, no. 1, pp. 548-557, Dec. 2021.
- [14] V. Ermolaos, N. Aikaterini, P. Morten, P. S.-Monteiro, F. Michel, S. Evangelia, N. Androniki, and B. Géraldine, "Substituting red meat with insects in burgers: Estimating the public health impact using

- risk-benefit assessment,” *Food and Chemical Toxicology*, vol. 189, 2024.
- [15] S. Aprile, N. Baldino, O. Mileti, F. R. Lupi, and D. Gabriele, “Cricket isolates as ingredients to design protein foods: Functional, structural and interfacial properties,” *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 102, Jun. 2025.
- [16] Cricket One, “Cricket protein applications and development,” [Online]. <https://www.cricketone.asia>. [Accessed: Mar. 8, 2025].
- [17] G. Rocchetti, G. Leni, A. Rebecchi, R. Dordoni, G. Giuberti, and L. Lucini, “The distinctive effect of different insect powders as meat extenders in beef burgers subjected to cooking and *in vitro* gastrointestinal digestion” *Food Chemistry*, vol. 442, no. 1, Jun. 2024.
- [18] H. Pisetrakul, J. Saetang, P. Chalermchaiwat, and D. Sangteerakij, “Effects of wheat flour substitution with germinated brown rice flour and cricket powder on the chemical, physical, and sensory properties of chocolate muffins,” *VRU Research and Development Journal Science and Technology*. Vol. 20, no. 1, pp. 1-14. Jan.-Apr. 2025.
- [19] A. Chia, Y. Shou, N. M. Y. Wong, D. Cameron-Smith, X. Sim, R. M. Van Dam, and M. F.-F. Chong, “Complexity of consumer acceptance to alternative protein foods in a multiethnic Asian population: A comparison of plant-based meat alternatives, cultured meat, and insect-based products,” *Food Quality and Preference*, vol. 114, p. 105102, May 2024
- [20] Euromonitor International, “Ready-to-eat meals in Thailand: Market analysis 2023,” [Online]. <https://www.euromonitor.com>. [Accessed: Jun. 24, 2025]
- [21] Chiang Mai Livestock Product Research and Development Centre, “Crickets and cricket farming,” [Online]. <https://product.dld.go.th/webnew/index.php/th/>. [Accessed: Sep. 4, 2022].
- [22] Y. Shen, S. Hong, Z. Du, M. Chao, T. O’Quinn, and Y. Li, “Effect of adding modified pea protein as functional extender on the physical and sensory properties of beef patties,” *LWT- Food Sciences and Technology*, vol. 154, Jan. 2022.
- [23] AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Analytical Chemists. 17th ed., Washington, D.C., U.S.A. 2019.
- [24] J. Kanjanarong and V. Plongbunjong, “Product Development of Ice Cream Fiber- Fortified from Pomelo Puree,” *RMUTP Research Journal Science and Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 47-56, Jan.-Jun. 2024.
- [25] J. Burakorn, P. Pinthong, S. Kraisit, P. Plaichan, N. Siriwarin, and M. Aimkaew, “Development of Khanom Arlua Product using Wheat Flour Partially Substituted with Tubtim Chumphae Rice Flour,” *KKU Science Journal*, vol. 52, no. 2, pp. 170-181, 2024.

- [26] Y. Rbah, K. Belhaj, Y. Taaifi, A. Allay, R. Melhaoui, H. S. Caid, and A. Elamrani, "Nutritional Composition and Functional Properties of 'Beldiya' Hemp Seed and Oil: A Sustainable Local Resource from Northern Morocco for Health and Nutrition," *Journal of Oleo Science*, vol. 74, no. 6, pp. 533-542, 2025.
- [27] T. Rongsuphan and S. Kajorncheappunngam, "Anthocyanin content, antibacterial activity and antioxidant capacity of purple corn cob extract via ultrasonic extraction," *Phranakhon Rajabhat Research Journal: Science and Technology*, vol.14, no.1, pp. 47-61. Jan. – Jun. 2019.
- [28] P. Rueangsuksudand and W. Punnongwa, "Physicochemical Properties and Antioxidant Activity of Japanese Purple Sweet Potato Starch Modified by Acid and Heat Treatments," *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, vol. 24, no 2, pp. 72-80, May.-Aug. 2022.
- [29] E. R. Jeyaraj, Y. Y. Lim, and W. S. Choo, "Antioxidant, cytotoxic, and antibacterial activities of *Clitoria ternatea* flower extracts and anthocyanin-rich fraction," *Scientific Reports*, vol. 12, 2022.
- [30] G. C. V. Gamage, Y. Y. Lim, and W. S. Choo, "Anthocyanins from *Clitoria ternatea* Flower: Biosynthesis, Extraction, Stability, Antioxidant Activity, and Applications," *Frontiers in Plant Science*, vol. 12, pp. 1-17, Dec. 2021.
- [31] X. Fu, Q. Wu, J. Wang, Y. Chen, G. Zhu, and Z. Zhu, "Spectral Characteristic, Storage Stability and Antioxidant Properties of Anthocyanin Extracts from Flowers of Butterfly Pea (*Clitoria ternatea* L.)," *Molecules*, vol. 26, no. 22, pp. 1-12, 2021.
- [32] K. Kungsuwan, K. Singh, S. Phetkao, and N. U.-Ang, "Effects of pH and anthocyanin concentration on color and antioxidant activity of *Clitoria ternatea* extract," *Food and Applied Bioscience Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 31–46, Jan.-Apr. 2014.
- [33] C.-C. Chen, C. Lin, M.-H. Chen, and P.-Y. Chiang, "Stability and Quality of Anthocyanin in Purple Sweet Potato Extracts," *Foods*, vol. 8, no. 9, p. 393, Sep. 2019.
- [34] G. Chandrajith, V. Gamage, Y.Y. Lim, and W. S. Choo, "Anthocyanins from *Clitoria ternatea* flower: biosynthesis, extraction, stability, antioxidant activity, and application," *Frontiers in Plant Science*, vol. 12, Dec. 2021.
- [35] A. Osimani, V. Milanović, C. Garofalo, F. Cardinali, A. Roncolini, R. Sabbatini, F. D. Filippis, D. Ercolini, C. Gabucci, A. Petruzelli, F. Tonucci, F. Clementi, and L. Aquilanti, "Revealing the microbiota of marketed edible insects through PCR-DGGE, metagenomic sequencing and real-time PCR," *International Journal of*

- Food Microbiology*, vol. 276, pp. 54–62, Jul. 2018.
- [36] G. Sogari, D. Menozzi, and C. Mora, “Exploring young foodies’ knowledge and attitude regarding entomophagy: A qualitative study in Italy,” *International Journal of Gastronomy and Food Science*, vol. 7, pp. 16–19, Apr. 2017.
- [37] J. O.-Akullo, B. N. K.-Mokua, D. Nakimbugwe, J. Ng’ang’a, and J. Kinyuru, “Color, pH, microbiological, and sensory quality of crickets (*Gryllus bimaculatus*) flour preserved with ginger and garlic extracts,” *Food Science & Nutrition*, vol. 11, no. 6, pp. 2838–2851, Mar. 2023.
- [38] M. Bawa, S. Songsempong, C. Kaewtapee, and W. Chanput, “Nutritional, sensory, and texture quality of bread and cookie enriched with house cricket (*Acheta domesticus*) powder,” *Journal of Food Processing and Preservation*, vol.44, no.8, pp. 1-10, Jun 2020.
- [39] FAO, “Food drying and dehydration,” in *Food Quality and Safety Systems: A Training Manual on Food Hygiene and the Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP) System*, Rome: FAO, 2003. pp. 152–157.
- [40] H.-M. Kim, J.-N. Kim, J.-S. Kim, M.-Y. Jeong, E.-Y. Yun, J.-S. Hwang, and A.-J. Kim “Quality Characteristics of Patty Prepared with Mealworm Powder. *The Korean Journal of Food and Nutrition*,” vol. 28, no. 5, pp. 813-820, Oct. 2015.
- [41] E. Jung and N. Joo, “Optimization Processing and Quality Characteristics of Pork Patty Prepared with Soybean Oil,” *The Korean Journal of Food and Nutrition*, vol. 27, no. 2, pp. 256-266, Apr. 2014.
- [42] R. C. Megido, L. Sablon, M. Geuens, Y. Brostaux, T. Alabi, C. Blecker, D. Drugmand, E. Haubruge, and F. Francis, “Edible insects acceptance by Belgian consumers: Promising attitude for entomophagy development,” *Journal of Sensory Studies*, vol. 29, no. 1, pp. 14–20, 2014.
- [43] H. K. Nam, T. W. Kang, I.-W. Kim, R.-Y. Choi, H. W. Kim, and H. J. Park, “Physicochemical properties of cricket (*Gryllus bimaculatus*) gel fraction with soy protein isolate for 3D printing-based meat analogue,” *Food Bioscience*, vol. 53, 2023.
- [44] K. Kyriakopoulou, J. K. Keppler, and A. J. Goot, “Functionality of ingredients and additives in plant-based meat analogues,” *Foods*, vol. 10, no. 3, 2021.
- [45] L. Godschalk-Broers, G. Sala, and E. Scholten, “Meat Analogues: Relating Structure to Texture and Sensory Perception,” *Foods*, vol. 11, no. 15, p. 2227, Jul. 2022.
- [46] Y. Jin, J. Tang, and S. S. Sablani, “Food component influence on water activity of low-moisture powders at elevated temperatures in connection with

- pathogen control," *LWT- Food Science and Technology*, vol. 112, pp. 1–7, Sep. 2019.
- [47] K. Nakagawa, R. Chantanuson, P. Boonarsa, N. Seephua, and S. Siriamornpun, "Meat analogue preparation from cricket and rice powder mixtures with controlled textural and nutritional quality by freeze alignment technique," *Food Chemistry: X*, vol. 22, p. 101402, Jun. 2024.
- [48] S. L. Khoo, K. Azlan, A. Tang, and H. Lim, "Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits," *Food Nutritional Research*, vol. 61, no. 1, Aug. 2017.

# การพัฒนาเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยง

กัญญา โกสุมภ์\* ศิวตล แก้วอาจ สิทธิโชค นวนไชย และ ภูวนัย สุขแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุนทราราม ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 3 กันยายน 2567 แก้ไขบทความ 9 กันยายน 2568 ตอรับบทความ 24 กันยายน 2568

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยงให้สามารถคัดแยกเอาสิ่งเจือปนออกจากข้าวสารที่ผ่านกระบวนการสีข้าวของโรงสีข้าวชุมชนขนาดเล็กในชนบท โดยใช้หลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางร่วมกับการคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงที่ซ้อนอยู่ในถังทรงกลม ซึ่งกลไกในการคัดแยกประกอบด้วย ตะแกรง A ทำหน้าที่คัดแยกสิ่งเจือปนที่มีขนาดใหญ่กว่าเมล็ดข้าวสาร ตะแกรง B ทำหน้าที่คัดแยกข้าวสารเมล็ดเต็ม ตะแกรง C ทำหน้าที่คัดแยกข้าวสารเมล็ดหัก และ D คือชั้นนอกสุดที่เป็นถังทรงกลมทำหน้าที่รับข้าวปลายและเมล็ดวัชพืชที่มีขนาดเล็กกว่าข้าวสารเมล็ดหัก ทำการศึกษาเกี่ยวกับตัวแปร 3 ประเภท คือ มุมเทของถังคัดแยก 3 ระดับ คือ 2, 3 และ 4 องศา ความเร็วในการหมุนของถังคัดแยก 3 ระดับ คือ 15, 20 และ 25 รอบต่อนาที และชนิดของข้าวสาร 2 ชนิด คือ ข้าวสารหอมมะลิ และข้าวสารเหนียว แต่ละสภาวะทดลองละ 3 ซ้ำ ผลการทดสอบพบว่า มุมเท 2 องศา ข้าวสารมีการไหลช้า ทำให้มีเวลาในการคัดแยกเพิ่มขึ้น ความเร็ว 15 รอบต่อนาที แรงกระแทกต่ำ ลดการแตกหักของเมล็ดข้าว ข้าวสารหอมมะลิ คัดแยกได้ดีกว่าข้าวสารเหนียวเนื่องจากความแตกต่างของรูปร่างและขนาด สภาวะที่เหมาะสมคือ มุมเท 2 องศา และความเร็ว 15 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพการคัดแยกข้าวสารหอมมะลิ 95.5 เปอร์เซ็นต์ และข้าวสารเหนียว 94.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** ข้าวสาร; สิ่งเจือปน; เครื่องคัดแยก; แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง; ประสิทธิภาพการคัดแยก

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 7343 1107, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: kanya.ko@rmuti.ac.th

# Development of a Centrifugal Rice Grain Sorting Machine

Kanya Kosum\* Siwadon Kaawart Sitthichok Nuanchai and Phuwanai Sukkaew

Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

744 Suranarai Road, Nai Mueang Subdistrict, Mueang District, Nakhon Ratchasima 30000

---

*Received 3 September 2024; Revised 9 September 2025; Accepted 24 September 2025*

## Abstract

This research focuses on the development of a rice grain sorting machine intended to remove contamination from rice after the milling process in small rice mills in rural areas. The machine operates on the concepts of centrifugal force and size sorting and utilises a series of nested sieves inside a circular tank. The sorting mechanism contains Sieve A, which separates impurities larger than rice grains; Sieve B, which sorts whole rice grains; Sieve C, which differentiates broken rice grains; and Sieve D, which collects broken rice and weed seeds that are smaller than broken rice grains. The study examined three factors: 1) pouring angle of the separation tank at 2°, 3°, and 4°; 2) tank rotational speeds at 15, 20, and 25 rpm; and 3) rice types, including jasmine and glutinous rice. Each experimental condition was replicated three times. Results showed that at a 2° angle, rice flows slowly, allowing more sorting time; at 15 rpm, low impact force reduces grain breakage, and jasmine rice sorts better than glutinous rice due to shape and size differences. Optimal conditions are a 2° pouring angle and 15 rpm rotational speed, providing separation efficiency of 95.5% for jasmine rice and 94.0% for glutinous rice, respectively.

**Keywords :** Rice; Contaminations; Sorting Machine; Centrifugal Force; Separation Efficiency

---

\* *Corresponding Author. Tel.: +669 7343 1107, E-mail Address: kanya.ko@rmuti.ac.th*

## 1. บทนำ

ข้าวเป็นพืชอาหารหลักของโลก ซึ่งมีประชากรมากกว่าครึ่งหนึ่งของประชากรโลกบริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก โดยในแต่ละปีทั่วโลกมีความต้องการข้าวอย่างน้อย 617 ล้านตัน ซึ่งข้าวดังที่กล่าวถึงนี้ได้มาจากพื้นที่ปลูกข้าวที่กระจายอยู่ในทุกทวีป (ยกเว้นแอนตาร์กติกา) คิดเป็นพื้นที่ประมาณ 958 ล้านไร่ โดยที่ประมาณร้อยละ 90 มีการผลิตและบริโภคอยู่ในทวีปเอเชีย [1] ข้อมูลจากสมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย กล่าวว่า การส่งออกข้าวของไทยปี 2567 มีปริมาณ 9.95 ล้านตัน เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 13 สร้างรายได้เข้าประเทศไทยกว่า 225,656 ล้านบาท โดยที่ประเทศไทยส่งออกเป็นอันดับสามของโลก รองจากประเทศอินเดียที่เป็นผู้ส่งออกอันดับหนึ่งปริมาณ 19.55 ล้านตัน และเวียดนาม 6.24 ล้านตัน [2] กระบวนการเก็บเกี่ยวและแปรรูปข้าวเปลือกให้เป็นข้าวสารนั้นมีวิวัฒนาการที่ทันสมัยมากขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยี [3] ทำให้สามารถเก็บเกี่ยวและแปรรูปข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็วขึ้น แต่ความเร็วที่เพิ่มขึ้นนั้นก็ทำให้กระบวนการคัดแยกข้าวเปลือกออกจากสิ่งเจือปนมีประสิทธิภาพต่ำลง เนื่องจากข้าวเปลือกที่ได้จากการเก็บเกี่ยวด้วยรถเกี่ยวขนาดขำนั้นยังคงมีเมล็ดของวัชพืช เศษฟาง กรวด และหิน ติดมาด้วย เมื่อนำข้าวเปลือกดังกล่าวไปเข้ากระบวนการสีข้าวในโรงสีชุมชนที่อยู่ในชนบท ซึ่งมักเป็นโรงสีขนาดเล็ก มีคุณภาพในกระบวนการคัดแยกต่ำ จะมีผลทำให้ยังคงมีเมล็ดของวัชพืช เศษฟาง กรวด และหิน ติดมากับข้าวสารด้วย การคัดแยกในปัจจุบันตามวิธีของชาวบ้านในชนบท คือมักใช้การผัดข้าว หรือใช้มีดหยิบสิ่งเจือปนออก [4] ซึ่งจะประสบปัญหาจากการไม่สามารถแยกสิ่งเจือปนที่มีขนาดเล็ก เศษไม้ หรือเศษหินที่มีสีคล้ายกับข้าวสารได้ ทำให้การคัดแยกไม่สามารถนำสิ่งเจือปนออกได้ทั้งหมด ปัจจุบันมีผู้ผลิตเครื่องคัดแยกสิ่งเจือปนออกมาจำหน่ายหลายรูปแบบ เช่น แบบตะแกรงโยก แบบสั่น และแบบหมุน [5] ซึ่งเครื่องคัดแยกที่กล่าวมานั้น ยังพบว่า มีราคาสูง และอาจจะยังไม่สามารถคัดแยกได้หลายขนาด

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเครื่องคัดแยกสำหรับชุมชนหลายประเภท อาทิเช่น Kaewwinat ได้นำเสนอเครื่องคัดแยกวัชพืชออกจากข้าวเปลือกที่ใช้ตะแกรงและอุโมงค์ลม ซึ่งมีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน [6] Pukdeewong และคณะ ได้พัฒนาเครื่องคัดแยกกรวดในกระบวนการสีข้าวขนาดเล็ก ที่ทำงานได้ดีที่สุดที่ความเร็ว 490 รอบต่อนาที และมุมเอียงของตะแกรง 13 องศา [7] ในขณะที่ Chongpleumpiti และคณะ ได้สร้างและทดสอบเครื่องคัดแยกสิ่งเจือปนที่ใช้ประสิทธิภาพการคัดแยกใกล้เคียงกับแรงงานคนมากที่สุด ที่ความเร็วรอบ 213.6 รอบต่อนาที และมุมเอียง 8.63 องศา [8] การศึกษาในต่างประเทศยังพบว่า ปัจจัยต่าง ๆ เช่น มุมเอียงของตะแกรง ความเร็วรอบ และอัตราการป้อน มีผลอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพการคัดแยก [9] การศึกษาเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคัดแยกมีความแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องจักรและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้คัดแยก

ดังนั้นบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยงที่มีขนาดเหมาะสมกับการทำงานของผู้สูงอายุที่อยู่ในชนบท และศึกษาประสิทธิภาพการคัดแยกภายใต้สภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน เพื่อจะช่วยลดปริมาณของสิ่งเจือปนที่มีในข้าวสารที่ได้จากการสีข้าวในโรงสีชุมชน

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยง ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาตามวิธีการดังนี้

### 2.1 การพัฒนาเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยง

การออกแบบเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยง เริ่มต้นจากการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการคัดแยก ซึ่งประกอบด้วย ขนาดและรูปร่างของเมล็ดข้าวสาร ความเร็วรอบของถังคัดแยก

และมุมเทของถังคัดแยก [10] และการออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องตั้งอยู่บนหลักการคำนวณทางวิศวกรรม [11] โดยมีรายละเอียดและสมการที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

### 2.1.1 การคำนวณหาแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานในการคัดแยกวัสดุที่แตกต่างกันด้วยการหมุน หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างมวล ความเร็วเชิงมุม และรัศมีการหมุน [10] ดังสมการที่ (1)

$$F = m\omega^2 r \quad (1)$$

โดยที่

$F$  = แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (นิวตัน)

$m$  = มวลของวัตถุ (กิโลกรัม)

$\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของวัตถุ (เรเดียนต่อวินาที)

$r$  = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางการหมุน (เมตร)

### 2.1.2 การคำนวณกำลังมอเตอร์

กำลังมอเตอร์ที่ต้องการสำหรับการขับเคลื่อนระบบ คำนวณได้จากสมการที่ (2) [11]

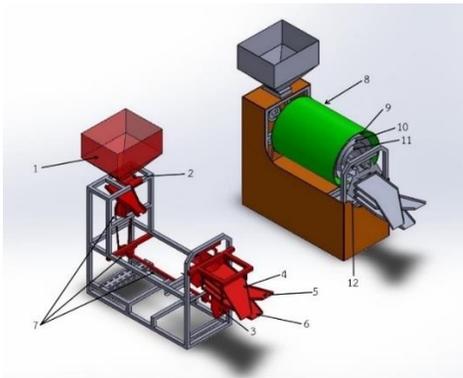
$$P = 2\pi nT/60 \quad (2)$$

โดยที่

$P$  = กำลังมอเตอร์ (วัตต์)

$n$  = ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)

$T$  = แรงบิด (นิวตัน-เมตร)



รูปที่ 1 โครงร่างของเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยงและชิ้นส่วนหลักของเครื่อง

ตารางที่ 1 ค่าการออกแบบหลักของเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยง

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้		
	ในการคำนวณ	หน่วย	ผลลัพธ์
มวลข้าวสารต่อรอบ	0.48	กิโลกรัม	-
ความเร็วเชิงมุม (15 รอบต่อนาที)	1.57	เรเดียนต่อวินาที	-
รัศมีถังคัดแยก	0.15	เมตร	-
แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	-	นิวตัน	0.178
แรงบิดที่ต้องการ	-	นิวตัน-เมตร	2.67
กำลังมอเตอร์ที่ต้องการ	-	วัตต์	42
กำลังมอเตอร์ที่เลือกใช้	-	วัตต์	250

จากการคำนวณออกแบบ เครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยงที่พัฒนาขึ้นมีคุณลักษณะ ขนาดโครงสร้าง กว้าง × ยาว × สูง = 40 × 60 × 80 เซนติเมตร มอเตอร์ ขนาด 250 วัตต์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ ความเร็วสูงสุด 306 รอบต่อนาที ระบบส่งกำลัง อัตราทด 9.78:1 แรงบิดสูงสุด 7.82 นิวตัน-เมตร ถังคัดแยก เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ความสูง 25 เซนติเมตร ตะแกรงคัดแยก 3 ชั้น โดยมีขนาดรูตะแกรง A = 5 มิลลิเมตร, B = 2.5 มิลลิเมตร, C = 1.5 มิลลิเมตร ความสามารถในการคัดแยก 5-10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยงที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักตามแสดงในรูปที่ 1 รายละเอียดหมายเลข 1 คือ ถังรับข้าว 2 คือ แผ่นเปิด-ปิดกั้นการไหลของข้าว 3 คือ ลูกเบี้ยว 4 คือ ช่องทางออก A สำหรับสิ่งเจือปนที่มีขนาดใหญ่กว่าข้าวสาร 5 คือ ช่องทางออก B สำหรับข้าวสารเม็ดเต็ม 6 คือ ช่องทางออก C สำหรับข้าวสารเม็ดหัก 12 คือ สำหรับปลายข้าวและสิ่งเจือปนที่มีขนาดเล็กกว่าข้าวสารเม็ดหัก 7 คือ ระบบส่งกำลัง 8 คือ ถังคัดแยก 9 คือ ตะแกรงคัดแยกสิ่งเจือปนที่มีขนาดใหญ่กว่าข้าวสาร 10 คือ ตะแกรงคัดแยกข้าวสารเม็ดเต็ม และ 11 คือ ตะแกรงคัดแยกข้าวสารเม็ดหัก

### 2.1.3 กลไกการทำงาน

เครื่องคัดแยกมีกลไกการทำงาน 4 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยที่ช่องทางออก A คัดแยกสิ่งเจือปน ขนาดใหญ่กว่าข้าวสาร ช่องทางออก B คัดแยกข้าวสาร เมล็ดเต็ม ช่องทางออก C คัดแยกข้าวสารเมล็ดหัก ช่องทางออก D คัดแยกข้าวปลายและสิ่งเจือปนขนาดเล็ก



รูปที่ 2 กลไกการทำงานของเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยง

## 2.2 การทดสอบประสิทธิภาพ

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยงได้ดำเนินการตามระเบียบวิธีที่กำหนดไว้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นกับประสิทธิภาพการคัดแยก

### 2.2.1 ตัวแปรในการทดลอง

#### ตัวแปรต้น

มุมเทของถังคัดแยก 2, 3 และ 4 องศา

ความเร็วรอบของถังคัดแยก 15, 20 และ 25 รอบต่อนาที

ชนิดข้าวสาร ข้าวสารหอมมะลิ และข้าวสารเหนียว

#### ตัวแปรตาม

ประสิทธิภาพการคัดแยก (เปอร์เซ็นต์) คำนวณจากสมการที่ (3)

$$\eta = (W_{screen} / W_{in}) \times 100 \quad (3)$$

โดยที่

$\eta$  = ประสิทธิภาพการคัดแยก (เปอร์เซ็นต์)

$W_{screen}$  = น้ำหนักข้าวสารเมล็ดเต็มที่คัดได้ (กรัม)

$W_{in}$  = น้ำหนักข้าวสารเมล็ดเต็มที่ป้อนเข้า (กรัม)

### ตัวแปรควบคุม

ปริมาณข้าวสารและสิ่งเจือปนทั้งหมด 480 กรัม ประกอบด้วย

สิ่งเจือปนขนาดใหญ่ 10 กรัม

ข้าวสารเมล็ดเต็ม 400 กรัม

ข้าวสารเมล็ดหัก 50 กรัม

ข้าวปลายและสิ่งเจือปนขนาดเล็ก 20 กรัม

### 2.2.2 วิธีการทดลอง

เตรียมตัวอย่างข้าวสารและสิ่งเจือปนตามสัดส่วนที่กำหนด ปรับมุมเทและความเร็วรอบตามสภาวะการทดลอง ป้อนตัวอย่างเข้าสู่เครื่องคัดแยก เก็บผลผลิตจากแต่ละช่องทางออก (A, B, C, D) ชั่งน้ำหนักและวิเคราะห์องค์ประกอบ ทำซ้ำการทดลอง 3 ครั้งต่อสภาวะ

### 2.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์โดยหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพการคัดแยกภายใต้สภาวะต่าง ๆ

## 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการศึกษาเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยงที่พัฒนาขึ้น ที่แสดงดังตารางที่ 2 และสามารถสรุปผลการทดลองตามตัวแปรที่ศึกษาได้ดังนี้

ตารางที่ 2 ผลการทดลองประสิทธิภาพการคัดแยกภายใต้สภาวะต่าง ๆ

ชนิดข้าวสาร	มุมเท (องศา)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ประสิทธิภาพการคัดแยก (%)
		15	95.5 ± 1.2
		20	92.1 ± 1.8
		25	88.3 ± 2.5

ชนิดข้าวสาร	มุมเท (องศา)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ประสิทธิภาพการคัดแยก (%)	
หอมมะลิ	3	15	89.2 ± 2.1	
		20	85.7 ± 2.4	
		25	81.3 ± 3.0	
	4	15	82.7 ± 2.8	
		20	78.5 ± 3.2	
		25	74.1 ± 3.8	
	เหนียว	2	15	94.0 ± 1.5
			20	90.5 ± 2.0
			25	86.7 ± 2.9
3		15	87.8 ± 2.3	
		20	84.2 ± 2.7	
		25	79.8 ± 3.4	
4		15	80.5 ± 3.1	
		20	76.9 ± 3.5	
		25	72.3 ± 4.1	

### 3.1 ผลของมุมเทของถังคัดแยกต่อประสิทธิภาพการคัดแยก

การศึกษาผลของมุมเทของถังคัดแยก พบว่ามุมเท 2 องศา ให้ประสิทธิภาพการคัดแยกสูงสุดทั้งในข้าวสารหอมมะลิและข้าวสารเหนียว โดยมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการคัดแยก 95.5±1.2 เปอร์เซ็นต์ และ 94.0±1.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การที่มุมเท 2 องศา ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดนั้น เนื่องจากมุมเทที่น้อยจะช่วยให้ข้าวสารมีเวลาในการคัดแยกมากขึ้น ทำให้เมล็ดข้าวสารสามารถตกลงสู่ตะแกรงที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ

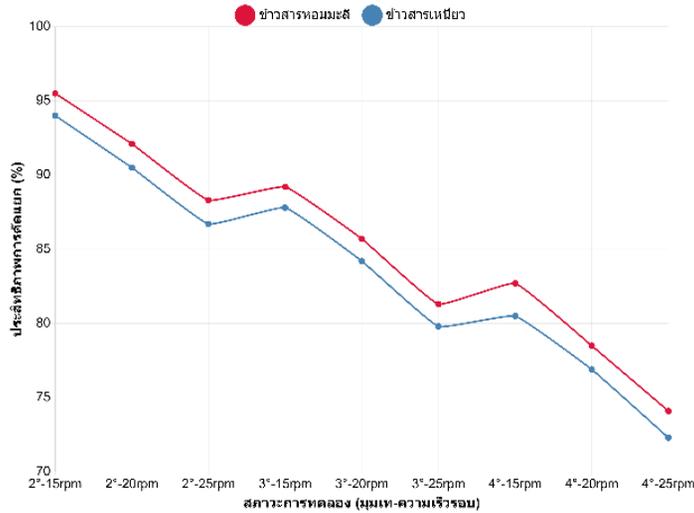
Pukdeewong et al. [7] ที่พบว่า มุมเอียงที่เหมาะสมสำหรับการคัดแยกกรวดในกระบวนการสีข้าวอยู่ในช่วง 8-13 องศา และเนื่องจากมุมเทที่น้อยทำให้เวลาในการคัดแยกเพิ่มขึ้น เมล็ดข้าวสารตกลงผ่านตะแกรงได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักการ Angle of repose ของวัสดุเกษตร [12]

### 3.2 ผลของความเร็วในการหมุนของถังคัดแยกต่อประสิทธิภาพการคัดแยก

การศึกษาผลของความเร็วรอบ พบว่า ความเร็วรอบ 15 รอบต่อนาที ให้ประสิทธิภาพการคัดแยกสูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการคัดแยกข้าวสารหอมมะลิ 95.5±1.2 เปอร์เซ็นต์ และข้าวสารเหนียว 94.0±1.5 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบที่ต่ำให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเนื่องจากลดการกระแทกและการแตกหักของเมล็ดข้าวสาร [13] และให้เวลาเพียงพอสำหรับการแยกตัวของเมล็ดข้าวสารตามน้ำหนักและขนาด ผลนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chongpleumpiti et al. [8] ที่พบว่า ความเร็วรอบ 213.6 รอบต่อนาที ให้ประสิทธิภาพการคัดแยกที่เหมาะสม

### 3.3 ผลของชนิดข้าวสารต่อประสิทธิภาพการคัดแยก

การเปรียบเทียบระหว่างข้าวสารหอมมะลิและข้าวสารเหนียว พบว่า ข้าวสารหอมมะลิมีประสิทธิภาพการคัดแยกสูงกว่าข้าวสารเหนียวในทุกสภาวะการทดลอง โดยเฉลี่ยประมาณ 1.5-2.0 เปอร์เซ็นต์ ความแตกต่างนี้เกิดจากลักษณะทางกายภาพของเมล็ดข้าวที่แตกต่างกัน โดยข้าวสารหอมมะลิมีความยาวและรูปร่างที่สม่อกว่าข้าวสารเหนียว ทำให้มีพฤติกรรมการไหลและการคัดแยกที่ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sirisomboon et al. [14] ที่พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดมีผลต่อประสิทธิภาพการคัดแยก



รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการคัดแยกภายใต้สภาวะต่าง ๆ

ตารางที่ 3 การกระจายตัวของผลผลิตในแต่ละช่องทางออก (สภาวะที่เหมาะสม: 2°, 15 rpm)

ประเภทวัสดุ	น้ำหนักที่ป้อนเข้า (กรัม)	ช่องทางออก A (กรัม)	ช่องทางออก B (กรัม)	ช่องทางออก C (กรัม)	ช่องทางออก D (กรัม)
<b>ข้าวสารหอมมะลิ</b>					
สิ่งเจือปนขนาดใหญ่	10	9.2 ± 0.3	0.5 ± 0.2	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.1
ข้าวสารเมล็ดเต็ม	400	1.0 ± 0.4	382.0 ± 4.8	12.5 ± 1.2	4.5 ± 0.8
ข้าวสารเมล็ดหัก	50	0.2 ± 0.1	2.8 ± 0.5	44.1 ± 1.5	2.9 ± 0.4
ข้าวปลาย+สิ่งเจือปนเล็ก	20	0.1 ± 0.1	0.3 ± 0.2	1.2 ± 0.3	18.4 ± 0.6
<b>ข้าวสารเหนียว</b>					
สิ่งเจือปนขนาดใหญ่	10	8.9 ± 0.4	0.7 ± 0.3	0.3 ± 0.1	0.1 ± 0.1
ข้าวสารเมล็ดเต็ม	400	1.5 ± 0.5	376.0 ± 6.0	15.2 ± 1.8	7.3 ± 1.2
ข้าวสารเมล็ดหัก	50	0.3 ± 0.1	3.2 ± 0.7	42.8 ± 2.1	3.7 ± 0.6
ข้าวปลาย+สิ่งเจือปนเล็ก	20	0.2 ± 0.1	0.5 ± 0.3	1.5 ± 0.4	17.8 ± 0.8

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงมุมเทและความเร็วรอบมีผลต่อประสิทธิภาพการคัดแยกอย่างชัดเจน โดยมุมเท 2 องศา และความเร็วรอบ 15 รอบต่อนาที ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในทั้งสองชนิดข้าวสาร

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยงภายใต้สภาวะที่เหมาะสม (มุมเอียง 2° และความเร็วรอบ 15 rpm) สามารถแยกข้าวสารและสิ่งเจือปนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยข้าวสารหอมมะลิและข้าวสารเหนียวมีแนวโน้มการ

กระจายตัวที่คล้ายคลึงกัน สำหรับข้าวสารหอมมะลิ พบว่า สิ่งเจือปนขนาดใหญ่ส่วนใหญ่ (92%) ถูกแยกออกจากช่อง A ข้าวสารเมล็ดเต็มถูกแยกออกจากช่อง B ด้วยประสิทธิภาพสูง (95.5%) ข้าวสารเมล็ดหักถูกรวบรวมที่ช่อง C (88.2%) และข้าวปลายพร้อมสิ่งเจือปนเล็กถูกแยกออกจากช่อง D (92%) ในขณะที่ข้าวสารเหนียวแสดงประสิทธิภาพการแยกที่ใกล้เคียงกัน แต่มีค่าเล็กน้อยลดลงในข้าวสารเมล็ดเต็ม (94%) และข้าวสารเมล็ดหัก (85.6%) ซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างทางกายภาพของเมล็ดข้าวเหนียวที่มีความหนาแน่นและสมบัติการยึดเกาะที่แตกต่างจากข้าวหอมมะลิ

ผลการทดลองนี้ยืนยันว่าพารามิเตอร์การทำงานที่เลือกใช้เหมาะสมสำหรับการแยกข้าวสารทั้งสองพันธุ์ [15] โดยมีการปนเปื้อนข้ามช่องในระดับที่ยอมรับได้ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำแสดงถึงความเสถียรของกระบวนการแยก

#### 4. สรุป

ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยง โดยมีแนวคิดมาจากปัญหาการคัดแยกข้าวสารในชนบท เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการคัดแยกสิ่งเจือปนออกจากข้าวสาร ผู้วิจัยได้มีการศึกษาข้อมูลที่เป็น และนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบเพื่อพัฒนาเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยง และทดสอบเพื่อหาความสามารถในการทำงานของเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยงที่พัฒนาขึ้นที่ความเร็วรอบของถังคัดแยก 3 ระดับ คือ 15, 20 และ 25 รอบต่อนาที เทียบกับมุมเทของถังคัดแยก 3 ระดับ คือ 2, 3 และ 4 องศา พบว่า การคัดแยกเมล็ดข้าวสารหอมมะลิ และข้าวสารเหนียว ที่ความเร็วรอบของถังคัดแยก 15 รอบต่อนาที มุมเทของถังคัดแยก 2 องศา มีความสามารถในการคัดแยกข้าวสารออกจากสิ่งเจือปนได้ดีกว่าที่ความเร็วรอบของถังคัดแยก และมุมเทของถังคัดแยกในระดับอื่น ๆ ที่ทำการทดสอบ โดยมีประสิทธิภาพการคัดแยกสูงสุด

95.5 เปอร์เซ็นต์ ในข้าวสารหอมมะลิ และ 94.0 เปอร์เซ็นต์ ข้าวสารเหนียว ตามลำดับ ลดการแตกหักของเมล็ดข้าวสาร และใช้พลังงานต่ำ สำหรับการพัฒนาต่อไปควรมีการศึกษาการปรับปรุงระบบป้อนวัตถุดิบให้มีความต่อเนื่อง และการศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยเครื่องคัดแยกข้าวสารแบบหมุนเหวี่ยงที่พัฒนาขึ้นนี้เหมาะสำหรับโรงสีชุมชนขนาดเล็ก ไม่เหมาะกับการผลิตขนาดใหญ่ ทั้งนี้ประสิทธิภาพของเครื่องขึ้นอยู่กับชนิดและคุณภาพข้าวสาร

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประจำปีงบประมาณ 2566 ขอขอบคุณ คณาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องกล และวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ คุณพิเศษ ดิโยกได้ และ คุณชายชาญ เพ็ชรพวงพงศ์ ที่ร่วมเป็นส่วนหนึ่งเพื่อทำให้งานนี้สำเร็จได้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Rice Department, Ministry of Agriculture and Cooperatives, "World Rice Production and Marketing Situation, Production Year 2023/2024," [Online]. Available: <https://www.ricethailand.go.th/home/images/may.pdf>. [Accessed: Mar. 15, 2024].
- [2] Thai Rice Mills Association, "Thailand Rice Export Statistics 2024," [Online]. Available: [https://www.thairicemillers.com/index.php?option=com\\_content&task=category&sectionid=8&id=21&Itemid=53](https://www.thairicemillers.com/index.php?option=com_content&task=category&sectionid=8&id=21&Itemid=53). [Accessed: Mar. 20, 2024].

- [3] A. N. M. R. Bin Rahman and J. Zhang, "Trends in rice research: 2030 and beyond," *Food and Energy Security*, vol. 12, no. 2, p. e390, Mar. 2023
- [4] Food and Agriculture Organization, "Labour-saving technologies and practices: manual and motorised cleaning of grains and pulses," FAO Family Farming Knowledge Platform, 2020. [Online]. Available: <https://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/1619218/>. [Accessed: Dec. 26, 2024].
- [5] R. P. Singh and D. R. Heldman, *Introduction to Food Engineering*, 5th ed. San Diego, CA: Academic Press, 2014, pp. 345-378.
- [6] N. Kaewwinat, "Development of a Machine for Separating Weeds and Impurities from Rice Seeds," B.S. thesis, Fac. Ind. Tech., Surin Rajabhat Univ., Surin, Thailand, 2020.
- [7] P. Pukdeewong, S. Pathaveerat, and S. Noypitak, "Development of Destoner for Small Rice Mill," in *Proceeding of the 14th National Academic Conference*, Kasetsart University, Kamphaeng Saen, Thailand, 2017, pp. 156-163.
- [8] J. Chongpleumpiti, P. Wengsungnern, C. Dayuktang, W. Honpimai, and C. Phengphanao, "Impurities separator out of the head rice that passed community rice mill," in *Proceeding of the 7th Academic Conference on Engineering, Science, Technology and Architecture*, Dusit Princess Hotel, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2016, pp. 441-446.
- [9] A. W. Roberts, "The influence of granular vortex motion on the volumetric performance of enclosed screw conveyors," *Powder Technology*, vol. 104, no. 1, pp. 56-67, Aug. 1999.
- [10] F. P. Beer, E. R. Johnston, and P. J. Cornwell, *Vector Mechanics for Engineers: Dynamics*, 11th ed. New York: McGraw-Hill, 2016, pp. 678-724.
- [11] R. L. Mott, *Machine Elements in Mechanical Design*, 5th ed. Boston: Pearson, 2013, pp. 456-489.
- [12] R. Stroshine and D. D. Hamann, *Physical Properties of Agricultural Materials and Food Products*, West Lafayette, IN: Purdue University, 1994, pp. 120-145.
- [13] J. Buggenhout, K. Brijs, I. Celus, and J. A. Delcour, "The breakage susceptibility of raw and parboiled rice: A review," *Journal of Food Engineering*, vol. 117, no. 3, pp. 304-315, Aug. 2013.
- [14] P. Sirisomboon, P. Pornchaloempong, and T. Romphopphak, "Physical properties of green soybean: Criteria for sorting," *Journal of Food Engineering*, vol. 79, no. 1, pp. 18-22, Mar. 2007.
- [15] E. T. Champagne, "Rice chemistry and quality," in *Rice: Chemistry and Technology*, 3rd ed. St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists, 2004, pp. 77-107.

## ผลของระยะเวลาต้ม ความเข้มข้นของสารละลายต่างและสารละลายเอนไซม์ ต่อปริมาณ ความยาว และขนาดเส้นใยเปลือกข้าวโพดหวาน พันธุ์อินทรี 2

วัลภา แต้มทอง\* สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ ัญญชิต ทับสวัสดิ์ ปวีณา ขำสงค์ และ ศรัณย์พร จุลเจิมศักดิ์

คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

รับบทความ 11 กุมภาพันธ์ 2568 แก้ไขบทความ 26 กันยายน 2568 ตอรับบทความ 20 ตุลาคม 2568

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาต้ม ความเข้มข้นของสารละลายต่างและสารละลายเอนไซม์ ต่อปริมาณ ความยาว และขนาดเส้นใยเปลือกข้าวโพดหวานพันธุ์อินทรี 2 ปัจจัยการทดลองมี 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสารละลายต่าง 2 ระดับ: 2.5 และ 5.0 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาต้ม 4 ระดับ: 30 60 90 และ 120 นาที และความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ 2 ระดับ: ร้อยละ 0.2 และ 0.4 ของน้ำหนักเส้นใย จัดสิ่งทดลองแบบ  $2 \times 4 \times 2$  แฟคทอเรียล ในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) วิเคราะห์ข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกสามทาง (Three-way ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD) ผลการวิจัยพบว่า กลุ่มเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดแห้ง ให้ปริมาณเส้นใยเฉลี่ยร้อยละ 24.18-86.67 เส้นใยมีความยาวเฉลี่ย 125.13-140.98 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นใยเฉลี่ย 31.19-64.32 เท็กซ์ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายต่างและระยะเวลาต้ม มีผลต่อปริมาณ ความยาว และขนาดเส้นใย ( $p \leq .05$ ) ความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ มีผลต่อปริมาณ และขนาดเส้นใย ( $p \leq .05$ ) แต่ไม่มีผลต่อความยาวเส้นใย ( $p > .05$ ) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายต่างกับระยะเวลาต้ม มีผลต่อปริมาณเส้นใย ( $p \leq .05$ ) แต่ไม่มีผลต่อความยาว และขนาดเส้นใย ( $p > .05$ ) ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายต่างกับความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ ระยะเวลาต้มกับความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 3 ปัจจัย ไม่มีผลต่อปริมาณ ความยาว และขนาดเส้นใย ( $p > .05$ )

คำสำคัญ : เส้นใยเปลือกข้าวโพด; สารละลายต่าง; สารละลายเอนไซม์; ความยาวเส้นใย; ขนาดเส้นใย

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 4852 3663, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: walapa.t@ku.th

# The Effects of Boiling Times, Concentrations of Alkali and Enzyme Solutions on Yield, Length, and Linear Density of Insee 2 Sweet Corn Husk Fibers

Walapa Tamthong\* Suteeluk Kraisuwan Thanchanit Tubsawat  
Paweena Khamsong and Sarunporn Juljermesak

Faculty of Agriculture, Kasetsart University  
50 Ngamwongwan Road, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900

---

*Received 11 February 2025; Revised 26 September 2025; Accepted 20 August 2025*

## Abstract

This study aimed to investigate the effects of boiling time, and concentrations of alkali and enzyme solution on the yield, length, and linear density of Insee 2 sweet corn husk fibers. The experiment included three factors: two alkali solution concentration levels (2.5 and 5.0 g/L), four boiling time levels (30, 60, 90, and 120 min), and two enzyme solution concentration levels (0.2% and 0.4% of fiber weight). A  $2 \times 4 \times 2$  factorial experiment was conducted using a completely randomized design (CRD). Data were analyzed using means, standard deviations, three-way analysis of variance, and mean comparisons using the least significant difference (LSD) method. The fiber bundles extracted from dried corn husks produced average fiber yields of 24.18%–86.67%, fiber lengths of 125.13–140.98 mm, and fiber linear density of 31.19–64.32 tex. Analysis of variance revealed that the alkali solution concentration and boiling time significantly affected the yield, length, and linear density of the fibers ( $p \leq .05$ ). The enzyme solution concentration significantly affected the yield and linear density of the fibers ( $p \leq .05$ ) but did not affect the fiber length ( $p > .05$ ). The interaction between alkali solution concentration and boiling time significantly affected fiber yield ( $p \leq .05$ ) but had no effect on fiber length and linear density ( $p > .05$ ). Additionally, the yield, length, and linear density of the fibers were not significantly affected by the interactions between alkali solution concentration and enzyme solution concentration, boiling time and enzyme solution concentration, and the three-way interaction among all factors ( $p > .05$ ).

**Keywords :** Corn Husk Fibers; Alkali Solutions; Enzyme Solutions; Fiber Length; Fiber Linear Density

---

\* Corresponding Author. Tel.: +669 4852 3663, E-mail Address: Walapa.t@ku.th

## 1. บทนำ

ข้าวโพดเป็นพืชไร่ที่ปลูกง่าย ทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศในประเทศไทย สามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี และให้ผลผลิตสูง ถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ โดยในปี 2566-2567 มีผลผลิตรวมทั้งสิ้น 5.34 ล้านตัน แบ่งเป็นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 4.89 ล้านตัน และข้าวโพดหวาน 0.45 ล้านตัน พื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มากที่สุด คือจังหวัดเพชรบูรณ์ นครราชสีมา น่าน ตาก และลพบุรี ส่วนพื้นที่ปลูกข้าวโพดหวานมากที่สุด คือจังหวัดเชียงราย เชียงใหม่ ลำปาง สุโขทัย และกาญจนบุรี [1]

ข้าวโพดหวานพันธุ์อินทรี 2 เป็นข้าวโพดหวานพันธุ์ลูกผสมที่พัฒนาโดยศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ (ไร่สุวรรณ) คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มีรสชาติหวาน นุ่มและหอม โดยมีความหวานเฉลี่ย 15% ปริกซ์ ซึ่งมีความหวานและความหอมสูงกว่าข้าวโพดหวานพันธุ์การค้าอื่น ๆ จึงได้รับความนิยมในการบริโภคอย่างแพร่หลายในหลายรูปแบบ ทั้งข้าวโพดฝักสด ข้าวโพดต้ม น้ำนมข้าวโพด และเมล็ดข้าวโพดบรรจุกระป๋อง ฝักของข้าวโพดหวานพันธุ์อินทรี 2 มีลักษณะทรงกระบอก น้ำหนักฝักสดรวมเปลือกเฉลี่ย 328 กรัม ความยาวเฉลี่ย 29 เซนติเมตร และความกว้างเฉลี่ย 6 เซนติเมตร เปลือกหุ้มฝักยาวตลอดฝัก โดยแต่ละฝักมีเปลือกประมาณ 8-9 ใบ เมล็ดมีสีเหลืองเรียงเป็นแถวจำนวน 14-16 แถว เมล็ดไม่ยุบตัวเร็วเมื่อแห้ง และสามารถคงความเต่งได้นาน 2-3 วันหลังการเก็บเกี่ยว [2] จากความนิยมในการบริโภคข้าวโพดหวานพันธุ์อินทรี 2 ทำให้มีเปลือกข้าวโพดเหลือทิ้งจำนวนมาก ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ เช่น ทำปุ๋ยหมัก เพาะเห็ด และอาหารสัตว์

เปลือกข้าวโพดหวานพันธุ์อินทรี 2 ได้จากการเก็บเกี่ยวข้าวโพดเมื่ออายุ 65-70 วัน มีสีตั้งแต่เขียวอ่อนไปจนถึงเขียวเข้ม ลักษณะเป็นแผ่นยาวรี ขนาดค่อนข้างใหญ่ ประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นหนาเรียงตัวห่างกัน

(Long Thick Strands) สลับกับส่วนที่เป็นแผ่นเยื่อบาง (Weak Fibrous Parts) [2] ซึ่งส่วนที่เป็นเส้นหนาสามารถแยกออกเป็นเส้นใยกลุ่มเล็ก ๆ ได้ จากการศึกษาของ P. Wangwan et al. [3] ที่แยกเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดหวานโดยใช้กระบวนการกำจัดลิกนินในสภาวะที่แตกต่างกัน พบว่าเส้นใยที่ได้เป็นเส้นใยสั้น มีความยาวและความละเอียดแตกต่างกัน โดยสามารถนำไปผลิตเป็นแผ่นเส้นใยเพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ T. Tubsawat et al. [4] ได้ศึกษาการแยกเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์และเปลือกข้าวโพดหวานด้วยวิธีการแช่หมักในน้ำ พบว่าเส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นกลุ่มเส้นใย โดยเส้นใยเปลือกข้าวโพดหวานมีความยาวมากกว่าเส้นใยเปลือกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ แต่มีขนาดเล็กหรือมีความละเอียดมากกว่า จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าเส้นใยเปลือกข้าวโพดหวานมีลักษณะเป็นกลุ่มเส้นใย (Fiber Bundles) ประกอบด้วยเส้นใยเดี่ยวเรียงซ้อนกันตามแนวยาว และยึดเกาะกันด้วยลิกนิน เพกทินและสารอื่น ๆ พื้นผิวเส้นใยมีลักษณะไม่เรียบ มีองค์ประกอบหลักทางเคมี ได้แก่ เซลลูโลส ร้อยละ 61.24-74.71 เฮมิเซลลูโลส ร้อยละ 15.21-26.91 และลิกนิน ร้อยละ 0.76-4.51 [2]

การแยกเส้นใยจากใบพืชนิยมใช้การหมักในน้ำ การใช้ด่าง และการใช้เอนไซม์ เช่น เซลลูเลส เพกทิเนส และเฮมิเซลลูเลส ซึ่งเอนไซม์แต่ละชนิดมีสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานแตกต่างกัน เช่น เซลลูเลสมักทำงานได้ดีที่สุดในช่วง pH 4.5-5.5 อุณหภูมิ 50-60°C และจำเป็นต้องแยกเส้นใยด้วยวิธีอื่นก่อน แล้วจึงใช้เอนไซม์เพื่อช่วยให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงและมีความละเอียดมากขึ้น

การใช้ประโยชน์จากเส้นใยเปลือกข้าวโพด ได้แก่ การนำมาผสมกับวัสดุอื่นเพื่อใช้เป็นชั้นซับน้ำ (Absorbent Layer) ในผ้าอนามัย ผลการวิจัยพบว่า

สามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าผ้าอนามัยที่จำหน่ายในท้องตลาดเล็กน้อย อีกทั้งการปนเปื้อนของเชื้อราและแบคทีเรียยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ [6] นอกจากนี้ ยังมีการนำเส้นใยเปลือกข้าวโพดมาผลิตเป็นวัสดุประกอบ (Composite Material) โดยขึ้นรูปเป็นแผ่นใยและอัดด้วยอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) ให้ซึมเข้าสู่เส้นใย พบว่าวัสดุประกอบที่มีเส้นใยเปลือกข้าวโพดมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุที่ทำจากอีพ็อกซีเรซินเพียงอย่างเดียว [7]

สมบัติของเส้นใยที่จำเป็นสำหรับกระบวนการผลิตสิ่งทอ ได้แก่ ความยาว ขนาด ความสม่ำเสมอ และความแข็งแรง ดังนั้น การศึกษาการแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพดหวานพันธุ์อินทรี 2 โดยใช้ระยะเวลาต้ม ความเข้มข้นของสารละลายต่างและสารละลายเอนไซม์ที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อปริมาณ ความยาว และขนาดของเส้นใย จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาและต่อยอดการใช้ประโยชน์เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดให้หลากหลายมากขึ้น ไม่เพียงช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร แต่ยังเป็นแนวทางในการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากพืชชนิดอื่น ๆ เพื่อพัฒนาเส้นใยธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับการผลิตสิ่งทอและผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในอนาคตต่อไป

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 แผนการทดลอง

การวิจัยนี้มีปัจจัยการทดลอง 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสารละลายต่าง 2 ระดับ คือ 2.5 และ 5.0 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาต้ม 4 ระดับ คือ 30 60 90 และ 120 นาที และความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ 2 ระดับ คือ ร้อยละ 0.2 และ 0.4 ของน้ำหนักเส้นใยแห้ง จัดสิ่งทดลองแบบ  $2 \times 4 \times 2$  แฟคทอเรียล ในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) รวมทั้งสิ้น 16 สิ่งทดลอง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

## 2.2 วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์

### 2.2.1 การเตรียมและแช่หมักเปลือกข้าวโพด

เปลือกข้าวโพดที่ใช้คือ เปลือกของฝักข้าวโพดหวานพันธุ์อินทรี 2 จากศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ (ไร่สุวรรณ) อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา โดยลอกออกจากฝักโดยไม่แยกเปลือกชั้นนอกและเปลือกชั้นใน ตากแห้งเป็นเวลา 3 วัน (72 ชั่วโมง) อบแห้ง และชั่งน้ำหนักจนกระทั่งน้ำหนักของเปลือกข้าวโพดคงที่ แช่หมักเปลือกข้าวโพดโดยใช้อัตราส่วนเปลือกข้าวโพดต่อน้ำ 1:5.0 ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 วัน ใช้บล็อกคอนกรีตทับไม่ให้เปลือกข้าวโพดลอย เปลี่ยนน้ำทุก ๆ 3 วัน เพื่อให้เส้นใยสะอาด จากนั้นนำเปลือกข้าวโพดขึ้นจากน้ำ และใช้มีดรูตส่วนที่เปื่อยยุ่ยออก (Weak Fibrous Parts) เหลือไว้เฉพาะส่วนที่เป็นกลุ่มเส้นใยหนา (Long Thick Strands) สำหรับใช้ทดลอง จากนั้น ล้างกลุ่มเส้นใยหนาด้วยน้ำสะอาด ตากแห้ง อบแห้ง ผึ่งในตู้ดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 กลุ่มเส้นใยหนาของเปลือกข้าวโพดที่อบแห้งแล้ว

### 2.2.2 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide; NaOH) ชนิดเม็ด น้ำหนักเม็ดละ 0.1 กรัม ผลิตโดย

Ajax Finechem Pty Limited ประเทศออสเตรเลีย และ เอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase Enzyme) ค่ากิจกรรมของเอนไซม์ (Enzyme Activity) ประมาณ 31,000 หน่วยต่อกรัม ผลิตโดย Tokyo Chemical Industry Limited ประเทศญี่ปุ่น

### 2.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกเส้นใย เปลือกข้าวโพดประกอบด้วย เครื่องทดสอบการซัก Atlas Launder-O-Meter รุ่น LEF เครื่องย้อม Logic Art รุ่น LA-650 Infra-Red Dryer เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล Denver Instrument รุ่น SI-234 น้ำหนักสูงสุด 230 กรัม ความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม ผ้าขาวบาง และ อุปกรณ์เครื่องแก้ว

## 2.3 การแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพด

เตรียมกลุ่มเส้นใยเปลือกข้าวโพดจำนวน 72 ชุด แต่ละชุดมีน้ำหนัก 30 กรัม แบ่งเป็น 24 ชุด สำหรับการแยกเส้นใยด้วยสารละลายต่าง และ 48 ชุด สำหรับการแยกเส้นใยด้วยสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์

### 2.3.1 การแยกเส้นใยด้วยสารละลายต่าง

1. เตรียมสารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 และ 5.0 กรัมต่อลิตร โดยใช้อัตราส่วนกลุ่มเส้นใยต่อสารละลาย 1:20

2. ต้มกลุ่มเส้นใยในสารละลายต่างที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 30 60 90 และ 120 นาที

3. กรองแยกเส้นใยออกจากสารละลายต่าง จากนั้นล้างเส้นใยด้วยน้ำสะอาดจนกระทั่งน้ำใสไม่มีสี และมีค่า pH 6-7

4. นำเส้นใยตากแห้งในสภาพแวดล้อมปกติ จนกระทั่งเส้นใยมีน้ำหนักคงที่

### 2.3.2 การแยกเส้นใยด้วยสารละลายต่างร่วมกับ

สารละลายเอนไซม์

1. แยกเส้นใยด้วยสารละลายต่างตามขั้นตอนในข้อ 2.3.1

2. เตรียมสารละลายเอนไซม์ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 และ 0.4 ของน้ำหนักเส้นใยแห้ง โดยใช้อัตราส่วนเส้นใยต่อสารละลาย 1:20

3. แช่หมักเส้นใยในสารละลายเอนไซม์ที่อุณหภูมิ 50°C ระยะเวลา 60 นาที

4. กรองแยกเส้นใยออกจากสารละลายเอนไซม์ จากนั้นล้างเส้นใยด้วยน้ำสะอาดจนกระทั่งน้ำใสไม่มีสี และมีค่า pH 6-7

5. นำเส้นใยตากแห้งในสภาพแวดล้อมปกติ จนกระทั่งเส้นใยมีน้ำหนักคงที่

## 2.4 การทดสอบเส้นใย

1. การหาปริมาณเส้นใย (ร้อยละ) คำนวณจากสูตร  $[\text{น้ำหนักเส้นใย (กรัม)} \div \text{น้ำหนักเปลือกข้าวโพด (กรัม)}] \times 100$

2. ความยาวเส้นใย ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM Designation: D 5103-01 Standard Test Method for Length and Length Distribution of Manufactured Staple Fibers (Single-fiber Test)

3. ขนาดเส้นใย ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM Designation: D 1577-01 Standard Test Methods for Linear Density of Textile Fibers

## 2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

1. วิเคราะห์ข้อมูลปริมาณ ความยาว และขนาดเส้นใยเปลือกข้าวโพดโดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean:  $\bar{X}$ ) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

2. ทดสอบสมมติฐานโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกสามทาง (Three-Way Analysis of Variance) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq .05$ )

## 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

เส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยสารละลายต่าง และสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์ โดยใช้

ระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน มีลักษณะเป็นสีเหลืองปนน้ำตาลอ่อน พื้นผิวไม่เรียบ สัมผัสค่อนข้างกระด้าง และเส้นใยยังคงเกาะกลุ่มกันอยู่ (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 เส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยสารละลายต่าง 5.0 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาต้ม 120 นาที ร่วมกับสารละลายเอนไซม์ร้อยละ 0.4

### 3.1 ปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด

ผลการศึกษาปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยสารละลายต่าง และสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์ โดยใช้ระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน (ตารางที่ 1) พบว่า กลุ่มเส้นใยเปลือกข้าวโพดแห้งให้ปริมาณเส้นใยเฉลี่ยร้อยละ 24.18-86.67 การแยกเส้นใย

ด้วยสารละลายต่าง ที่มีระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน ให้ปริมาณเส้นใยเฉลี่ยร้อยละ 33.33-86.67 โดยการใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาต้ม 30 นาที ให้ปริมาณเส้นใยมากที่สุด และการใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาต้ม 120 นาที ให้ปริมาณเส้นใยน้อยที่สุด

สำหรับการแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพดด้วยสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์ ที่มีระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน พบว่า ให้ปริมาณเส้นใยเฉลี่ยร้อยละ 24.18-64.73 โดยการใช้สารละลายต่าง ความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร ร่วมกับสารละลายเอนไซม์ร้อยละ 0.4 ระยะเวลาต้ม 30 นาที ให้ปริมาณเส้นใยมากที่สุด และการใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร ร่วมกับสารละลายเอนไซม์ร้อยละ 0.2 ระยะเวลาต้ม 120 นาที ให้ปริมาณเส้นใยน้อยที่สุด

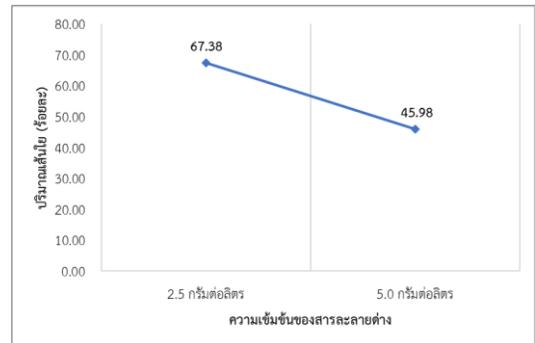
เมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยสารละลายต่าง และสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์ จะเห็นว่า การใช้เอนไซม์ทั้ง 2 ระดับ ให้ปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดน้อยกว่าการใช้สารละลายต่างเพียงอย่างเดียวทุกระยะเวลาต้ม (ค่าเฉลี่ย 69.10 และ 49.40 ตามลำดับ)

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยสารละลายต่าง และสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์ โดยใช้ระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน

ความเข้มข้นของสารละลายต่าง	ระยะเวลาต้ม	ปริมาณเส้นใย (ร้อยละ) ( $\bar{X} \pm SD$ )	ความเข้มข้นของสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์	ระยะเวลาต้ม	ปริมาณเส้นใย (ร้อยละ) ( $\bar{X} \pm SD$ )	
2.5 กรัมต่อลิตร	30 นาที	86.67 ± 15.28	2.5 กรัมต่อลิตร เอนไซม์ ร้อยละ 0.2	30 นาที	61.99 ± 3.87	
	60 นาที	83.33 ± 5.77		60 นาที	61.97 ± 0.73	
	90 นาที	80.00 ± 0.00		90 นาที	59.37 ± 0.69	
	120 นาที	76.67 ± 11.55		120 นาที	56.10 ± 0.98	
	5.0 กรัมต่อลิตร	30 นาที	64.73 ± 0.04	5.0 กรัมต่อลิตร เอนไซม์ ร้อยละ 0.4	30 นาที	64.73 ± 0.04
		60 นาที	61.52 ± 1.33		60 นาที	61.52 ± 1.33
		90 นาที	59.68 ± 0.19		90 นาที	59.68 ± 0.19
		120 นาที	56.60 ± 0.06		120 นาที	56.60 ± 0.06

ความเข้มข้นของสารละลายต่าง	ระยะเวลาต้ม	ปริมาณเส้นใย (ร้อยละ) ( $\bar{X} \pm SD$ )	ความเข้มข้นของสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์		ปริมาณเส้นใย (ร้อยละ) ( $\bar{X} \pm SD$ )
			ระยะเวลาต้ม	ปริมาณเส้นใย (ร้อยละ) ( $\bar{X} \pm SD$ )	
5.0 กรัมต่อลิตร	30 นาที	73.33 $\pm$ 5.77	5.0 กรัมต่อลิตร	30 นาที	53.77 $\pm$ 1.58
	60 นาที	66.67 $\pm$ 5.77	เอนไซม์ ร้อยละ 0.2	60 นาที	47.82 $\pm$ 0.17
	90 นาที	52.78 $\pm$ 4.81		90 นาที	37.26 $\pm$ 0.06
	120 นาที	33.33 $\pm$ 5.77		120 นาที	24.18 $\pm$ 0.64
รวม	69.10 $\pm$ 18.44	รวม		49.40 $\pm$ 13.10	
5.0 กรัมต่อลิตร	30 นาที	52.98 $\pm$ 0.52	5.0 กรัมต่อลิตร	30 นาที	52.98 $\pm$ 0.52
	60 นาที	47.80 $\pm$ 0.53	เอนไซม์ ร้อยละ 0.4	60 นาที	47.80 $\pm$ 0.53
	90 นาที	37.26 $\pm$ 0.06		90 นาที	37.26 $\pm$ 0.06
	120 นาที	24.64 $\pm$ 0.28		120 นาที	24.64 $\pm$ 0.28
รวม	69.10 $\pm$ 18.44	รวม		49.40 $\pm$ 13.10	

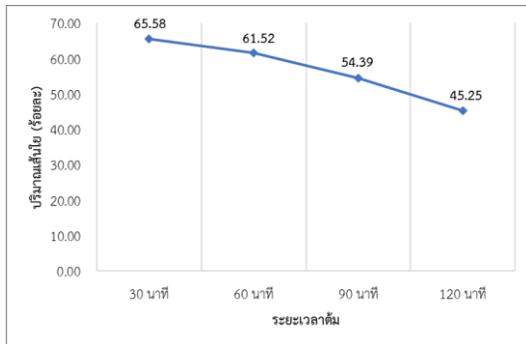
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายต่าง มีผลต่อปริมาณเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p = .000$ ) โดยการใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร ให้ปริมาณเส้นใยมากกว่าการใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร (ร้อยละ 67.38 และ 45.98 ตามลำดับ) (รูปที่ 3) ดังนั้น ความเข้มข้นของสารละลายต่างที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเส้นใยที่ได้ลดลง เพราะสารลิกนิน เอมิเซลลูโลส เพกทินและเส้นใยสั้น ๆ ที่ยึดเกาะกับเส้นใยถูกกำจัดออกไปมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ N. D. Yilmaz [8] ที่พบว่าการใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นในการแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพด ส่งผลให้ปริมาณเส้นใยที่ได้ลดลง และสอดคล้องกับงานวิจัยของ L. Nortoualee [7] ที่พบว่า การต้มฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จะทำให้ได้ปริมาณเยื่อ (%Yield) ลดลง เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับลิกนิน ทำให้พันธะระหว่างลิกนินกับคาร์โบไฮเดรตถูกทำลายมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเยื่อลดลง



รูปที่ 3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายต่างต่อปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด

ระยะเวลาต้ม มีผลต่อปริมาณเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p = .000$ ) โดยการใช้ระยะเวลาต้ม 30 60 90 และ 120 นาที ให้ปริมาณเส้นใยเฉลี่ยร้อยละ 65.58 61.52 54.39 และ 45.25 ตามลำดับ (รูปที่ 4) ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยพบว่า การใช้ระยะเวลาต้ม 30 นาที ให้ปริมาณเส้นใยมากกว่าการใช้ระยะเวลาต้ม 90 และ 120 นาที การใช้ระยะเวลาต้ม 60 นาที ให้ปริมาณเส้นใยมากกว่าการใช้ระยะเวลาต้ม 90 และ 120 นาที และการใช้ระยะเวลาต้ม 90 นาที

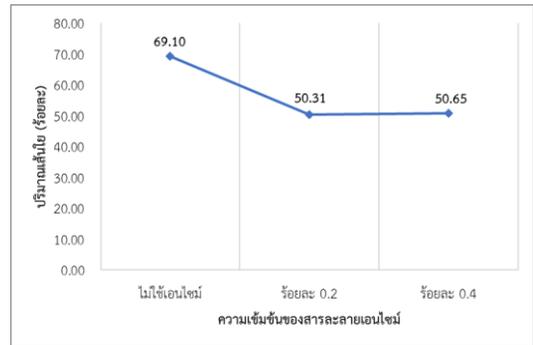
ให้ปริมาณเส้นใยมากกว่าการใช้ระยะเวลาต้ม 120 นาที ดังนั้น การเพิ่มระยะเวลาต้มส่งผลให้ปริมาณเส้นใยที่ลดลง เนื่องจากระยะเวลาที่นานขึ้นทำให้เส้นใยแตกตัว และแผ่นเยื่อบางที่เกาะเส้นใยอยู่หลุดจากเส้นใยมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเส้นใยลดลง ผลการทดลองไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ K. Kanchanakarn et al [9] ที่พบว่า ระยะเวลาต้มกาบไผ่ตงแห้งที่แตกต่างกัน มีผลต่อปริมาณเส้นใยที่ได้ โดยเมื่อระยะเวลาต้มเพิ่มขึ้น ปริมาณเส้นใยที่ได้จะเพิ่มมากขึ้น เพราะกาบไผ่ตงมีโครงสร้างที่แข็ง หนาแน่น และเหนียวกว่าเปลือกข้าวโพด การใช้ระยะเวลาต้มน้อยอาจยังไม่เพียงพอที่จะสลายลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสที่ยึดเกาะเส้นใยไว้ ทำให้ได้เส้นใยออกมาน้อย เมื่อเพิ่มระยะเวลาต้ม สารยึดเกาะเหล่านี้ค่อย ๆ ถูกสลายมากขึ้น ทำให้สามารถแยกเส้นใยออกมาได้มากขึ้น



รูปที่ 4 ผลของระยะเวลาต้มต่อปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด

ความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ มีผลต่อปริมาณเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p = .000$ ) โดยการใช้สารละลายต่างเพียงอย่างเดียวโดยไม่ใช้เอนไซม์ การใช้สารละลายเอนไซม์ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 และ 0.4 ให้ปริมาณเส้นใยเฉลี่ยร้อยละ 69.10 50.31 และ 50.65 ตามลำดับ (รูปที่ 5) ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยพบว่า การใช้สารละลายต่างเพียงอย่างเดียวโดยไม่ใช้เอนไซม์ ให้ปริมาณเส้นใยมากกว่า

การใช้สารละลายเอนไซม์ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 และ 0.4 ทั้งนี้การใช้สารละลายเอนไซม์ ส่งผลให้ปริมาณเส้นใยลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการที่เซลลูโลสส่วนอนิสฐานในผนังเซลล์ชั้นนอกถูกเอนไซม์เซลลูเลสย่อยสลาย

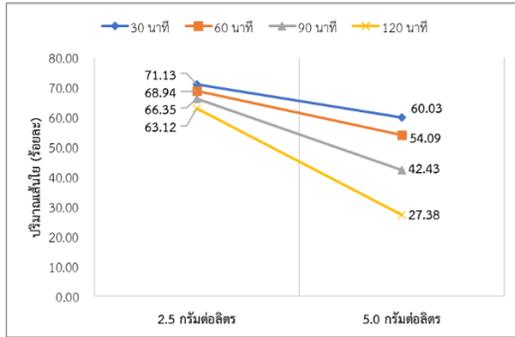


รูปที่ 5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ต่อปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายต่างกับระยะเวลาต้ม มีผลต่อปริมาณเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p = .000$ ) ดังนี้

1) การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาต้ม 30 60 90 และ 120 นาที ให้ปริมาณเส้นใยเฉลี่ยร้อยละ 71.13 68.94 66.35 และ 63.12 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยพบว่า การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาต้ม 30 นาที ให้ปริมาณเส้นใยมากกว่าระยะเวลาต้ม 120 นาที (รูปที่ 6)

2) การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาต้ม 30 60 90 และ 120 นาที ให้ปริมาณเส้นใยเฉลี่ยร้อยละ 60.03 54.09 42.43 และ 27.38 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยพบว่า การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาต้ม 30 และ 60 นาที ให้ปริมาณเส้นใยมากกว่าระยะเวลาต้ม 90 และ 120 นาที และการใช้ระยะเวลาต้ม 90 นาที ให้ปริมาณเส้นใยมากกว่าระยะเวลาต้ม 120 นาที (รูปที่ 6)



**รูปที่ 6** ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายต่างกับระยะเวลาต้ม ต่อปริมาณเส้นใยเปลือกข้าวโพด

ผลการทดลองนี้ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Tosawat [10] ที่พบว่า การแยกเส้นใยจากฝั่สึสุดด้วยการใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาต้มน้อย ทำให้ได้ปริมาณเส้นใยน้อยกว่าการใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นมากและระยะเวลาต้มมาก เนื่องจากความเข้มข้นและระยะเวลาต้มที่น้อยไม่เพียงพอสำหรับการทำให้เส้นใยแตกตัว ซึ่งอาจเป็นเพราะกาบฝั่สึสุดมีความแข็งแรงต่างกว่าจึงต้องใช้ความเข้มข้นกับระยะเวลาต้มมากกว่า

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายต่างกับความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาต้มกับความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 3 ปัจจัย ไม่มีผลต่อปริมาณเส้นใยน้อยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p = .210 .813$  และ  $.965$  ตามลำดับ)

### 3.2 ความยาวเส้นใยเปลือกข้าวโพด

ผลการศึกษาความยาวของเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยสารละลายต่าง และสารละลายต่าง

ร่วมกับสารละลายเอนไซม์ โดยใช้ระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน (ตารางที่ 2) พบว่า เส้นใยเปลือกข้าวโพดมีความยาวเฉลี่ย 125.13-140.98 มิลลิเมตร จัดเป็นเส้นใยสั้นแบบยาว (Long Staple Fibers) ตามเกณฑ์การแบ่งประเภทเส้นใยสั้นของ B. C. Goswami et al. [11] ที่กำหนดว่าเส้นใยที่มีความยาวตั้งแต่ 50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) ขึ้นไป จัดเป็นเส้นใยสั้นแบบยาว การแยกเส้นใยด้วยสารละลายต่าง ที่มีระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน พบว่า เส้นใยมีความยาวเฉลี่ย 130.50-139.69 มิลลิเมตร โดยการใช้สารละลายต่าง ความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาต้ม 90 นาที ได้เส้นใยาวที่สุด และระยะเวลาต้ม 120 นาที ได้เส้นใยสั้นที่สุด

สำหรับการแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพดด้วยสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์ ที่มีระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน พบว่า เส้นใยมีความยาวเฉลี่ย 125.13-140.98 มิลลิเมตร โดยการใช้สารละลายต่าง ความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร ร่วมกับสารละลายเอนไซม์ร้อยละ 0.2 ระยะเวลาต้ม 60 นาที ได้เส้นใยาวที่สุด และการใช้สารละลายต่าง ความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร ร่วมกับสารละลายเอนไซม์ร้อยละ 0.2 ระยะเวลาต้ม 120 นาที ได้เส้นใยสั้นที่สุด

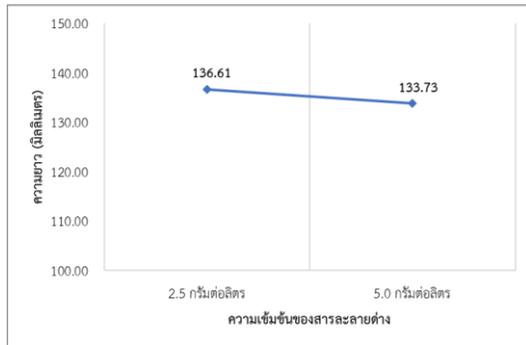
เมื่อพิจารณาความยาวเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยสารละลายต่าง และสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์ จะเห็นว่า การใช้เอนไซม์ทั้ง 2 ระดับ เส้นใยเปลือกข้าวโพดมีความยาวใกล้เคียงกับการใช้สารละลายต่างเพียงอย่างเดียวทุกระยะเวลาต้ม (ค่าเฉลี่ย 135.52 และ 134.99 ตามลำดับ)

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยความยาวเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยสารละลายต่างและสารละลายต่างร่วมกับสารละลาย เอนไซม์ โดยใช้ระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน

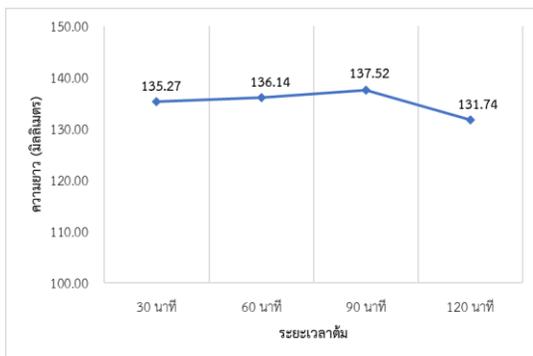
ความเข้มข้นของ สารละลายต่าง	ระยะเวลาต้ม	ความยาวเส้นใย (มม.) ( $\bar{X} \pm SD$ )	ความเข้มข้นของ สารละลายต่างร่วมกับ สารละลายเอนไซม์	ระยะเวลาต้ม	ความยาวเส้นใย (มม.) ( $\bar{X} \pm SD$ )				
2.5 กรัมต่อลิตร	30 นาที	135.46 ± 4.96	2.5 กรัมต่อลิตร เอนไซม์ ร้อยละ 0.2	30 นาที	135.33 ± 4.74				
	60 นาที	137.52 ± 5.53		60 นาที	140.98 ± 0.79				
	90 นาที	139.69 ± 1.54		90 นาที	137.50 ± 9.84				
	120 นาที	130.50 ± 3.41		120 นาที	132.19 ± 1.74				
	5.0 กรัมต่อลิตร			2.5 กรัมต่อลิตร เอนไซม์ ร้อยละ 0.4	30 นาที	137.83 ± 3.89			
					60 นาที	140.38 ± 4.58			
					90 นาที	134.55 ± 7.23			
					120 นาที	137.37 ± 0.16			
5.0 กรัมต่อลิตร	30 นาที	138.33 ± 7.24	5.0 กรัมต่อลิตร เอนไซม์ ร้อยละ 0.2	30 นาที	133.28 ± 2.46				
						60 นาที	133.13 ± 5.34	60 นาที	136.44 ± 3.68
						90 นาที	137.16 ± 3.95	90 นาที	138.40 ± 9.28
						120 นาที	132.40 ± 3.65	120 นาที	125.13 ± 0.58
					5.0 กรัมต่อลิตร เอนไซม์ ร้อยละ 0.4	30 นาที	131.37 ± 3.18		
						60 นาที	128.39 ± 5.73	60 นาที	128.39 ± 5.73
						90 นาที	137.83 ± 1.12	90 นาที	137.83 ± 1.12
						120 นาที	132.84 ± 2.91	120 นาที	132.84 ± 2.91
รวม		135.52 ± 5.00	รวม		134.99 ± 5.52				

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ย ความยาวเส้นใยเปลือกข้าวโพด พบว่า ความเข้มข้นของ สารละลายต่าง มีผลต่อความยาวเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ ( $p = .034$ ) โดยการใช้สารละลายต่างความ เข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร ได้เส้นใยที่มีความยาวมากกว่า การใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร (136.61 และ 133.73 มิลลิเมตร ตามลำดับ) (รูปที่ 7)

ระยะเวลาต้ม มีผลต่อความยาวเส้นใยอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ( $p = .024$ ) โดยการใช้ระยะเวลาต้ม 30 60 90 และ 120 นาที ได้เส้นใยที่มีความยาวเฉลี่ย 135.27 136.14 137.52 และ 131.74 มิลลิ เมตร ตามลำดับ (รูปที่ 8) ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของ ค่าเฉลี่ยพบว่า การใช้ระยะเวลาต้ม 60 และ 90 นาที ได้ เส้นใยที่มีความยาวมากกว่าระยะเวลาต้ม 120 นาที



รูปที่ 7 ผลของความเข้มข้นของสารละลายต่างต่อความยาวเส้นใยเปลือกข้าวโพด



รูปที่ 8 ผลของระยะเวลาต้มต่อความยาวเส้นใยเปลือกข้าวโพด

จากผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายต่างและระยะเวลาต้ม ส่งผลให้ความยาวของเส้นใยลดลง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายต่างเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic) ในเซลลูโลสจะเกิดเร็วขึ้น ทำให้โซโมเลกุลของเซลลูโลสถูกตัดเป็นชิ้นเล็กลง ส่งผลให้เส้นใยเกิดการสลายตัวและมีความยาวลดลง [12] นอกจากนี้ ความเข้มข้นของสารละลายต่างที่สูงอาจทำให้เกิดการกักตัวของโครงสร้างเส้นใย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการต้มเป็นเวลานาน

ความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายต่างกับระยะเวลาต้ม ความเข้มข้นของสารละลายต่างกับความเข้มข้นของ

สารละลายเอนไซม์ และระยะเวลาต้มกับความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 3 ปัจจัย ไม่มีผลต่อความยาวเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p = .913 .243 .357 .364$  และ  $.519$  ตามลำดับ)

### 3.3 ขนาดเส้นใยเปลือกข้าวโพด

ผลการศึกษขนาดของเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยสารละลายต่าง และสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์ โดยใช้ระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน (ตารางที่ 3) พบว่า เส้นใยเปลือกข้าวโพดมีขนาดเฉลี่ย 31.19-64.32 เทกซ์ จัดเป็นเส้นใยหยาบตามเกณฑ์การจำแนกขนาดเส้นใยฝ้ายตามความละเอียดของ J. G. Cook [13] การแยกเส้นใยด้วยสารละลายต่าง ที่มีระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน เส้นใยมีขนาดเฉลี่ย 34.46-64.32 เทกซ์ โดยการ ใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาต้ม 30 นาที ได้เส้นใยขนาดใหญ่ที่สุด และการใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาต้ม 90 นาที ได้เส้นใยขนาดเล็กที่สุด สำหรับการแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพดด้วยสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์ ที่มีระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน พบว่า เส้นใยมีขนาดเฉลี่ย 31.19-46.81 เทกซ์ โดยการใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร ร่วมกับสารละลายเอนไซม์ร้อยละ 0.2 ระยะเวลาต้ม 90 นาที ได้เส้นใยขนาดใหญ่ที่สุด และการใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร ร่วมกับสารละลายเอนไซม์ร้อยละ 0.4 ระยะเวลาต้ม 90 นาที ได้เส้นใยขนาดเล็กที่สุด

เมื่อพิจารณาขนาดเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยสารละลายต่าง และสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์ จะเห็นว่า การใช้เอนไซม์ทั้ง 2 ระดับให้ขนาดเส้นใยเปลือกข้าวโพดเล็กกว่าการใช้สารละลายต่างเพียงอย่างเดียวเกือบทุกระยะเวลาต้ม (ค่าเฉลี่ย 46.56 และ 39.56 ตามลำดับ)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยขนาดเส้นใย พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายต่าง มีผลต่อขนาดเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p = .005$ )

โดยการใช้สารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร ได้เส้นใยที่มีขนาดใหญ่กว่าการใช้ความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร (44.37 และ 39.41 เท็กซ์ ตามลำดับ) (รูปที่ 9)

**ตารางที่ 3** ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยสารละลายต่าง และสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์ โดยใช้ระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน

ความเข้มข้นของต่าง	ระยะเวลาต้ม	ขนาดเส้นใย (เท็กซ์) ( $\bar{X} \pm SD$ )	ความเข้มข้นของต่างร่วมกับเอนไซม์	ระยะเวลาต้ม	ขนาดเส้นใย (เท็กซ์) ( $\bar{X} \pm SD$ )
2.5 กรัมต่อลิตร	30 นาที	64.32 ± 10.58	2.5 กรัมต่อลิตร เอนไซม์ ร้อยละ 0.2	30 นาที	42.82 ± 2.68
	60 นาที	52.19 ± 5.09		60 นาที	41.86 ± 1.24
	90 นาที	44.31 ± 1.46		90 นาที	46.81 ± 7.47
	120 นาที	40.02 ± 2.28		120 นาที	42.22 ± 0.56
2.5 กรัมต่อลิตร			2.5 กรัมต่อลิตร เอนไซม์ ร้อยละ 0.4	30 นาที	41.50 ± 10.41
				60 นาที	37.63 ± 7.84
				90 นาที	39.48 ± 3.17
				120 นาที	39.30 ± 12.93
5.0 กรัมต่อลิตร	30 นาที	46.93 ± 3.59	5.0 กรัมต่อลิตร เอนไซม์ ร้อยละ 0.2	30 นาที	43.55 ± 2.92
	60 นาที	45.85 ± 2.40		60 นาที	36.63 ± 1.09
	90 นาที	34.46 ± 0.53		90 นาที	37.11 ± 7.60
	120 นาที	44.38 ± 11.18		120 นาที	33.89 ± 1.06
			5.0 กรัมต่อลิตร เอนไซม์ ร้อยละ 0.4	30 นาที	42.51 ± 9.73
		60 นาที		34.96 ± 3.95	
		90 นาที		31.19 ± 2.82	
		120 นาที		41.52 ± 3.34	
<b>รวม</b>		<b>46.56 ± 9.82</b>	<b>รวม</b>		<b>39.56 ± 5.93</b>

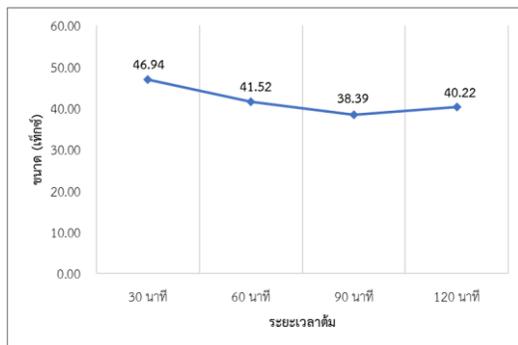


**รูปที่ 9** ผลของความเข้มข้นของสารละลายต่างต่อขนาดเส้นใยเปลือกข้าวโพด

ระยะเวลาต้ม มีผลต่อขนาดเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p = .009$ ) โดยการใช้ระยะเวลาต้ม 30 60 90 และ 120 นาที ได้เส้นใยที่มีขนาดเฉลี่ย 46.94 41.52 38.39 และ 40.22 เท็กซ์ ตามลำดับ (รูปที่ 10) ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยพบว่า การใช้ระยะเวลาต้ม 30 นาที ได้เส้นใยที่มีขนาดใหญ่กว่าการใช้ระยะเวลาต้ม 60 90 และ 120 นาที

จากผลการวิจัยพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายต่างและระยะเวลาต้มที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง เนื่องจากการใช้สารละลายต่างที่มี

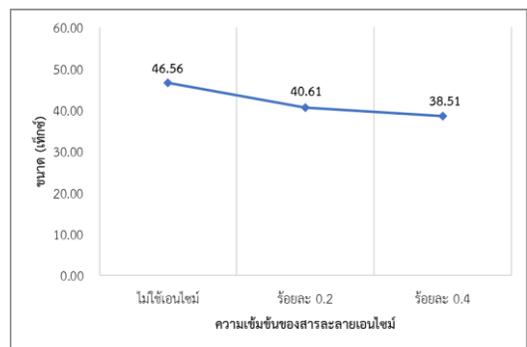
ความเข้มข้นสูงและระยะเวลาต้มที่เพิ่มขึ้น จะทำให้เส้นใยเกิดการเปื่อยยุ่ยมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Tosawat [10] ที่พบว่า การใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูงและระยะเวลาต้มที่มาก ทำให้เส้นใยไผ่สีสุกมีขนาดเล็กกว่าการใช้สารละลายความเข้มข้นต่ำและระยะเวลาน้อย และสอดคล้องกับงานวิจัยของ W. Lojareonrat [14] ที่พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการปั่นกวนฟางข้าว ทำให้เส้นใยที่ได้มีลักษณะเรียวยาวและอ่อนนุ่มขึ้น ซึ่งช่วยให้มีสมบัติการเกาะเกี่ยวที่ดีขึ้น



รูปที่ 10 ผลของระยะเวลาต้มต่อขนาดเส้นใยเปลือกข้าวโพด

ความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ มีผลต่อขนาดเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p = .001$ ) โดยการใช้สารละลายต่างเพียงอย่างเดียวโดยไม่ใช้เอนไซม์ การใช้สารละลายเอนไซม์ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 และ 0.4 ได้เส้นใยที่มีขนาดเฉลี่ย 46.56 40.61 และ 38.51 เท็กซ์ ตามลำดับ (รูปที่ 11) ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยพบว่า การใช้สารละลายต่างเพียงอย่างเดียวโดยไม่ใช้เอนไซม์ ได้เส้นใยที่มีขนาดใหญ่กว่าการใช้สารละลายเอนไซม์ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 และ 0.4 จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลายเอนไซม์ส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเอนไซม์เซลลูเลสสามารถย่อยสลายเซลลูโลสในส่วนอสัณฐานที่ผนังเซลล์ชั้นนอกออก ทำให้โครงสร้างของเส้นใยแตก

ออกเป็นชิ้นเล็กลง [15] ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ N. D. Yilmaz et al. [16] ที่พบว่า การใช้เอนไซม์ทำให้เส้นใยเปลือกข้าวโพดมีขนาดเล็กลง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายต่างกับระยะเวลาต้ม ความเข้มข้นของสารละลายต่างกับความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ และระยะเวลาต้มกับความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 3 ปัจจัย ไม่มีผลต่อขนาดเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p = .344 .400 .085$  และ  $.218$  ตามลำดับ)



รูปที่ 11 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ต่อขนาดเส้นใยเปลือกข้าวโพด

จากผลการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 3 ปัจจัยพบว่า ไม่มีผลต่อความยาวและขนาดเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากปัจจัยแต่ละชนิดมีบทบาทต่อกระบวนการแยกเส้นใยในลักษณะที่เป็นอิสระต่อกัน กล่าวคือ สารละลายต่างมีหน้าที่หลักในการละลายลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเพกทินที่ยึดเกาะเส้นใย ส่วนระยะเวลาต้มมีผลต่อระดับการสลายตัวของสารยึดเกาะดังกล่าว ขณะที่เอนไซม์ทำหน้าที่ย่อยสลายเซลลูโลสในส่วนที่ไม่เป็นผลึกของผนังเซลล์ แม้ทั้ง 3 ปัจจัยจะมีผลต่อโครงสร้างเส้นใย แต่เมื่อใช้ร่วมกันกลับไม่ก่อให้เกิดผลเสริมซ้อน (Synergistic Effect) ที่เพียงพอจะทำให้โครงสร้างเส้นใยแตกสลายจนส่งผลต่อความยาวและขนาดเส้นใยได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การใช้เอนไซม์ภายหลัง อาจทำให้การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นใน

ขั้นตอนการต้มด้วยสารละลายต่างไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์โดยตรง จึงไม่เกิดความแตกต่างด้านความยาวและขนาดเส้นใยจากปฏิสัมพันธ์ของทั้ง 3 ปัจจัย

#### 4. สรุป

การแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพดหวานพันธุ์อินทรี 2 ด้วยสารละลายต่าง และสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์ โดยใช้ระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน พบว่า 1) การแยกเส้นใยด้วยสารละลายต่าง ที่มีระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน ให้ปริมาณเส้นใยเฉลี่ยร้อยละ 33.33-86.67 สำหรับการแยกเส้นใยด้วยสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์ ที่มีระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน ให้ปริมาณเส้นใยเฉลี่ยร้อยละ 24.18-64.73 2) การแยกเส้นใยด้วยสารละลายต่าง ที่มีระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน เส้นใยมีความยาวเฉลี่ย 130.50-139.69 มิลลิเมตร สำหรับการแยกเส้นใยด้วยสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์ ที่มีระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน เส้นใยมีความยาวเฉลี่ย 125.13-140.98 มิลลิเมตร และ 3) การแยกเส้นใยด้วยสารละลายต่าง ที่มีระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน เส้นใยมีขนาดเฉลี่ย 34.46-64.32 เท็กซ์ สำหรับการแยกเส้นใยด้วยสารละลายต่างร่วมกับสารละลายเอนไซม์ ที่มีระยะเวลาต้มและความเข้มข้นต่างกัน เส้นใยมีขนาดเฉลี่ย 31.19-46.81 เท็กซ์

ปัจจัยความเข้มข้นของสารละลายต่าง ระยะเวลาต้ม และความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ ส่งผลต่อปริมาณ ความยาว และขนาดของเส้นใยเปลือกข้าวโพด ดังนี้

1) ความเข้มข้นของสารละลายต่าง ระยะเวลาต้ม ความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายต่างกับระยะเวลาต้ม มีผลต่อปริมาณเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ( $p \leq .05$ ) ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายต่างกับความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ ระยะเวลาต้มกับความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 3 ปัจจัย ไม่มีผลต่อปริมาณเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > .05$ )

2) ความเข้มข้นของสารละลายต่าง และระยะเวลาต้ม มีผลต่อความยาวเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq .05$ ) ส่วนความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 2 ปัจจัย และปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 3 ปัจจัย ไม่มีผลต่อความยาวเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > .05$ )

3) ความเข้มข้นของสารละลายต่าง ระยะเวลาต้ม และความเข้มข้นของสารละลายเอนไซม์ มีผลต่อขนาดเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq .05$ ) ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 2 ปัจจัย และปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 3 ปัจจัย ไม่มีผลต่อขนาดเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > .05$ )

จากผลการศึกษาชี้แนะว่า การแยกเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 สำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ สำหรับผลิตภัณฑ์เสื้อผ้าเครื่องแต่งกายที่ต้องการเส้นใยละเอียด ควรแยกด้วยสารละลายต่างความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ร่วมกับสารละลายเอนไซม์ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 ระยะเวลาต้ม 120 นาที สภาวะดังกล่าวให้เส้นใยที่มีความยาวน้อยที่สุดและขนาดเล็กที่สุด และสำหรับผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ต้องการผ้าที่มีผิวสัมผัส ควรแยกด้วยสารละลายต่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาต้ม 30 นาที ซึ่งให้เส้นใยที่มีความยาวมากที่สุดและขนาดใหญ่ที่สุด อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติอื่น ๆ ของเส้นใยเพิ่มเติม ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางเคมี เพื่อสนับสนุนการนำเส้นใยเปลือกข้าวโพดไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมสิ่งทอหรืออุตสาหกรรมอื่นได้ในอนาคต

## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bureau of Agricultural Commodities Promotion and Management, "Crop Production Situation for 2023/24: Field Corn," [Online]. <http://www.agriman.doe.go.th/home/news/year2567.html>. [Accessed: Nov. 15, 2024].
- [2] W. Tamthong, "The effects of corn varieties, layers of corn husk and fiber extraction methods on yield, chemical compositions and properties of corn husk fibers." Ph.D. dissertation, Dept. Homec., Kasetsart Univ., Bangkok., Thailand, 2019.
- [3] P. Wangwan, W. Tamthong, and S. Kraisuwan, "Fibrous webs from corn husks," in *Proceeding of the 55<sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference*, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 2017, pp. 969-976.
- [4] T. Tubsawat, P. Khamsong, S. Juljermasak, W. Tamthong, and S. Kraisuwan, "Physical properties of corn husk fiber bundles from animal feed corn husks and sweet corn husks," in *Proceeding of the 56<sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference*, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 2018, pp. 829-836.
- [5] D. Rastogi, A. Jain, and B. Chanana, "Development of sanitary napkins using corn husk fibres in absorbent layer-an exploratory study," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 51, no. 2, pp. 2267S-2282S, Jun. 2022.
- [6] K. S. Chun, T. Maimunah, C. M. Yeng, T. K. Yeow, and O. T. Kiat, "Properties of corn husk fibre reinforced epoxy composites fabricated using vacuum-assisted resin infusion," *Journal of Physical Science*, vol. 31, no. 3, pp. 17-31, 2020.
- [7] L. Nortoualee, "Increasing the value of rice straw by producing packaging paper," M.S. thesis, Off. Acad. Admin. Dev., Maejo Univ., Chiang Mai, Thailand, 2021.
- [8] N. D. Yilmaz, "Effect of chemical extraction parameters on corn husk fibres characteristics," *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, No. 38, pp. 29-34, Mar. 2013.
- [9] K. Kanchanakarn, S. R. N- Phuket, and K. Piromthamsiri, "Characteristics of bamboo fibers obtained from boiling *Dendrocalamus Asper* baker sheath in sodium hydroxide solution," *Journal of Home Economics*, vol. 58, no. 3, pp. 54-63, Sep.-Dec. 2015.
- [10] S. Tosawat, "A study on the extraction of bamboo fiber from *Bambusa Blumeana schult* to use as textile raw material," M.S. thesis, Fac. Eng., RMUTT, Pathum Thani, Thailand, 2011.
- [11] B. C. Goswami, R. D. Anandjiwala, and D. M. Hall, *Textile sizing*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [12] P. Ivars, B. Hans, H. Jessika, and B. Allard, "Alkaline degradation of cellulose: mechanisms and kinetics," *Journal of*

- Polymers and the Environment*, vol 11, no.2, pp. 39-47, Apr. 2003.
- [13] J. G. Cook. *Handbook of textile fibers vol.1 natural fibres*, 6<sup>th</sup> ed. Delhi: Replika Press Pvt Ltd., 2001.
- [14] W. Lojareonrat, "The production of thermal insulation from rice straw fiber and natural rubber latex," *Kasetsart Engineering Journal*, vol. 19, no. 57, pp. 32-45, Dec.-Mar. 2006.
- [15] *Handbook of Natural Fibres, Volume 2: Processing and Applications*, Padstow, Cornwall, UK: TJ International Ltd., 2012.
- [16] N. D., Yilmaz, E. Çalışkan, and K. Yilmaz, "Effect of xylanase enzyme on mechanical properties of fibres extracted from undried and dried corn husks," *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, vol. 39, pp. 60-64, Mar. 2014.

## การเปรียบเทียบตัวแบบ GM(1,1), DGM(1,1), FGM(1,1) และ FDGM(1,1) สำหรับการทำนายจำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม

ศวิตา ทองขุนวงศ์<sup>1\*</sup> และ ภัคพล สวัสดิ์กมล<sup>2</sup>

<sup>1</sup>โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>2</sup>สาขาวิชาคณิตศาสตร์และภูมิสารสนเทศ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>1,2</sup>111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

---

รับบทความ 6 พฤษภาคม 2568 แก้ไขบทความ 2 ตุลาคม 2568 ตอรับบทความ 20 ตุลาคม 2568

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบทำนายข้อมูลอนุกรมเวลาของผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม จำนวน 4 ตัวแบบ ได้แก่ ตัวแบบระบบเกรย์ GM(1,1) ตัวแบบเกรย์แยกส่วน DGM(1,1) ตัวแบบ FGM(1,1) และตัวแบบ FDGM(1,1) โดยตัวแบบ FGM(1,1) และ FDGM(1,1) ได้รับการปรับปรุงความแม่นยำในการพยากรณ์ด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ ใช้ข้อมูลรายปีจากสถาบันมะเร็งแห่งชาติในการวิเคราะห์ ประสิทธิภาพของตัวแบบประเมินด้วยค่าเฉลี่ยร้อยละของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) ผลการศึกษาพบว่า ตัวแบบ FDGM(1,1) ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยมีค่า MAPE เท่ากับ 15.25% ขณะที่ตัวแบบ GM(1,1), DGM(1,1) และ FGM(1,1) ให้ค่า MAPE เท่ากับ 17.78%, 17.41% และ 15.49% ตามลำดับ ทั้งนี้ เกณฑ์ของสำนักงานสถิติแห่งชาติระบุว่า หากค่า MAPE อยู่ระหว่าง 10%–20% ถือว่าตัวแบบมีความแม่นยำในระดับค่อนข้างดี ดังนั้น สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงสรุปได้ว่า ตัวแบบ FDGM(1,1) มีความเหมาะสมที่สุดในการใช้ทำนายจำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม

**คำสำคัญ :** ตัวแบบเกรย์; อนุกรมฟูรีเยร์; ตัวแบบ FDGM(1,1)

# Comparison of GM(1,1), DGM(1,1), FGM(1,1), and FDGM(1,1) Models for Forecasting Breast Cancer Cases

Sawita Thongkunwong<sup>1\*</sup> and Phakkhaphon Sawatkamon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Suranaree University of Technology Hospital, Suranaree University of Technology

<sup>2</sup>School of Mathematical Sciences and Geoinformatics, Institute of Science, Suranaree University of Technology

<sup>1,2</sup>111 University Avenue, Suranaree Subdistrict, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000

---

*Received 6 May 2025; Revised 2 October 2025; Accepted 20 October 2025*

## Abstract

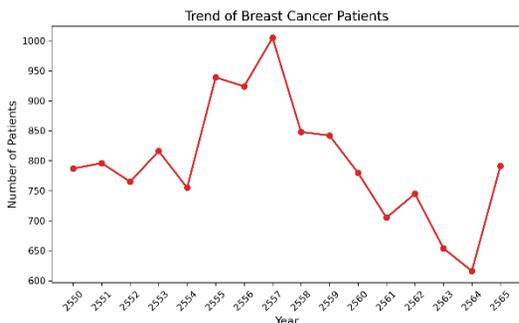
The objective of this study is to compare the forecasting performance of four time series models for predicting the number of breast cancer patients. The models considered include the Grey Model GM(1,1), the Discrete Grey Model DGM(1,1), the Fourier Grey Model FGM(1,1), and the Fourier Discrete Grey Model FDGM(1,1). The FGM(1,1) and FDGM(1,1) models were enhanced using Fourier series to improve forecasting accuracy. Annual data from the National Cancer Institute were used for the analysis. Model performance was evaluated using the Mean Absolute Percentage Error (MAPE). The results show that the FDGM(1,1) model achieved the highest accuracy, with a MAPE value of 15.25%, whereas the GM(1,1), DGM(1,1), and FGM(1,1) models yielded MAPE values of 17.78%, 17.41%, and 15.49%, respectively. According to the National Statistical Office's criteria, a MAPE between 10% and 20% indicates a reasonably accurate forecasting model. Therefore, it can be concluded that, for this study, the FDGM(1,1) model is the most appropriate choice for forecasting the number of breast cancer patients.

**Keywords :** Grey models; Fourier series; FDGM(1,1) model

## 1. บทนำ

ข้อมูลจากสถาบันมะเร็งแห่งชาติ พ.ศ. 2564 ระบุว่า มะเร็งที่พบมากที่สุดในเพศหญิงเป็น 3 อันดับแรก ได้แก่ มะเร็งเต้านม มะเร็งปากมดลูกและมะเร็งลำไส้ โดยมะเร็งเต้านมเป็นชนิดที่มีอุบัติการณ์มากที่สุดในผู้หญิงไทย [1] ทั้งนี้ มะเร็งเต้านมสามารถเกิดขึ้นในเพศชายได้ในอัตราส่วนประมาณ 1 ใน 100 ของผู้ป่วยมะเร็งเต้านมทั้งหมด [2] ในระดับสากล องค์การอนามัยโลก (WHO) รายงานว่ามีผู้ป่วยมะเร็งเต้านมรายใหม่ทั่วโลกราว 2.3 ล้านคน และมีอัตราการเสียชีวิตราวประมาณ 685,000 คนต่อปี [3] ปัจจัยเสี่ยงที่สัมพันธ์กับการเกิดโรคมะเร็งเต้านม ได้แก่ อายุที่มากขึ้น พันธุกรรมภาวะอ้วน มีประจำเดือนครั้งแรกก่อนอายุ 12 ปี มีประวัติเคยเป็นมะเร็งเต้านม มีบุตรคนแรกมากกว่าอายุ 30 ปี การได้รับฮอร์โมนเอสโตเจนเป็นเวลานาน [4] อย่างไรก็ตาม โรคมะเร็งเต้านมหากได้รับการวินิจฉัยและรักษาในระยะแรกเริ่ม จะสามารถรักษาให้มีโอกาสรอดชีวิตสูงขึ้นและช่วยลดอัตราการเสียชีวิตลงได้ [2]

การคาดการณ์จำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านมในอนาคตเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้หน่วยงานสาธารณสุขสามารถกำหนดแนวทางป้องกัน วางแผนการรักษา และบริหารจัดการทรัพยากรทางการแพทย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อรองรับการรักษาผู้ป่วยที่เกิดขึ้นในอนาคต



รูปที่ 1 แสดงจำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านมจากสถาบันมะเร็งแห่งชาติช่วงปี พ.ศ. 2550-2565

ข้อมูลแสดงให้เห็นว่า จำนวนผู้ป่วยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงปี 2550-2557 โดยมีจุดสูงสุดที่ 1,005 รายในปี 2557 หลังจากนั้นจำนวนผู้ป่วยมีความผันผวนและลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป โดยเฉพาะในช่วงปี 2563-2564 ที่มีจำนวนผู้ป่วยลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับช่วงการระบาดของโรคโควิด-19 ที่ส่งผลให้ประชาชนจำนวนมากไม่สะดวกในการเข้ารับการตรวจคัดกรองและการวินิจฉัย ส่งผลให้ตัวเลขผู้ป่วยรายใหม่ที่ถูกรายงานลดลงชั่วคราว ลักษณะของข้อมูลที่มีความผันผวนในบางช่วงและไม่ได้เป็นเส้นแนวโน้มที่ราบเรียบ แสดงให้เห็นว่า ข้อมูลนี้มีความไม่แน่นอนและไม่เป็นเส้นตรงชัดเจน จึงเหมาะสมกับการใช้แบบจำลองระบบเกรย์ (Grey Models) ซึ่งสามารถประมวลผลข้อมูลจำนวนน้อยและข้อมูลที่มีความไม่แน่นอนได้อย่างยืดหยุ่น ตรงกันข้ามกับแบบจำลองเชิงสถิติแบบพื้นฐาน เช่น Moving Average หรือ ARIMA ที่มีข้อสมมติว่าข้อมูลควรมีความนิ่ง (stationary) และมีจำนวนตัวอย่างมากพอ ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับชุดข้อมูลที่มีความผันผวนและขนาดเล็กเช่นนี้

ทฤษฎีระบบเกรย์ถูกสร้างขึ้นโดยนักคณิตศาสตร์ชาวจีน J. Deng ในปี ค.ศ. 1982 มีจุดเด่นในการนำไปใช้กับข้อมูลที่มีขนาดเล็กหรือไม่สมบูรณ์ จึงเหมาะสมอย่างยิ่งกับปัญหาที่มีข้อมูลจำกัด ทฤษฎีระบบเกรย์ถูกประยุกต์ใช้ในหลายสาขา เช่น การแพทย์ วิศวกรรม และการเกษตร เป็นต้น [5] ตัวอย่างงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีระบบเกรย์ เช่น การนำตัวแบบทฤษฎีระบบเกรย์ไปทำนายจำนวนผู้เสียชีวิตจากโรคปอดบวมและโรคเลือดออกในสมอง ผลการศึกษาพบว่าตัวแบบทำนายจำนวนผู้เสียชีวิตจากโรคปอดบวมและโรคเลือดออกในสมองให้ค่า MAPE เท่ากับ 2.83% และ 1.20% ตามลำดับ [6] การนำตัวแบบ GM(1,1) ไปพยากรณ์ค่าฝุ่น PM10 ในบริเวณภาคเหนือตอนบน ผลการพยากรณ์พบว่าในช่วงปี 2557 – 2560 ฝุ่น PM10

มีแนวโน้มที่จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น [7] อีกทั้งยังมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแบบจำลอง GM(1,1) และแบบจำลองเกรย์แยกส่วน DGM(1,1) ในการพยากรณ์วิกฤตการณ์ทางเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งพบว่า DGM(1,1) ให้ผลแม่นยำมากกว่า [8] นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงความแม่นยำของตัวแบบด้วยการใช้ออนุกรมฟูรีเยร์ โดยพบว่า ตัวแบบ FDGM(1,1) ซึ่งเป็นการประยุกต์อนุกรมฟูรีเยร์กับ DGM(1,1) ให้ค่า MAPE ต่ำกว่าตัวแบบ GM(1,1) [9] เป็นต้น ตัวแบบทฤษฎีระบบเกรย์นั้น เป็นตัวแบบที่ได้รับความนิยมเนื่องจากมีวิธีการคำนวณพารามิเตอร์ที่ไม่ซับซ้อน และสามารถใช้ได้กับจำนวนข้อมูลที่มีขนาดเล็กหรือข้อมูลตั้งแต่ 4 ข้อมูลขึ้นไป [10]

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาตัวแบบการพยากรณ์จำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านมโดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีระบบเกรย์ ผ่านการสร้างแบบจำลอง GM(1,1) และ DGM(1,1) พร้อมทั้งปรับปรุงความแม่นยำของการพยากรณ์ด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ เพื่อสร้างแบบจำลอง FGM(1,1) และ FDGM(1,1) จากนั้นทำการประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองทั้งสองประเภท โดยใช้ค่าเฉลี่ยร้อยละของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) เป็นเกณฑ์ในการประเมินผล

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 ทำการเก็บข้อมูลจำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม จากสถาบันมะเร็งแห่งชาติ [11] ซึ่งเป็นข้อมูลรายปีตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ถึง พ.ศ. 2565 รวมทั้งสิ้น 16 ปี โดยเป็นข้อมูลผู้ป่วยรายใหม่ของแต่ละปีที่เข้ารับการรักษาวินิจฉัยและรักษาที่สถาบันมะเร็งแห่งชาติ

ขั้นตอนที่ 2 แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนเพื่อใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำของตัวแบบ (Validation) คือ ข้อมูลชุดฝึกหัดและข้อมูลชุดทดสอบในอัตราส่วน 8 : 2 นั่นคือ ข้อมูลชุดฝึกหัดจำนวน 13 ปี และ ข้อมูลชุดทดสอบจำนวน 3 ปี

ขั้นตอนที่ 3 สร้างตัวแบบ GM(1,1) และ DGM(1,1) ภายใต้การใช้ภาษา Python ผ่านไลบรารี numpy

ขั้นตอนที่ 4 ปรับปรุงค่าพยากรณ์ของตัวแบบด้วยการประยุกต์ใช้ออนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series) ซึ่งจะได้ตัวแบบ FGM(1,1) และ FDGM(1,1)

ขั้นตอนที่ 5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวแบบทั้งหมดโดยใช้ค่าเฉลี่ยร้อยละของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) กับข้อมูลชุดทดสอบ

### 2.2 ตัวแบบระบบเกรย์ GM(1,1)

ตัวแบบ GM(1,1) เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาจาก J.Deng ในปี 1982 คำว่า “เกรย์” หมายถึงระบบข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์หรือไม่แน่นอน ซึ่งขั้นตอนการสร้างตัวแบบ GM(1,1) มีดังนี้ [12]

1) สร้างลำดับของข้อมูลตั้งต้น (Original Data) หรือ ข้อมูลจริงจำนวน  $n$  ข้อมูล

$$X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)]$$

2) สร้างลำดับข้อมูลสะสมของข้อมูลตั้งต้น

$$X^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)]$$

$$\text{โดยที่ } x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$$

3) ประมาณค่าพารามิเตอร์  $a, b$  จากสมการเชิงอนุพันธ์ของตัวแบบ GM(1,1)

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b \quad (1)$$

เมื่อ

$x^{(1)}(t)$  = ข้อมูลที่ผ่านการสะสมครั้งที่ 1 (1-AGO)

ณ เวลา  $t$

$a$  = ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง (Development Coefficient)

$b$  = ค่าอินพุตเกรย์ (Grey input)

ผลเฉลยของสมการที่ (1) คือ

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (2)$$

$$\text{เมื่อ } z^{(1)}(k+1) = \frac{x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k+1)}{2}$$

โดยที่

$$k = 1, 2, \dots, n-1$$

การประมาณค่าพารามิเตอร์จะใช้วิธีกำลังสองน้อยสุด ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}_{2 \times 1} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ } B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}_{(n-1) \times 2}$$

$$\text{และ } Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}_{(n-1) \times 1}$$

4) คำนวณค่าทำนายสะสมของตัวแบบ GM(1,1)

จากสมการ

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left[ x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (4)$$

โดยที่

$$\hat{x}^{(1)}(1) = x^{(0)}(1) \text{ และ } k = 1, 2, \dots, n-1$$

เมื่อต้องการค่าทำนาย ณ เวลา  $k+1$  จะคำนวณโดย

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (5)$$

ลักษณะสำคัญประการหนึ่งของแบบจำลอง GM(1,1) คือความเหมาะสมในการพยากรณ์ด้วยข้อมูลที่มีจำนวนจำกัด โดยสามารถใช้ข้อมูลเพียง 4-5 จุดได้ [13] แบบจำลองนี้ช่วยลดความไม่แน่นอนโดยการแปลงข้อมูลดั้งเดิมให้เป็นลำดับสะสม ซึ่งช่วยเผยให้เห็นรูปแบบที่ซ่อนอยู่ในข้อมูล และตั้งอยู่บนสมมติฐานของการเติบโตแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล จึงเหมาะสำหรับข้อมูลที่มีแนวโน้มชัดเจน อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของแบบจำลองจะลดลงอย่างมากหากข้อมูลไม่เป็นไปตามสมมติฐานการเติบโตแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลดังกล่าว [14]

## 2.2 ตัวแบบเกรย์แยกส่วน DGM(1,1)

DGM(1,1) หรือแบบจำลองเกรย์ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Grey Model (1,1)) เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาต่อยอดจาก GM(1,1) แบบดั้งเดิม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์ ด้วยการแทนที่สมการเชิงอนุพันธ์ใน GM(1,1) ด้วยสมการเชิงผลต่าง ซึ่งเหมาะสมกับข้อมูลที่เป็นลำดับเวลาแบบไม่ต่อเนื่องมากกว่าซึ่งมีงานวิจัยที่ระบุว่า DGM(1,1) สามารถให้ผลการพยากรณ์ที่แม่นยำกว่า GM(1,1) โดยเฉพาะในกรณีที่ข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงไม่สม่ำเสมอ [8] โดยที่ตัวแบบ DGM(1,1) มีสมการดังต่อไปนี้

$$x^{(1)}(k+1) = \beta_1 x^{(1)}(k) + \beta_2 \quad (6)$$

เมื่อ  $\beta_1, \beta_2$  คือ พารามิเตอร์ของตัวแบบการประมาณค่าพารามิเตอร์จะกระทำโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}_{2 \times 1} = (M^T M)^{-1} M^T P \quad (7)$$

$$\text{เมื่อ } M = \begin{bmatrix} x^{(1)}(1) & 1 \\ x^{(1)}(2) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x^{(1)}(n-1) & 1 \end{bmatrix}_{(n-1) \times 2}$$

$$\text{และ } P = \begin{bmatrix} x^{(1)}(2) \\ x^{(1)}(3) \\ \vdots \\ x^{(1)}(n) \end{bmatrix}_{2 \times (n-1)}$$

การหาค่าทำนายสะสมของ DGM(1,1) ณ เวลา  $k+1$  สามารถคำนวณจากสมการ

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \beta_1 x^{(0)}(1) + \frac{1-\beta_1^k}{1-\beta_1} \times \beta_2 \quad (8)$$

โดยที่  $\hat{x}^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$  และ  $k=1, 2, \dots, n-1$  เมื่อต้องการหาค่าทำนาย ณ เวลา  $k+1$  สามารถทำได้จากสมการ

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (9)$$

แบบจำลอง DGM(1,1) มีข้อดีหลายประการ โดยช่วยลดข้อผิดพลาดในการพยากรณ์ที่มักพบในแบบจำลอง GM(1,1) โดยเฉพาะในกรณีที่มีข้อมูลไม่เป็นไปตามสมมติฐานการเติบโตแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลแบบจำลองนี้ยังมีความเรียบง่ายในการคำนวณ เนื่องจากใช้สมการเชิงผลต่างแทนการอินทิเกรต นอกจากนี้

DGM(1,1) ยังเหมาะสมสำหรับชุดข้อมูลขนาดเล็ก โดยปกติมีจำนวนข้อมูลตั้งแต่ 4 ถึง 10 จุดเท่านั้น [15]

### 2.3 การปรับปรุงค่าคลาดเคลื่อนด้วยอนุกรมฟูรีเยร์

การปรับปรุงค่าคลาดเคลื่อนด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ของตัวแบบ GM(1,1) และ DGM(1,1) นั้น [9] จะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) คำนวณค่าคลาดเคลื่อน ณ เวลาที่  $k$

$$\varepsilon(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k) \quad (10)$$

เมื่อ  $k=2, 3, \dots, n$  จากนั้นนำมาสร้างเป็นเมทริกซ์ของค่าคลาดเคลื่อนดังนี้

$$\varepsilon = [\varepsilon(2) \quad \varepsilon(3) \quad \dots \quad \varepsilon(n)]_{1 \times (n-1)}^T$$

2) การประมาณค่าคลาดเคลื่อนที่  $k$  ด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ สามารถประมาณได้โดย

$$\hat{\varepsilon}(k) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{i=1}^Z \left[ a_i \cos\left(\frac{2\pi i}{n-1}(k)\right) \right] + \sum_{i=1}^Z \left[ b_i \sin\left(\frac{2\pi i}{n-1}(k)\right) \right] \quad (11)$$

$$\text{เมื่อ } Z = \left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor - 1$$

ซึ่ง เมทริกซ์ค่าคลาดเคลื่อนสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการ

$$\varepsilon = Q \times C \quad (12)$$

เมื่อ

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi z}{n-1} \cdot 2\right) & \dots & \sin\left(\frac{2\pi z}{n-1} \cdot 2\right) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi z}{n-1} \cdot n\right) & \dots & \sin\left(\frac{2\pi z}{n-1} \cdot n\right) \end{bmatrix}_{(n-1) \times (2Z+1)}$$

$$\text{และ } C = [a_0 \ a_1 \ b_1 \ \cdots \ a_z \ b_z]_{1 \times (2z+1)}^T$$

3) ประมาณค่าพารามิเตอร์ของเมทริกซ์  $C$  ใช้วิธีกำลังสองน้อยสุด ซึ่งคำนวณจาก

$$C = (Q^T Q)^{-1} Q^T \varepsilon \quad (13)$$

จากสมการที่ (13) เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ก็นำไปแทนในสมการที่ (11) เพื่อคำนวณค่าคลาดเคลื่อน ณ เวลาที่  $k$

4) ปรับค่าทำนายของตัวแบบ GM(1,1) และ DGM(1,1) ดังนี้

$$\hat{f}_k = \begin{cases} \hat{f}_1 = x^{(0)}(1) \\ \hat{f}_k = \hat{x}^{(0)}(k) + \hat{\varepsilon}(k); k = 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (14)$$

หลังจากปรับค่าคลาดเคลื่อนก็จะทำให้ได้ตัวแบบ FGM(1,1) และ FDGM(1,1) การแก้ไขค่าคลาดเคลื่อนในแบบจำลอง GM(1,1) และ DGM(1,1) ด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีข้อมูลแสดงลักษณะตามฤดูกาล หรือมีรูปแบบคลื่นซ้ำ ๆ ซึ่งแบบจำลองเกรย์ทั่วไปไม่สามารถจับลักษณะเหล่านี้ได้ เทคนิคนี้ช่วยให้สามารถตรวจจับรูปแบบฤดูกาลที่ซ่อนอยู่ ลดสัญญาณรบกวน เพิ่มความแม่นยำของการพยากรณ์ และยังสามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งกับ GM(1,1) และ DGM(1,1) อย่างไรก็ตาม การใช้งานอนุกรมฟูรีเยร์อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีข้อมูลที่เพียงพอเพื่อจับรูปแบบความถี่ต่าง ๆ ของแบบจำลองได้อย่างแม่นยำ

## 2.4 เกณฑ์ประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบ

ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าเฉลี่ยร้อยละของความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) เพื่อทดสอบความแม่นยำของแบบจำลอง โดยที่ตัวแบบที่ดีจะมีค่า MAPE ที่ต่ำ ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการ [16]

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i} \times 100 \quad (15)$$

เมื่อ

$y_i$ , แทน อนุกรมเวลา ณ เวลา  $t$

$\hat{y}_i$ , แทน ค่าพยากรณ์ของอนุกรมเวลา ณ เวลา  $t$

$n$  แทน จำนวนข้อมูลที่ศึกษา

และได้มีเกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดความแม่นยำสำหรับการพยากรณ์ดังนี้ [17]

**ตารางที่ 1** เกณฑ์การประเมินความแม่นยำของตัวแบบ

MAPE	ผลการประเมินความแม่นยำ
MAPE < 10%	แม่นยำสูง
10% < MAPE < 20%	ค่อนข้างแม่นยำ
20% < MAPE < 50%	พอใช้
MAPE > 50%	ไม่มีความแม่นยำ

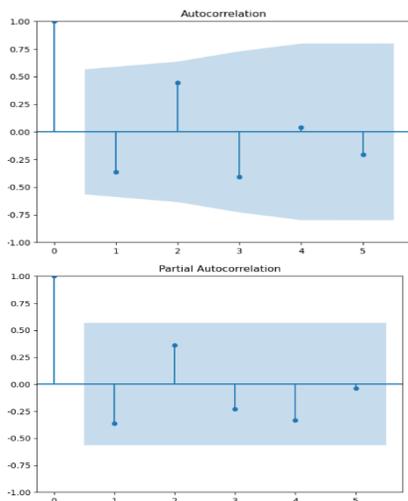
## 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการเก็บรวบรวมจำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านมเป็นข้อมูลรายปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ถึง พ.ศ. 2565 จากสถาบันมะเร็งแห่งชาติ รวมทั้งสิ้น 16 ปี ข้อมูลดังกล่าวถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดฝึกหัด (Training set) และ ชุดทดสอบ (Testing set) ในอัตราส่วน 80 : 20 ซึ่งเป็นแนวทางที่เหมาะสมและได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลายในการสร้างแบบจำลอง [18] โดยชุดฝึกหัดประกอบด้วยข้อมูล 13 ปี และชุดทดสอบจำนวน 3 ปี

**ตารางที่ 2** แสดงจำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านมที่ใช้เป็นข้อมูลสำหรับการฝึกแบบจำลอง

ปี	จำนวนผู้ป่วย	ปี	จำนวนผู้ป่วย
2550	787	2551	796
2552	765	2553	816
2554	755	2555	939
2556	924	2557	1005
2558	848	2559	842
2560	780	2561	705
2562	745		

วิเคราะห์ความนิ่งของข้อมูลอนุกรมเวลาจำนวนผู้ป่วยมะเร็งเต้านม โดยใช้การทดสอบ Augmented Dickey-Fuller (ADF) เพื่อประเมินความเหมาะสมของการนำแบบจำลอง ARIMA มาใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับแบบจำลองเกรย์ ผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่าข้อมูลจริงมีค่า p-value เท่ากับ 0.09 ซึ่งมากกว่า 0.05 บ่งชี้ว่าข้อมูลยังไม่เป็นแบบนิ่ง (non-stationary) จึงได้ทำการหาความต่างอันดับที่ 1 เพื่อลดแนวโน้มของข้อมูล ผลการทดสอบภายหลังพบว่า p-value เท่ากับ 0.0003 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลหลังการแปลงมีลักษณะเป็นแบบนิ่ง (stationary) จากนั้นจึงได้วิเคราะห์กราฟ ACF และ PACF เพื่อช่วยในการระบุโครงสร้างของโมเดล ARIMA ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การวิเคราะห์กราฟ ACF และ PACF

จากการวิเคราะห์ข้อมูลหลังการหาผลต่างอันดับที่ 1 ด้วยกราฟฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (ACF) และฟังก์ชันสหสัมพันธ์ย่อย (PACF) พบว่าข้อมูลมีลักษณะของความสัมพันธ์เชิงเวลาที่ทั้งส่วนของกระบวนการ AR และ MA มีบทบาทร่วมกันอย่างชัดเจน โดยสังเกตได้จากค่าสหสัมพันธ์ที่โดดเด่นอย่างมีนัยสำคัญในหลายช่วงเวลา และไม่มีจุดที่กราฟตัดลงอย่างชัดเจนหลัง lag 1 หรือ 2 ดังนั้นจึงเลือกใช้แบบจำลอง ARIMA(2,1,2)

ซึ่งสามารถสะท้อนโครงสร้างของข้อมูลที่มีทั้งความสัมพันธ์เชิงเวลาและความผันผวนสะสมได้ดี เพื่อใช้เป็นแบบจำลองเชิงสถิติสำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับแบบจำลองเกรย์ ผลการทำนายแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลการพยากรณ์จำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านมของตัวแบบ ARIMA(2,1,2) และจำนวนผู้ป่วยจริง

ปี	จำนวนผู้ป่วยจริง	ตัวแบบ ARIMA(2,1,2)
2563	654	699
2564	616	771
2565	791	703
MAPE (%)		15.92 %

ขั้นตอนต่อไปนำชุดข้อมูลฝึกหัดมาสร้างแบบจำลอง GM(1,1) และ DGM(1,1) เพื่อใช้ในการพยากรณ์จำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม โดยดำเนินการด้วยภาษา Python และไลบรารี numpy ในการประมวลผล แบบจำลองแต่ละแบบถูกนำไปใช้พยากรณ์ข้อมูลในช่วงปี พ.ศ. 2563 ถึง พ.ศ. 2565 และเปรียบเทียบผลการพยากรณ์กับข้อมูลจริงในช่วงเวลาเดียวกัน เพื่อเป็นการประเมินความแม่นยำและประสิทธิภาพของแบบจำลอง ผลการพยากรณ์แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงผลการพยากรณ์จำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านมของตัวแบบ GM(1,1) ตัวแบบ DGM(1,1) และ จำนวนผู้ป่วยจริง

ปี	จำนวนผู้ป่วยจริง	ตัวแบบ GM(1,1)	ตัวแบบ DGM(1,1)
2563	654	803	801
2564	616	800	797
2565	791	796	793
MAPE (%)		17.78 %	17.41 %

จากการเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ของแบบจำลอง GM(1,1) และ DGM(1,1) กับข้อมูลจริงในตารางที่ 4 พบว่าทั้งสองแบบจำลองมีค่าคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูงในช่วงปี พ.ศ. 2563 และปี พ.ศ. 2564 ดังนั้น จึงดำเนินการนำค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเดิมทั้งสองมาปรับด้วยอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series) เพื่อเป็นการเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์ ส่งผลให้ได้แบบจำลองใหม่ คือ FGM(1,1) และ FDGM(1,1)

ผลการพยากรณ์ของแบบจำลองหลังปรับค่าคลาดเคลื่อน พร้อมเปรียบเทียบกับข้อมูลจริง แสดงไว้ในตารางที่ 5 ซึ่งใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการปรับปรุงแบบจำลองด้วยอนุกรมฟูริเยร์

ตารางที่ 5 แสดงผลการพยากรณ์จำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านมของตัวแบบ FGM(1,1) ตัวแบบ FDGM(1,1) และ จำนวนผู้ป่วยจริง

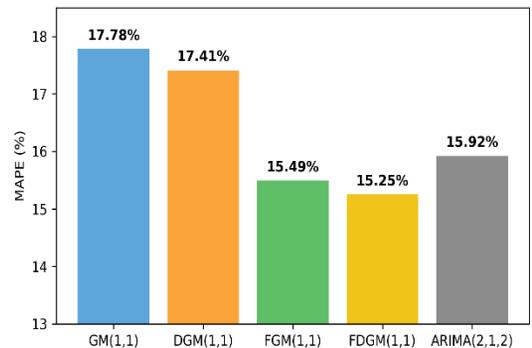
ปี	จำนวนผู้ป่วยจริง	ตัวแบบ FGM(1,1)	ตัวแบบ FDGM(1,1)
2563	654	725	721
2564	616	776	773
2565	791	716	712
MAPE (%)		15.49 %	15.25 %

จากตารางที่ 5 พบว่าแบบจำลอง FGM(1,1) และ FDGM(1,1) สามารถพยากรณ์จำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านมได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงโดยรวมอย่างไรก็ตาม ในปี พ.ศ. 2563 และ 2564 ผลการพยากรณ์มีค่าสูงกว่าจำนวนผู้ป่วยจริง ในขณะที่ปี พ.ศ. 2565 ผลการพยากรณ์กลับมีค่าต่ำกว่าจำนวนผู้ป่วยจริง ซึ่งความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจมีสาเหตุมาจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรค COVID-19 ที่ส่งผลให้จำนวนผู้ป่วยไม่ได้เข้ารับการตรวจวินิจฉัยหรือรักษาอย่างครบถ้วน เนื่องจากมาตรการควบคุมการแพร่ระบาดของโรคในช่วงเวลาดังกล่าว แต่เมื่อเข้าสู่ปี พ.ศ. 2565 สถานการณ์เริ่มกลับเข้าสู่ภาวะปกติ ทำให้ประชาชนสามารถเข้าถึงบริการทางการแพทย์ได้มากขึ้น

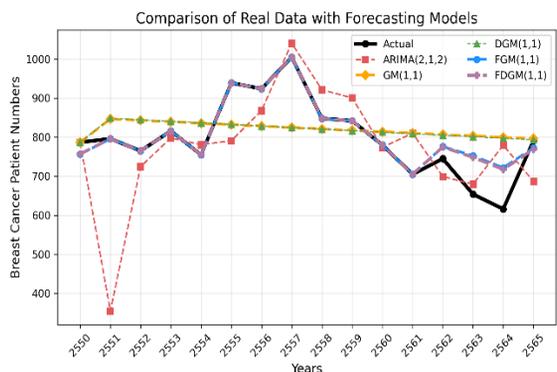
ส่งผลให้จำนวนผู้ป่วยที่ได้รับการตรวจวินิจฉัยเพิ่มขึ้นตามจริง ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นความผันผวนที่แบบจำลองไม่สามารถสะท้อนได้อย่างแม่นยำ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองทั้งสองซึ่งกระทำโดยใช้ค่าเฉลี่ยร้อยละของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) แสดงในรูปที่ 3

ผลการเปรียบเทียบในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทั้งสองมีค่า MAPE อยู่ในช่วง 10% ถึง 20% ซึ่งจัดอยู่ในระดับความแม่นยำค่อนข้างสูงตามเกณฑ์ที่ระบุในตารางที่ 1 โดยแบบจำลอง FDGM(1,1) มีค่า MAPE ต่ำที่สุด สะท้อนถึงประสิทธิภาพในการพยากรณ์ที่เหนือกว่าแบบจำลองอื่น



รูปที่ 3 แสดงค่า MAPE ของตัวแบบพยากรณ์



รูปที่ 4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบข้อมูลจริงและตัวแบบพยากรณ์

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al. [19] ที่ใช้แบบจำลอง GM(1,1) ในการพยากรณ์

จำนวนผู้ป่วยโรคตับอักเสบบีในประเทศจีน และพบว่าแบบจำลอง GM(1,1) เหมาะกับข้อมูลขนาดเล็กและมีลักษณะข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องหรือไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามแบบจำลองดังกล่าวมีข้อจำกัดในการตอบสนองต่อความผันผวนของข้อมูล โดยเฉพาะในช่วงที่มีเหตุการณ์ที่ไม่ปกติ เช่น การระบาดของโรค ขณะเดียวกัน งานของ Zhao et al. [20] ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง GM(1,1), ARIMA และ LSTM ในการพยากรณ์จำนวนผู้ป่วยวัณโรคในจีน พบว่าแบบจำลอง ARIMA และ LSTM ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่าเมื่อข้อมูลมีลักษณะต่อเนื่องและมีปริมาณข้อมูลที่เพียงพอ ในขณะที่ GM(1,1) มีข้อได้เปรียบในกรณีข้อมูลมีจำนวนน้อยและไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของข้อมูลในงานวิจัยนี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ GM(1,1) และ DGM(1,1) พร้อมทั้งปรับค่าคลาดเคลื่อนด้วยอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์กับลักษณะของข้อมูลที่มีจำกัด

#### 4. สรุป

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบที่ใช้ทำนายจำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม โดยใช้ข้อมูลจากสถาบันมะเร็งแห่งชาติจำนวนทั้งสิ้น 16 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2550 ถึง พ.ศ. 2565 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวแบบทั้งสี่ตัวแบบ ได้แก่ GM(1,1), DGM(1,1), FGM(1,1) และ FDGM(1,1) ให้ค่า MAPE อยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างแม่นยำเมื่อเทียบกับเกณฑ์การประเมินในตารางที่ 1 จากการนำเทคนิคการปรับค่าคลาดเคลื่อนด้วยฟูรีเยร์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับตัวแบบ ผลปรากฏว่าค่าคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำลง โดยที่ตัวแบบ FDGM(1,1) มีค่า MAPE เท่ากับ 15.25% เป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบ GM(1,1), DGM(1,1) และ FGM(1,1) จึงเป็นข้อสรุปว่าตัวแบบ FDGM(1,1) เป็นตัวแบบที่เหมาะสมที่สุดในการใช้พยากรณ์จำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม

ทั้งนี้ ตัวแบบ FDGM(1,1) ให้ผลการพยากรณ์ที่แม่นยำกว่าแบบจำลอง GM(1,1), DGM(1,1) และ FGM(1,1) เนื่องจากตัวแบบนี้ผสมข้อดีของแบบจำลองเกรย์เข้ากับแนวคิดการแยกส่วนข้อมูล ซึ่งเหมาะสมกับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง อีกทั้งยังใช้เทคนิคการปรับค่าคลาดเคลื่อนด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ ทำให้สามารถรองรับทั้งลักษณะข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่องและความผันผวนที่ไม่เป็นเส้นตรงได้ดีกว่าแบบจำลองพื้นฐาน ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ลดลงมากที่สุด

ข้อจำกัดของตัวแบบที่ควรพิจารณา ได้แก่ ตัวแบบ GM(1,1) ซึ่งอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ต่อเนื่อง มักให้ความแม่นยำน้อยลงเมื่อข้อมูลมีความผันผวนสูงหรือมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ขณะที่ตัวแบบ DGM(1,1) แม้จะเหมาะกับข้อมูลแบบ discrete มากกว่า แต่ก็ยังมีความไวต่อความไม่สม่ำเสมอของข้อมูลเช่นกัน นอกจากนี้ทั้งสองแบบจำลองเป็นแบบจำลองตัวแปรเดียว จึงไม่สามารถสะท้อนปัจจัยอื่นที่อาจส่งผลต่อจำนวนผู้ป่วยได้อย่างครบถ้วน ทางผู้วิจัยเสนอแนะว่า หากสามารถรวบรวมข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับโรคมะเร็งเต้านมเพิ่มเติมได้ ควรนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองทำนาย เช่น แบบจำลอง GM(1,N) ซึ่งสามารถพิจารณาตัวแปรต้นหลายตัวแปรพร้อมกับตัวแปรตามได้ นอกจากนี้ ควรพิจารณาทดลองใช้เทคนิคการปรับค่าคลาดเคลื่อนรูปแบบอื่น ๆ เพื่อเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลองให้ดียิ่งขึ้น

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Nakornthon Hospital, "Top 3 most common cancers in women," *Nakornthon Hospital*, Bangkok, Thailand, 2024. [Online].  
<https://www.nakornthon.com/article/detail>

- V3โรคมาเรียมะเร็งยอดฮิตพบบ่อยสุดในผู้หญิง. [Accessed: Jan. 20, 2025].
- [2] National Cancer Institute (Thailand), *Fight cancer guide: Roo Soo Cancer*, Bangkok, Thailand. [Online]. [https://www.nci.go.th/th/File\\_download/fight\\_cancer/รู้สู้มะเร็ง.pdf](https://www.nci.go.th/th/File_download/fight_cancer/รู้สู้มะเร็ง.pdf). [Accessed: Jan. 20, 2025].
- [3] Hfocus, "Current issues in Thailand's healthcare system," *Hfocus*, Bangkok, Thailand, Mar. 27, 2022. [Online]. <https://www.hfocus.org/content/2022/03/24791> [Accessed: Jan. 20, 2025].
- [4] R. Chotsangsakorn, S. Thanasilp, and N. Pudtong, "Predicting factors of breast cancer screening behaviors among menopausal women," *Kuakarun Journal of Nursing*, vol. 26, no. 2, pp. 107–120, Jul.-Dec. 2019.
- [5] P. Khruasom, C. Puripat, P. Nuchpho, and P. Klongsangson, "Grey system model for forecasting dengue outbreak: Case study of Bangkok metropolis," *Disease Control Journal*, vol. 49, no. 2, pp. 353–363, 2023.
- [6] B. Yunan and V. Jayathavaj, "Forecasting the Number of Deaths from Pneumonia and Intracerebral Hemorrhage," *Regional Health Promotion Center 9 Journal*, vol. 18, no. 3, pp. 946–956, Jul. 2024.
- [7] P. Amphanthong and P. Busababodhin, "Forecasting PM10 in the upper northern area of Thailand with Grey System Theory," *Burapha Science Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 15–24, 2015.
- [8] N. Doungdee and M. Chiangpradit, "Forecasting crisis peaks of economics in Thailand using Grey model," *Burapha Science Journal*, vol. 23, no. 2, pp. 1111–1122, May–Aug. 2018.
- [9] V.-T. Phan, Z. Malara, and N. T. Nguyen, "Using Fourier series to improve the Discrete Grey Model (1,1)," *Advances in Computational Collective Intelligence*, pp. 99-109, 2020.
- [10] A. Nimcharoen, P. Busababodhin, and M. Chiangpradit, "Residual modification of forecasting with Fourier series," *Burapha Science Journal*, vol. 23, no. 3, pp. 1396–1408, Sep.-Dec. 2018.
- [11] National Cancer Institute of Thailand, "Cancer incidence statistics in Thailand," [Online]. [https://www.nci.go.th/th/cancer\\_record/cancer\\_rec1.html](https://www.nci.go.th/th/cancer_record/cancer_rec1.html). [Accessed: Feb. 17, 2025].
- [12] J. Deng, *Introduction to Grey System Theory*. The Journal of Grey System, vol. 1, pp. 1-24, 1989.
- [13] Z. Ceylan, "Short-term prediction of COVID-19 spread using grey rolling model optimized by particle swarm optimization," *Applied Soft Computing*, vol. 109, p. 107592, Sept. 2021
- [14] S. Liu and Y. Lin, *Grey Systems: Theory and Applications*. New York: Springer, 2010.

- [15] N.-M. Xie and S. F. Liu, "Discrete grey forecasting model and its optimization," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 33, no. 2, pp. 1173–1186, 2009.
- [16] J. Rattanahon and V. Jayathavaj, "Predicting the number of neonatal deaths in Thailand using grey system theory," *Journal of Medicine and Public Health, Ubon Ratchathani University*, vol. 7, no. 2, pp. 154–163, May.-Aug. 2024.
- [17] National Statistical Office, Analytical report on unemployment 2023 Bangkok, Thailand: National Statistical Office, 2023. [Online]. [https://www.nso.go.th/public/e-book/Analytical-Reports/Report\\_Unemployed\\_2566/17/](https://www.nso.go.th/public/e-book/Analytical-Reports/Report_Unemployed_2566/17/). [Accessed: Mar. 3, 2025].
- [18] M. Kuhn and K. Johnson, *Applied Predictive Modeling*. New York: Springer, 2013.
- [19] Y.-W. Wang, Z.-Z. Shen, and Y. Jiang, "Comparison of ARIMA and GM(1,1) models for prediction of hepatitis B in China," *PLoS ONE*, vol. 13, no. 9, pp. e0201987, 2018.
- [20] D. Zhao, H. Zhang, Q. Cao, Z. Wang, S. He, M. Zhou, and R. Zhang, "The research of ARIMA, GM(1,1), and LSTM models for prediction of TB cases in China," *PLoS ONE*, vol. 17, no. 2, pp. e0262734, 2022.



# RNUTP

RESEARCH JOURNAL  
*Sciences and Technology*

E-ISSN : 3027-8260

