



Print ISSN 1906-0874 Online ISSN 2651-2130

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

UTK RESEARCH JOURNAL

ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2568

Vol. 19 No.1 January - June 2025



วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

โทรศัพท์ 02 287 9600 ต่อ 3115

<https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>



วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Rajamangala University of Technology Krungthep Research Journal

ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2568 Vol 19 No.1 January – June 2025

เจ้าของ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทน์มณี	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ศาสตราจารย์ญาณวิทย์ ดร.อลงกต แทนอมทอง	กรรมการสภามหาวิทยาลัยผู้ทรงคุณวุฒิ
ศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ ชินณะราศรี	กรรมการสภาวิชาการผู้ทรงคุณวุฒิ
ศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์ ทิพย์ปรีกมาศ	กรรมการสภาวิชาการผู้ทรงคุณวุฒิ
ดร.สิริเบญญา กอวัฒนา	กรรมการสภามหาวิทยาลัยผู้ทรงคุณวุฒิ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิระ ขอบจิตต์เมตต์	กรรมการสภามหาวิทยาลัยผู้ทรงคุณวุฒิ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุเทพ บุตรดี	ที่ปรึกษาอาวุโส
รองศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุตเจื้อจัน	รองอธิการบดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ศิวาวุธ	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ สงวนพวง	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
ดร.ประภาพร ร้อยพรมมา	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก บุญธรรม	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
-------------------------------------	-----------------------------------

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ จ้าวสุวรรณ	ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
--------------------------------------	---------------------------------------

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ตรีทศ เหล่าศิริหงส์ทอง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. ประสาท เนืองเฉลิม	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล เย็นฤดี	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฟ้าใส วิวัฒน์วงศ์วนา	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวงษ์ สว่างศรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คณะวาปี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพัฒน์ พลอัน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบศักดิ์ กาญจนางค์กุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมลมาศ บำรุงเศรษฐพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ จันทร์ฉาย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ว่าที่ร้อยตรี ดร.ชาญณรงค์ ตระกูลสรณคมน์	มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

เจ้าหน้าที่ประจำวารสาร

นางสาวธัญญ์ อูเทน	นายณรงค์ศักดิ์ วิสุทธิแพทย	นางสาวพัชรินทร์ พัฒนโกครัตนา
อูเทน นางจิไรรัตน์ ราษฎร์สภา	นางสาวอัจฉรา จินดาจัน	นางสาวนุชนารถ สิมมาลา
นางนาฏนภา จรชัย	นางสาววันทนา ประณีธานธรรม	นสยวันนิวัติ วันทนา
นางจันทนา สังข์อู่	นายวีระวัฒน์ ราษฎร์สภา	

บทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารเป็นความคิดเห็นของผู้เขียนกองบรรณาธิการ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

ความเป็นมา

วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ISSN 1906 - 0874 เป็นวารสารวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ โดยสถาบันวิจัยและพัฒนา ได้มีการจัดทำวารสารอย่างต่อเนื่องตั้งแต่พ.ศ. 2550 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งเป็นวารสารที่อยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยเผยแพร่เป็นราย 6 เดือน ซึ่งตีพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ (ฉบับละ 8 -12 บทความ) และมีการดำเนินงาน จัดพิมพ์บทความประเภทต่าง ๆ ได้แก่ บทความวิจัย (Research paper) และ บทความวิชาการ (Academic paper)

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นบทความที่สร้างองค์ความรู้ และมีคุณภาพในทางวิชาการสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการเอกสารอ้างอิงได้ เพราะผ่านการพิจารณาถ่วงถ่วง และประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง จากหลากหลายสถาบัน 3 ท่าน ซึ่งเป็นการประเมินแบบไม่แสดงชื่อผู้แต่งและผู้ประเมิน (Double blinded) ก่อนที่จะเผยแพร่สู่สาธารณชน จึงทำให้วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นวารสารวิชาการที่มีคุณภาพ

กองบรรณาธิการ วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ จัดทำวารสารเป็นรูปแบบฉบับสมบูรณ์และเผยแพร่ให้กับสถาบันการศึกษาต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย นอกจากนี้ยังสามารถสืบค้นเพื่อเอกสารอ้างอิงหรืออ่านบทความที่เปี่ยมด้วยองค์ความรู้ได้ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research paper) และบทความวิชาการ (Academic paper) ที่มีคุณภาพของอาจารย์นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และสาขาต่าง ๆ ที่มีการบูรณาการข้ามศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ที่ทันสมัย ได้แก่
 - 1.1. Environment Chemistry
 - 1.2. General Engineering
 - 1.3. Applied Mathematics
 - 1.4. Renewable Energy, Sustainability and the Environment
 - 1.5. Biomaterials
2. เพื่อส่งเสริมและเป็นกลไกการขับเคลื่อนงานวิจัย ทำให้เกิดผลงานวิจัยที่เข้าสู่การพัฒนาต่อภาคสังคม ชุมชน และนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนเพื่อต่อยอดและเกิดความเชื่อมโยงระหว่างงานวิจัย งานวิชาการ ซึ่งนำมาสู่การเกิดประโยชน์ต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และตอบสนองต่อการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศไทย

นโยบายการรับบทความ

กองบรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ มีความยินดีที่จะรับบทความจากอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ที่เขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ซึ่งผลงานที่ส่งมาขอตีพิมพ์ต้องไม่เคยเผยแพร่ในสิ่งพิมพ์อื่นใดมาก่อน และต้องไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น

การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่านการพิจารณาถ่วงถ่วงจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ

ข้อความที่ปรากฏอยู่ในแต่ละบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเล่มนี้ เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียนแต่ละท่าน ไม่เกี่ยวข้องกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพแต่อย่างใด ความรับผิดชอบด้านเนื้อหา และการตรวจร่างบทความแต่ละบทความเป็นของผู้เขียนแต่ละท่าน หากมีความผิดพลาดใด ๆ ผู้เขียน แต่ละท่านจะต้องรับผิดชอบบทความของตนเองแต่ผู้เดียว

กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์มีให้นำเนื้อหา หรือข้อคิดเห็นใด ๆ ของบทความในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ ไปเผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาตจากกองบรรณาธิการ อย่างเป็นลายลักษณ์อักษร ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสาร

ผู้ประสงค์จะส่งบทความกรุณาอ่านรายละเอียดการส่งบทความที่คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความ ซึ่งได้รับไว้ในเล่มวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ หรือ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> และสามารถส่ง Online ได้โดยกรอกรายละเอียดให้ครบถ้วนในระบบการส่งบทความ Online หากต้องการสอบถามข้อมูลเพิ่มเติม ติดต่อได้ที่

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
โทร. 0 2286 9600 ต่อ 3115
Email: utk_research_journal@mail.rmutk.ac.th
<https://www.rdi.rmutk.ac.th>

กำหนดการเผยแพร่

ปีละ 2 ฉบับ (ทุก 6 เดือนต่อฉบับ)
ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน
ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม

การเผยแพร่

เผยแพร่ผ่านระบบออนไลน์
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>

สารบัญ

หน้า

- 1 การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันการจัดการรับฝากรถยนต์และแจ้งเตือนผ่านไลน์..... 1-8
A Development of Web Application for Car Storage Management
and Notification via LINE
รสนันท์ ยอดสกุล, สุดา เขียวมนตรี, อรยา ปรีชาพานิช, สุวิมล จุงจิตร และ นิชากรณ์ พันธคง

- 2 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและต้านแบคทีเรียในช่องปากของสารสกัดจากเปลือกมังคุด..... 9-15
Antioxidant and anti-oral bacteria activities of *Garcinia mangostana* L. peel
extract
สมพล คนเพียร, ณัฐอัษฎ์ นราสุขปริพัฒน์, พิชชาภา แก้วงามอรุณ, ศิริรัตน์ ยอดสุดา, ณัฐพิมล กมลสิทธิชัย,
วรัทยา ว่องวาณิช และ ณัฏพร มโนใจ

- 3 ผลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในผักสลัดใบกรีนโอ๊ค..... 16-23
Effect of Plasma Activated Water on Inhibition of Microbial Cells in Green Oak
Lettuce
กมลทิพย์ ปรีเปรม, ขจรเดช ลาบุตร, กระวี ตรีอำนาจ, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และ วิชาญณรงค์ วงศ์บับพา

- 4 อิทธิพลของตัวขวางการไหลในหอบแห้งแบบอินฟราเรดที่มีต่ออุณหภูมิของข้าวเปลือก..... 24-30
Influence of Flow interrupters in Infrared Drying Column on Temperature of
the paddy grains
วิชาญณรงค์ วงศ์บับพา, กระวี ตรีอำนาจ, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และ กมลทิพย์ ปรีเปรม

- 5 การสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตัวอย่างจากสวนส้มโอทับทิมสยาม
อำเภอปากพะนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช..... 31-39
Accumulation of Radionuclides in Soil Samples from *Citrus maxima* (Burm.f.)
Merr cultivation farm at Pak Phanang District, Nakhon Si Thammarat Province
วุฒิชัย จันทร์แจ่มใส และ พวงทิพย์ แก้วทับทิม

- 6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำและการทำความร้อน
ด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า..... 40-47
Heating efficiency comparison of induction heating and electric heater
วสวัตต์ ทั้งบริรักษ์, กระวี ตรีอำนาจ และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ

- 7 การทดสอบประสิทธิภาพของชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการ..... 48-53
Performance testing of the electric tow truck for wheelchairs
อำพล พิชัยเชิด, ทักขณัย สุภารส, พนัสชัย ศรีบำรุง, วิโรจน์ เลิศธีระชาญชัย, สุระศักดิ์ ศรีปาน และ เกียรติศักดิ์ ใจโต

สารบัญ

หน้า

8	การเปรียบเทียบวิธีการหาคำตอบสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ..... Comparison of Methods for Optimal Solutions to Vehicle Routing Problems จักรินทร์ กลั่นเงิน, เทียนจุ๋ เด่นเวสสะเพชร, นิภาพรรณ กลั่นเงิน และ ประภาพรรณ เกษราพงศ์	54-59
9	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการขึ้นรูปแผ่นรองแก้วจากวัสดุเชิงประกอบเนื้อพีนพอลิเมอร์ เสริมแรงด้วยเส้นใยเปลือกทุเรียน..... Factors Affecting Forming Coaster from Polymer Matrix Composite Material Reinforced with Durian Peel Fiber จักรินทร์ กลั่นเงิน, ประภาพรรณ เกษราพงศ์, ณิชากานต์ แวงวรรณ และ ปณิฐา เปื้องชนะ	60-66
10	การเปรียบเทียบสมรรถนะของเตาจรวดรูปทรง L และรูปทรง V และการเพิ่มสมรรถนะโดยการ ปรับปรุงห้องเผาไหม้และช่องป้อนเชื้อเพลิง..... Comparison of Performance of L-shaped and V-shaped Rocket Stoves and Performance Enhancement by Improving Combustion Chamber and Fuel Inlet พลชัย ขาวนวล, สุนารี บดีพงศ์, สมบูรณ์ ประสงค์จันทร์ และ โกสินทร์ ทีปักษ์พันธ์	67-76
11	การหาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องคัดแยกเมล็ดกาแฟโดยใช้การออกแบบ การทดลองแบบแฟคทอเรียล..... Finding the optimum conditions for coffee bean sorting using Factorial experimental design วรพงศ์ พงศ์ภัทรวิทย์, ณิชภัทร อินทนนท์, พงศธร เติมผล, สิริศักดิ์ หอมใส และ อนุพงศ์ ปลั่งกลาง	77-83
12	กรณีศึกษาการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส โดยใช้เทคนิค PWM ผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink..... Study on Single-Phase AC-AC Converter Control Using PWM Technique Implemented in MATLAB/Simulink พนม ท้าวดี, พนัสชัย ศรีบำรุง และ อภิราช รัตนอุดมพิสุทธิ์	84-91
13	การพัฒนาชุดควบคุมการขับเคลื่อนสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า..... Development of traction control unit of electric motorcycle พนัสชัย ศรีบำรุง, กริษา จิรัตติวิรุฒม์กุล และ วิโรจน์ เลิศธีระชาญชัย	92-99

สารบัญ

หน้า

14	การออกแบบและประเมินประสิทธิภาพเครื่องผสมปุ๋ยหมักแนวนอน.....	100-105
	Design and Efficiency Assessment of Horizontal Fertilizer Mixing Machine	
	ศุภกัญญา ชันชัยภูมิ และ ภควดี ศิริวัชรสุข	
15	Effect of Solution Concentration Parameters During Electrospinning	
	Process on Morphological Features of Scalable Self-standing	
	Polyvinyl Alcohol Nanofibrous Membranes.....	107-114
	Apiwat Dankeaw, Apichat Sanrutsadakorn and Kanchana Sotho	
	คำแนะนำสำหรับผู้เขียน.....	115-121

การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันการจัดการรับฝากรถยนต์และแจ้งเตือนผ่านไลน์ A Development of Web Application for Car Storage Management and Notification via LINE

รสนันท์ ยอดสกุล¹, สูดา เทียนมนตรี^{1*}, อรยา ปรีชาพานิช¹, สุวิมล จุงจิตร์¹, นิชากรณ์ พันธัง¹
Rossanan Yodsakul¹, Suda Thianmontri^{1*}, Oraya Preechapanich¹, Suwimol Jungjit¹, Nichakorn Pankong¹

¹สาขาวิชาคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยทักษิณ
วิทยาเขตพัทลุง ประเทศไทย

¹Department of Computer and Information Technology, Faculty of Science and Digital Innovation, Thaksin University, Phatthalung Campus, Thailand

*Corresponding Author. Email: suda@tsu.ac.th Tel: 0815997759

Received: 3-05-2024 Revised: 14-06-2025 Accepted: 30-06-2025

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันการจัดการรับฝากรถยนต์ ซึ่งจะมีการแจ้งเตือนข้อมูลผ่านไลน์ และประเมินเว็บแอปพลิเคชันจากการทดสอบใช้งานและตอบแบบสอบถาม โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ภาษาโปรแกรม PHP ฐานข้อมูล MySQL แอปพลิเคชันไลน์ และแบบสอบถาม ผู้วิจัยได้ออกแบบและแบ่งการใช้งานเป็นผู้ใช้ 3 กลุ่ม คือ ผู้ให้บริการ ลูกค้ารายเดือน และลูกค้ารายวัน ผู้ให้บริการสามารถลงทะเบียนข้อมูลสมาชิกและรถ ทำสัญญาการรับฝาก รับชำระเงิน แจ้งเตือนข้อมูลถึงเวลาจ่ายเงิน แจ้งเตือนข้อมูลใกล้สิ้นสุดสัญญาให้กับลูกค้ารายเดือน ส่วนลูกค้ารายวัน ผู้ให้บริการสามารถลงทะเบียนรับฝากและคืนรถ แจ้งเตือนข้อมูลวันคืนรถและข้อมูลใกล้ถึงเวลารับคืน นอกจากนี้ผู้ให้บริการสามารถพิมพ์รายงานการรับฝากรถ ตั้งค่าเวลาเปิด-ปิดร้าน และกำหนดอัตราค่าบริการรับฝากรถได้ ในส่วนของลูกค้ารายเดือนดูข้อมูลสัญญา ข้อมูลการชำระเงิน รับการแจ้งเตือนผ่านไลน์ได้ และลูกค้ารายวันรับการแจ้งเตือนผ่านไลน์ได้ ผลการวิจัยพบว่าเว็บแอปพลิเคชันนี้ทำงานได้อย่างถูกต้อง และผลประเมินความพึงพอใจในการทำงานของเว็บแอปพลิเคชันนี้โดยผู้ทดสอบจำนวน 35 คน พบว่าผลการประเมินอยู่ในระดับความพึงพอใจมาก มีค่าเฉลี่ยรวม 4.39 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.68 สามารถนำเว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นนี้มาใช้งานได้ ช่วยให้การจัดการข้อมูลการรับฝากรถ สำหรับงานที่สามารถพัฒนาเพิ่มเติมได้ในส่วนการต่อสัญญาอัตโนมัติโดยไม่ต้องทำสัญญาใหม่ เพื่อให้เว็บแอปพลิเคชันนี้มีความสมบูรณ์ครบถ้วนสำหรับการใช้งานต่อไป

คำสำคัญ : เว็บแอปพลิเคชันรับฝากรถยนต์ การจัดการรับฝากรถยนต์ แจ้งเตือนผ่านไลน์

Abstract

The aim of this research is to develop a web application for car storage management that utilizes online notification information via LINE and evaluate this application via testing and questionnaires. We designed and categorized this application users as three groups: service providers, monthly and daily customers. The service providers can register member and cars information, sign deposit contracts, accept payments, and notify monthly customers regarding payment times and the contract expiration date. For daily customers, service providers can register and return cars information. notify the return dates and closing times. In addition, the service provider can print your deposit report, set store opening and closing times, and set payment rate. For monthly customers, they can view contract information, payment information, receive notifications via LINE. And daily customers, they can receive the notifications via LINE.

The results of the research found that this web application can works properly. The evaluation results of 35 testers on the performance satisfaction of this application show that are at a satisfactory level, with an overall average of 4.39 and the standard deviation of 0.68. This web application can be used to simplify the management of car storage information. Further work can be developed in the automatic renewal section without entering into a new contract, thus making this web application complete and available for further use.

Keyword: Car Storage Web Application, Car Storage Management, LINE Notification

1. บทนำ

ในปัจจุบันรถยนต์นั้นเป็นยานพาหนะที่จำเป็นสำหรับการเดินทาง ช่วยให้การดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์สะดวกขึ้น อัตราการมีรถยนต์ใช้จึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีข้อมูลสนับสนุนจากสภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยที่ตั้งเป้ายอดผลิตรถยนต์ปี 2567 ที่ 1.9 ล้านคัน ซึ่งมีอัตราการเติบโตร้อยละ 3.17% จากปี 2566 [1] ส่งผลให้การประกอบกิจการบริการรับฝากรถมีการขยายตัวตาม รวมถึงการนำเทคโนโลยีดิจิทัลต่าง ๆ มาช่วยในการบริหารจัดการที่จอดรถเพื่ออำนวยความสะดวกให้กับผู้ให้บริการและผู้ใช้บริการ ร้านรับฝากรถป็นทอง รายวัน-รายเดือน ตั้งอยู่ในเขตตำบลบ้านพร้าว อำเภอบ้านพะยอม จังหวัดพัทลุง เป็นร้านที่ประกอบกิจการบริการรับฝากรถ ซึ่งนำเทคโนโลยีในส่วนของบริษัทโมท ระบบคีย์การ์ด และไลน์สำหรับการแจ้งเตือนข้อมูลไปยังลูกค้า มาใช้ในการดำเนินงาน สอดคล้องกับงานวิจัยหลาย ๆ งานที่มีการนำเทคโนโลยีดิจิทัลเข้ามาช่วยในการจัดการให้บริการรับฝากรถ แต่จากการสอบถามผู้ให้บริการพบว่า การให้บริการรับฝากรถสำหรับลูกค้ารายวันนั้น จะใช้เป็นระบบโมท และลูกค้ารายเดือนจะเป็นระบบคีย์การ์ดและมีการขอไลน์และเบอร์โทรศัพท์ของลูกค้าที่มาใช้บริการ ซึ่งพบปัญหาว่าการให้บริการโดยใช้ระบบการติดต่อผ่านไลน์นั้นมีการเก็บข้อมูลที่ยังไม่เป็นระเบียบ ไม่ได้จัดเก็บข้อมูลลูกค้าอย่างเป็นระบบ ทำให้การตรวจสอบหรือค้นหาประวัติข้อมูลทำได้ยาก หากมีการจัดทาระบบที่มีการนำเทคโนโลยีการจัดการข้อมูลรถยนต์จะทำให้เป็นระเบียบมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของบุษราคัม อรุณรัตน์ และคณะ [2] ได้ทำการวิจัยเรื่องการพัฒนากระบวนการบริหารจัดการรับฝากรถ โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาระบบบริหารจัดการรับฝากรถและประเมินประสิทธิภาพของระบบบริหารจัดการรับฝากรถ ซึ่งเป็นระบบงานที่พัฒนาเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Microsoft Visual Basic โดยใช้ฐานข้อมูล Microsoft SQL Server 2008 R2 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่าระบบสามารถจัดเก็บเอกสารที่ง่ายต่อการค้นหาสามารถจัดการข้อมูลรับฝากรถ และแสดงรายงานได้อย่างถูกต้อง และงานวิจัยของ Sathya, D. และคณะ [3] ได้ทำการวิจัยเรื่องระบบจัดการที่จอดรถ โดยพัฒนาเป็นเว็บแอปพลิเคชันที่ใช้เทคโนโลยีช่วยค้นหาตำแหน่งการจอดรถที่จอดรถในลานจอดรถไปจนถึงขั้นตอนการชำระเงิน โดยใช้โปรแกรมจำลองเว็บเซิร์ฟเวอร์ Apache Tomcat และใช้ฐานข้อมูล SQL Server ผลการวิจัยพบว่าระบบนี้จะตรวจสอบจำนวนผู้ใช้งานของช่องจอดรถและจัดเตรียมเกี่ยวกับการให้บริการของช่องจอดรถสำหรับลูกค้า และช่วยปรับปรุงการจัดการเวลาที่มีประสิทธิภาพ รวมถึงงานวิจัยของ Monika Ingole และคณะ [4] ที่ดำเนินการวิจัยเรื่องระบบที่จอดรถแบบ QR-Based ที่ใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยี QR Code ใน

การตรวจสอบสิทธิและควบคุมการเข้าถึงที่จอดรถ รถที่ลงทะเบียนแต่ละคันจะได้รับ QR Code ที่ไม่ซ้ำกัน ซึ่งเชื่อมโยงกับเจ้าของรถ และข้อมูลการจอดรถที่เกี่ยวข้อง แล้วประตูทางเข้าจะสามารถเปิดปิดอัตโนมัติและบันทึกเวลาเข้าออกได้ ผลการวิจัยพบว่า เมื่อเจ้าของรถเข้าสู่สถานที่จอดรถแล้วจะสแกน QR Code ซึ่งกำหนดให้กับช่องพื้นที่จอดรถเฉพาะของตนเอง และสามารถเข้าจอดได้ลดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ให้บริการกับเจ้าของรถ โดยระบบสามารถช่วยให้การดำเนินงานเป็นไปอย่างราบรื่น และงานวิจัยของ ศรารวรรณ คำคำ และสายรุ้ง แสงวงลาภ [5] ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบบริหารจัดการงานยานพาหนะ ศึกษาคุณภาพของระบบบริหารจัดการงานยานพาหนะ และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบบริหารจัดการงานยานพาหนะ ผลการวิจัยพบว่าระบบบริหารจัดการงานยานพาหนะ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี มีผลประเมินประสิทธิภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญด้านระบบสารสนเทศนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม มีคุณภาพ สามารถใช้งานได้จริง การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบ โดยทำการทดลองใช้งานด้านนำเข้าข้อมูล กระบวนการทำงาน และการแสดงผลจัดอยู่ในระดับดี จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ มาช่วยในการดำเนินงานเพื่อให้การบริการรับฝากรถได้รับความสะดวก เกิดเป็นบริการที่ดีต่อลูกค้า รวมถึงจากปัญหาที่พบในร้านรับฝากรถป็นทอง รายวัน-รายเดือน ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนางานวิจัยเป็นเว็บแอปพลิเคชันการจัดการรับฝากรถยนต์และแจ้งเตือนข้อมูลผ่านไลน์ โดยใช้กรณีศึกษาร้านรับฝากรถป็นทอง รายวัน-รายเดือน ในตลาดป่าพะยอม ตำบลบ้านพร้าว อำเภอบ้านพะยอม จังหวัดพัทลุง เพื่อช่วยให้ง่ายต่อการตรวจสอบรายละเอียดของรถค่านวนค่าบริการ โดยระบบที่ทำการพัฒนานี้จะช่วยผู้ให้บริการ ลูกค้ารายเดือน และลูกค้ารายวันสามารถใช้งานได้สะดวกตามขอบเขตการทำงานคือ ในส่วนผู้ให้บริการสามารถลงทะเบียนสมาชิก ลงทะเบียนรถ รับฝากรถ ทำสัญญา รับเงินแจ้งเตือนข้อมูลการรับเงิน แจ้งเตือนข้อมูลสัญญา พิมพ์รายงานฝากรถ และสามารถตั้งค่าเวลาเปิด-ปิด ร้านและอัตราค่าบริการได้ ในส่วนผู้ให้บริการสามารถดูข้อมูลสัญญา ข้อมูลการชำระเงิน และรับการแจ้งเตือนผ่านไลน์ได้ ผู้วิจัยได้ทำการประเมินทดลองการใช้งานและตอบแบบสอบถาม โดยสถิติที่ใช้คือค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับคือทำให้ง่ายในการจัดการข้อมูลของผู้ที่ใช้บริการรับฝากรถ สามารถจัดทำรายงานการเข้าใช้บริการได้

2. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยประกอบด้วยขั้นตอน 1) การวิเคราะห์และออกแบบระบบ ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสอบถามสถานประกอบการ แล้วทำการวิเคราะห์และออกแบบระบบ ออกแบบหน้าจอการทำงานจากระบบด้วยโปรแกรม Figma [6] ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบเว็บไซต์ แอปพลิเคชัน โลโก้ และอื่น ๆ ทำให้มีออกแบบ UX/UI สะดวกมากขึ้น 2) การพัฒนาระบบเว็บแอปพลิเคชันด้วยภาษา PHP ฐานข้อมูล MySQL และใช้ Bootstrap Framework [7] ซึ่งเป็นกรอบการทำงานเพื่อส่งเสริมความสอดคล้องของการแสดงผลเว็บไซต์ โดยการรวมชุดคำสั่ง HTML, CSS และ JavaScript เข้าด้วยกันเพื่อกำหนดรูปแบบของการพัฒนาเว็บไซต์ให้ใช้งานได้ง่ายและสะดวก โดยเปิดให้ใช้งานแบบโอเพ่นซอร์ส ที่มีการใช้งานเว็บแอปพลิเคชันและเว็บไซต์ทั่วโลก ในส่วนการแจ้งเตือนข้อมูลใช้ Line Notify [8] โดยเป็นบริการรับการแจ้งเตือนในรูปแบบ API สามารถนำไปต่อยอดพัฒนาโปรเจกต์ต่างๆ สร้างการแจ้งเตือนแบบข้อความไปยังกลุ่มหรือบัญชีส่วนตัวได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย โดยผู้วิจัยได้แสดงสถาปัตยกรรมของระบบดังภาพที่ 1 และ 3) ทดสอบระบบด้วยวิธีการ black box testing box testing [9] โดยให้ผู้เชี่ยวชาญทำการทดสอบการทำงานตามกรณีทดสอบที่กำหนดไว้ให้ตรงตามผลลัพธ์ ไม่ได้สนใจในขั้นตอนการการพัฒนาระบบ จากนั้นดำเนินการประเมินความพึงพอใจจากการใช้งานระบบ โดยใช้แบบสอบถามความพึงพอใจ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการประเมินทดสอบระบบ ประกอบด้วยผู้ใช้งานจากสถานประกอบการร้านรับฝากรถปิ่นทอง รายวัน-รายเดือน จำนวน 1 คน และบุคคลทั่วไปที่มาใช้บริการรับฝากรถปิ่นทอง รายวัน-รายเดือน จำนวน 35 คน สถิติที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน [10]

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

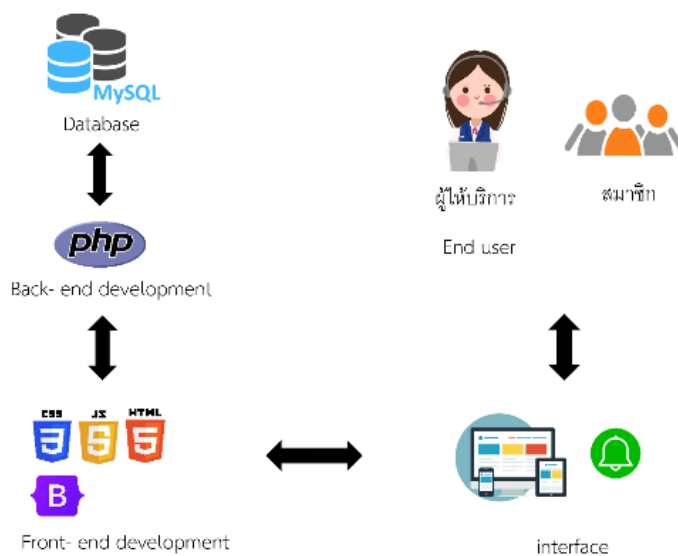
ผลการวิเคราะห์และออกแบบระบบ โดยนำข้อมูลจากการศึกษามาจัดทำ และออกแบบกระบวนการทำงาน คือ 1) เข้าสู่ระบบ ดูข้อมูลสัญญาข้อมูลการชำระเงิน และรับการแจ้งเตือนผ่านไลน์ มีผู้ใช้งานคือ ผู้ใช้บริการรายเดือน โดยผู้ใช้บริการรายวันสามารถรับการแจ้งเตือนผ่านไลน์ 2) เข้าสู่ระบบ จัดการข้อมูลและตรวจสอบข้อมูลการรับฝากรถ ดูรายงานและตั้งค่าการบริการ มีผู้ใช้งานคือผู้ให้บริการ โดยแสดงภาพโครงสร้างระบบดังภาพที่ 2 โดยมีการแสดงตัวอย่างหน้าจอการทำงานจากระบบเว็บแอปพลิเคชัน

ชั้นนี้ดังภาพที่ 3 - 6 และผลการทดสอบระบบด้วยวิธีการ black box testing ซึ่งเป็นการทดสอบการทำงานของระบบให้เป็นไปตามกรณีทดสอบที่ใช้ ซึ่งกำหนดรายละเอียดการทดสอบและผลการทดสอบที่คาดหวัง โดยพิจารณาจากกระบวนการทำงานทั้งหมดที่ได้ออกแบบไว้ ผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถทำงานได้ตามถูกต้องครอบคลุมทุกกรณีที่ใช้ในการทดสอบ และได้แสดงตัวอย่างของกรณีที่ใช้ในการทดสอบการทำงานในส่วนการเข้าสู่ระบบ ดังตารางที่ 1

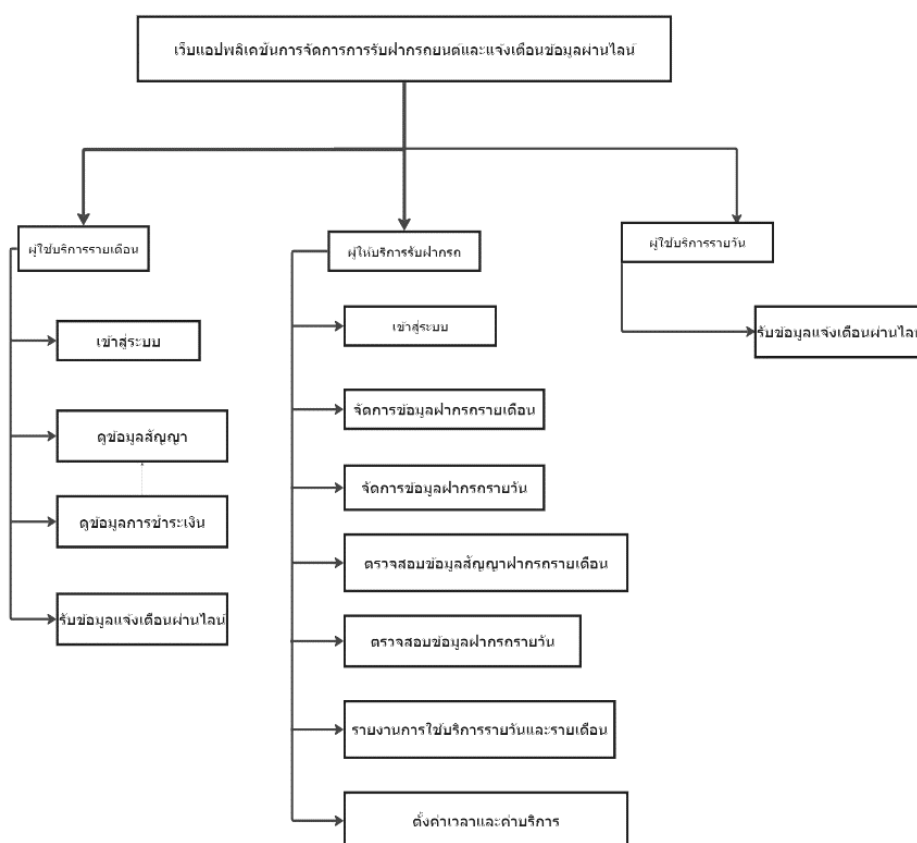
ตารางที่ 1 ตัวอย่างกรณีที่ใช้สำหรับทดสอบการทำงานในส่วนการเข้าสู่ระบบ

ลำดับ ที่	รายละเอียด การทดสอบ	ผลที่คาดหวัง	ผลการ ทดสอบ
1	ไม่ใส่ชื่อเข้าสู่ระบบและรหัสผ่าน	แสดงข้อความ “กรุณากรอกข้อมูลให้ครบ” รอรับชื่อเข้าสู่ระบบ และรหัสผ่าน	ผ่าน
2	ใส่ชื่อเข้าสู่ระบบซ้ำกับผู้อื่น	แสดงข้อความ “พบชื่อเข้าสู่ระบบในระบบ กรุณาใช้ชื่อเข้าสู่ระบบอื่น” รอรับชื่อเข้าสู่ระบบ	ผ่าน
3	ใส่ข้อมูลทั้งหมดถูกต้องและคลิกปุ่มเข้าสู่ระบบ	แสดงข้อความ “เข้าสู่ระบบสำเร็จ”	ผ่าน

ผลจากการประเมินการใช้งานระบบจากความพึงพอใจในการทำงานจากสถานประกอบการ 1 คน พบว่าผลการประเมินระดับความพึงพอใจมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.70 และจากกลุ่มผู้ใช้ทั่วไป 35 คน พบว่าผลการประเมินระดับความพึงพอใจมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.39 และ ค่า S.D. เท่ากับ 0.68 โดยได้แสดงรายละเอียดของการประเมินดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



ภาพที่ 1 สถาปัตยกรรมของระบบ

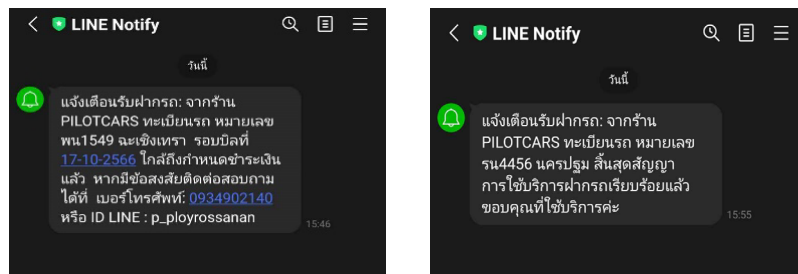


ภาพที่ 2 แผนภาพโครงสร้างของระบบ

The screenshot shows a web application interface for PILOT CARS. The main content area displays a table titled "ข้อมูลสัญญาเช่ารถ" (Car Rental Data). The table has 8 columns: เลขสัญญาเช่า (Rental Contract Number), ชื่อเช่ารถ (Renter Name), พาสปอร์ต (Passport), สัญชาติ (Nationality), วันที่เช่า (Rental Date), วันที่ส่งคืน (Return Date), สถานะ (Status), and หมายเหตุ (Remarks). The table contains 10 rows of data.

เลขสัญญาเช่า	ชื่อเช่ารถ	พาสปอร์ต	สัญชาติ	วันที่เช่า	วันที่ส่งคืน	สถานะ	หมายเหตุ
00000001	สมชาย ใจดี	987654321	ไทย (ไทย)	01-01-2565	01-01-2565	-	-
02345678	นางสาว ใจดี	123456789	ไทย (ไทย)	05-05-2565	05-05-2565	สิ้นสุดสัญญา	-
90123456	สมชาย ใจดี	987654321	ไทย (ไทย)	01-01-2565	01-01-2565	สิ้นสุดสัญญา	-
12345678	นางสาว ใจดี	123456789	ไทย (ไทย)	01-01-2565	01-01-2565	สิ้นสุดสัญญา	-
75432109	นายสมชาย ใจดี	987654321	ไทย (ไทย)	01-01-2565	01-01-2565	สิ้นสุดสัญญา	-
98765432	นางสาว ใจดี	123456789	ไทย (ไทย)	01-01-2565	01-01-2565	สิ้นสุดสัญญา	-
01234567	นายสมชาย ใจดี	987654321	ไทย (ไทย)	01-01-2565	01-01-2565	สิ้นสุดสัญญา	-
87654321	นางสาว ใจดี	123456789	ไทย (ไทย)	01-01-2565	01-01-2565	สิ้นสุดสัญญา	-
54321098	นายสมชาย ใจดี	987654321	ไทย (ไทย)	01-01-2565	01-01-2565	สิ้นสุดสัญญา	-
09876543	นางสาว ใจดี	123456789	ไทย (ไทย)	01-01-2565	01-01-2565	สิ้นสุดสัญญา	-

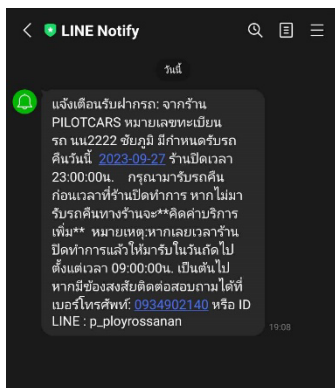
ภาพที่ 3 หน้าจอแสดงข้อมูลสัญญาเช่ารถสำหรับผู้ให้บริการรายเดือน



ภาพที่ 4 หน้าจอแสดงข้อมูลการแจ้งเตือนผ่านไลน์สำหรับผู้ให้บริการรายเดือน

The screenshot shows a web application interface for PILOT CARS. The main content area displays a form titled "เช่ารถรายวัน" (Daily Car Rental). The form has several input fields: "เช่ารถวันที่:" (Rental Date), "LINE token:", "เลขทะเบียนรถ:" (Vehicle Registration Number), "จังหวัด:" (Province), "ปีเช่ารถ:" (Rental Year), "วันที่เช่ารถ:" (Rental Date), "จำนวนเงินที่เช่า:" (Rental Amount), and "เลขการจองรถรายวัน:" (Daily Car Rental Booking Number). There is a "จอง" (Book) button at the bottom right.

ภาพที่ 5 หน้าจอแสดงข้อมูลการรับฝากรถสำหรับผู้ให้บริการรายวัน



ภาพที่ 6 หน้าจอแสดงข้อมูลการแจ้งเตือนผ่านไลน์สำหรับผู้ใช้บริการรายวัน

ตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจจากการทดลองใช้งานระบบโดยสถานประกอบการ จำนวน 1 คน

ข้อ	รายการ	ผลการประเมิน (ค่าเฉลี่ย)
ด้านการทำงานของระบบ		
1	ระบบใช้งานง่าย	5.00
2	ความเหมาะสมของเมนูการใช้งาน	4.00
3	ความถูกต้องในการเชื่อมโยงข้อมูลภายในระบบ	5.00
4	ความรวดเร็วในการโหลดข้อมูล	5.00
5	ความสะดวกในการใช้งานระบบ	5.00
รวมด้านการทำงานของระบบ		4.80
ด้านการออกแบบ		
1	ขนาดและรูปแบบตัวอักษรเหมาะสมและง่ายต่อการอ่าน	4.00
2	ความสวยงาม และน่าสนใจของระบบ	4.00
3	สีของตัวอักษรและพื้นหลังเหมาะสม	5.00
4	การจัดวางองค์ประกอบแต่ละส่วนมีความเหมาะสม	5.00
5	ภาพที่ใช้ประกอบมีขนาดเหมาะสม	5.00
รวมด้านการออกแบบ		4.60
รวม		4.70

ตารางที่ 3 ผลการประเมินความพึงพอใจจากการทดลองใช้งานระบบโดยผู้ให้บริการ จำนวน 35 คน

ข้อ	รายการ	ผลการประเมิน	
		ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.
ด้านการทำงานของระบบ			
1	ระบบใช้งานง่าย	4.54	0.55
2	ความเหมาะสมของเมนูการใช้งาน	4.46	0.50
3	ความถูกต้องในการเชื่อมโยงข้อมูลภายในระบบ	4.37	0.48
4	ความรวดเร็วในการโหลดข้อมูล	4.37	0.68
5	ความสะดวกในการใช้งานระบบ	4.37	0.68
ด้านการออกแบบ			
1	ขนาดและรูปแบบตัวอักษรเหมาะสมและง่ายต่อการอ่าน	4.46	0.55
2	ความสวยงาม และน่าสนใจของระบบ	4.49	0.60
3	สีของตัวอักษรและพื้นหลังเหมาะสม	4.40	0.64
4	การจัดวางองค์ประกอบแต่ละส่วนมีความเหมาะสม	4.40	0.60
5	ภาพที่ใช้ประกอบมีขนาดเหมาะสม	4.31	0.62
รวม		4.39	0.68

จากตารางที่ 2 ผลประเมินความพึงพอใจที่มีต่อการใช้งานระบบโดยสถานประกอบการ อยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจในด้านการทำงานของระบบน้อยกว่าด้านการออกแบบสอดคล้องกับข้อเสนอแนะที่ต้องการให้ปรับขนาดการจัดวางตัวอักษรและการใช้พื้นที่บนหน้าจอการทำงานให้มีความเหมาะสมน่าใช้งานให้มากกว่านี้ และจากตารางที่ 3 ผลประเมินความพึงพอใจที่มีต่อการใช้งานระบบอยู่ในระดับมากและมีข้อเสนอแนะในเรื่องขนาดตัวอักษรและการใช้พื้นที่บนหน้าจอการทำงานเช่นเดียวกัน

4. สรุปผลการวิจัย

เว็บแอปพลิเคชันการจัดการรับฝากรถยนต์ และแจ้งเตือนข้อมูลผ่านไลน์ สามารถทำงานได้ รองรับการใช้งานสำหรับผู้ใช้ 3 กลุ่ม คือ ผู้ให้บริการ ลูกค้ารายเดือน และลูกค้ารายวัน โดยเว็บแอปพลิเคชันนี้สามารถให้บริการในการลงทะเบียนข้อมูลสมาชิก ข้อมูลรถ ทำสัญญาการรับฝาก รับชำระเงิน แจ้งเตือนข้อมูลถึงเวลาจ่ายเงิน แจ้งเตือนข้อมูลใกล้สิ้นสุดสัญญา แจ้งเตือนข้อมูลวันคืนรถและข้อมูลใกล้ถึงเวลารับคืน รวมถึงการออกรายงานการรับฝากรถ การตั้งค่าเวลาเปิด-ปิดร้าน และกำหนดอัตราค่าบริการรับฝากรถ ผลการประเมินความพึงพอใจในการทำงานของเว็บแอปพลิเคชันนี้ พบว่าผลการประเมินอยู่ในระดับความพึงพอใจมาก มีค่าเฉลี่ยรวม 4.39 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.68 และมีข้อเสนอแนะในเรื่องการออกแบบขนาดตัวอักษรและการใช้พื้นที่บนหน้าจอการทำงาน เพื่อให้ง่ายต่อการอ่านและการใช้งาน โดย

งานในอนาคตสามารถพัฒนาเพิ่มเติมได้ในส่วนการต่อสัญญาอัตโนมัติ โดยไม่ต้องให้ผู้ให้บริการทำสัญญาใหม่ เพื่อให้เว็บแอปพลิเคชันนี้มีความสมบูรณ์ครบถ้วนสำหรับการใช้งานต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุงที่สนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัยให้สำเร็จด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักข่าวไอโฟแนนซ์ไทย. ส.อ.ท. คาดยอดผลิตรถยนต์ปี 67 อยู่ที่ 1.9 ล้านคัน โต 3.17% จากปี 66 มียอดผลิต 1.8 ล้านคัน. 2567. [อินเทอร์เน็ต]. เข้าถึงเมื่อ 22 เมษายน 2567. จาก <https://www.efinancethai.com/LastestNews/LatestNewsMain.aspx?release=y&ref=M&id=UXE0SS9rbnR1b0U9>
- [2] บุษราคัม อรุณรัตน์, ดารวธา วีระพันธ์ และณัฐริต อนุพงศ์. การพัฒนาระบบบริหารจัดการรับฝากรถ. วารสารวิจัยและนวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2563; 2(2):45-58.
- [3] Sathya, D, Nithya Roopa S, Sudha V, et al. Parking management system. 2021 International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA). DOI:10.1109/ICAECA52838.2021.9675691

- [4] Monika Ingole, Chandrashekhar Patle, Shubhangi Gahane, et al. QR BASED CAR PARKING SYSTEM. 2023. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. DOI: 10.56726/IRJMETS47293
- [5] ศราวรรณ คำคำ และสายรุ้ง แสงวงลาภ. การพัฒนาระบบบริหารบริหารจัดการงานยานพาหนะ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี. 2567; 18(1):70-80.
- [6] THE GROWTH MASTER TEAM. CASE STUDY: เปิดกลยุทธ์ Figma แพลตฟอร์มออกแบบ UX/UI สร้างการเติบโตกว่า 1 หมื่นล้านเหรียญภายใน 4 ปี. 2565. [อินเทอร์เน็ต]. เข้าถึงเมื่อ 22 เมษายน 2567. จาก [https:// thegrowthmaster.com/case-study/figma](https://thegrowthmaster.com/case-study/figma)
- [7] Jacob Lett. Bootstrap 4 Quick Start. 2019. [internet]. Bootstrap Creative. Available from: <https://bootstrapclasses.com/wp-content/uploads/2017/11/bootstrap-tutorial.pdf>
- [8] วุฒิพงษ์ ชินศรี. Practical Building a Powerful LINE OA for Developer. กรุงเทพฯ: ไอทีซี พรีเมียร์; 2566.
- [9] Ralf Bierig, Stephen Brown, Edgar Galván, et al. Essentials of software testing. Cambridge University Press; 2022.
- [10] บุญชม ศรีสะอาด. การวิจัยเบื้องต้น (พิมพ์ครั้งที่ 10). กรุงเทพฯ: สุวีริยาสาส์น; 2560

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและต้านแบคทีเรียในช่องปากของสารสกัดจากเปลือกมังคุด

Antioxidant and anti-oral bacteria activities of *Garcinia mangostana* L. peel extractสมพล คนเพียร¹, ณัฐอัษฎ์ นราสุขปริพัฒน์², พิชชาภา แก้วงามอรุณ³, ศิริรัตน์ ยอดสุดา⁴,ณัฐพิมล กมลสิทธิชัย⁵, วรทยา ว่องวานิชย์⁶, ณัทพร มโนใจ^{1*}Somphon Khonphian¹, Nudtha-undh Narasukparipat², Phitchapa Keongamaroon³,Sirirat Yodsuda⁴, Natpimon Kamonsitichai⁵, Warattaya Wongpanich⁶, Natthaporn Manojai^{1*}¹ สาขาวิทยาศาสตร์พื้นฐานและวิทยาศาสตร์การแพทย์ คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยปทุมธานี

140 หมู่ 4 ถนนติวานนท์ ตำบลบ้านกลาง อำเภอเมือง ปทุมธานี 10200

² โรงเรียนเตรียมวิทยพัฒนา 31-35 ซอยรามอินทรา 44 แขวงรามอินทรา เขตคันนายาว กรุงเทพมหานคร 10230³ โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร 174 ซ. สุขุมวิท 23 แขวงคลองเตยเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพมหานคร 10110⁴ โรงเรียนสาธิตนานาชาติ มหาวิทยาลัยมหิดล 999 ถ. พุทธมณฑลสาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล นครปฐม 73170⁵ โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปทุมวัน 2 ถ. อังรีนังต์ แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330⁶ โรงเรียนนานาชาติราฟาเอลอเมริกัน 15/4 หมู่ที่ 15 ทางคู่ขนาน ถนนบางนา-ตราด ตำบลบางแก้ว อำเภอบางพลี สมุทรปราการ 10540¹Division of Basic and Medical Sciences, Faculty of Allied Health Sciences, Pathumthani University, 140 Moo 4, Tiwanon Road, Ban Klang, Mueang, Pathumthani, Thailand 12000²Triamwit Pattana, Pre-Medical School, 31-35 Soi Ram Intra 44, Ram Inthra, Khan Na Yao, Bangkok 10230³Srinakharinwirot University Prasarnmit Demonstration School, 174 Soi Sukhumvit 23, Khlong Toei Nuea, Watthana, Bangkok 10110⁴Mahidol University International Demonstration School, 999 Phutthamonthon Sai 4 Rd, Salaya, Phutthamonthon District, Nakhon Pathom 73170⁵Patumwan Demonstration School, Srinakharinwirot University, 2 Henri Dunant Rd, Pathum Wan, Bangkok 10330⁶Raffles American School, 15/4 Moo15 Bang Na-Trat Frontage Rd, Bang Kaeo, Bang Phli District, Samut Prakan 10540

*Corresponding author Email: drnattha.m@gmail.com

Received: 08-02-2024 Revised: 23-05-2025 Accepted: 30-06-2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปริมาณฟีนอลิกรวม ฟลาโวนอยด์รวม ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและต้านแบคทีเรียในช่องปากของสารสกัดจากเปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana* L.) พบว่าสารสกัดจากเปลือกมังคุดมีปริมาณฟีนอลิกรวม 0.181 ± 0.009 mgGAE/gDW และฟลาโวนอยด์รวม 1.32 ± 0.60 mgQE/gDW ซึ่งสูงกว่าสารสกัดมังคุดมาตรฐาน การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยใช้วิธี DPPH radical scavenging assay แสดงให้เห็นว่าสารสกัดจากเปลือกมังคุดมีศักยภาพต้านอนุมูลอิสระที่ดีกว่าสารสกัดมาตรฐาน นอกจากนี้การทดสอบฤทธิ์การต้านแบคทีเรียในช่องปากของสารสกัดจากเปลือกมังคุดโดยวิธี disc diffusion assay มีเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ยับยั้งเฉลี่ยประมาณ 9.27 ± 0.2 mm ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสารสกัดจากเปลือกมังคุดมีศักยภาพในการพัฒนาเพิ่มเติมและเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการใช้เป็นสารต้านแบคทีเรียในช่องปาก

คำสำคัญ: เปลือกมังคุด, แบคทีเรียในช่องปาก, สารต้านอนุมูลอิสระ

ABSTRACT

This research studied the total phenolic content, total flavonoid content, antioxidant activity, and antibacterial effects in the oral cavity of extracts from mangosteen peel (*Garcinia mangostana* L.). It was found that the extract from mangosteen peel had higher total phenolic (0.181 ± 0.009 mgGAE/gDW) and total flavonoid content (1.32 ± 0.60 mgQE/gDW) compared to standard mangosteen extracts. The antioxidant activity tested using the DPPH radical scavenging assay showed that the mangosteen peel extract had better antioxidant potential than the standard extract. Additionally, the antibacterial activity in the oral cavity of the mangosteen peel extract, tested using the disc diffusion assay, showed an average inhibition zone diameter of approximately 9.27 ± 0.2 mm. These results indicate that the mangosteen peel extract has potential for further development and serves as an alternative for use as an antibacterial agent in the oral cavity.

Keywords: mangosteen peels, oral bacteria activity, antioxidant

1. บทนำ

สุขภาพช่องปากถือได้ว่าเป็นความสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตประจำวัน ที่ไม่เพียงแต่จะส่งผลต่อสุขภาพทางกายเท่านั้น แต่ยังรวมถึงปฏิสัมพันธ์ทางสังคมและคุณภาพชีวิตอีกด้วย จากข้อมูลการประชุมวิชาการทันตสาธารณสุขแห่งชาติ ครั้งที่ 9 พ.ศ. 2566 รายงานว่าเด็กอายุ 3-5 ปี กว่า 75.6% มีประสบการณ์ฟันน้ำนมผุ เด็กวัยเรียนอายุ 12 ปี 52% มีประสบการณ์การเกิดโรคฟันแท้ผุ วัยทำงานอายุ 35 - 44 ปี มีปัญหาสภาวะปริทันต์ที่พบการอักเสบของเหงือก 51.0% [1] นอกจากนี้ในกลุ่มผู้สูงอายุ 60-70 ปี มีฟันผุที่ใช้งานได้บางส่วน 20 ซี่ 56.1% และการสูญเสียฟันจนต้องใส่ฟันเทียมบางส่วน 42.6% มีผู้ที่มีฟันผุที่ยังไม่ได้รับการรักษา 52.6% รวมถึงพบผู้ที่มีสภาวะปริทันต์อักเสบรุนแรง 12.2% [2-3]

ระบบนิเวศภายในช่องปากมีความซับซ้อนที่ประกอบด้วยจุลินทรีย์หลากหลายชนิด ถึงแม้ว่าภายในช่องปากจะมีจุลินทรีย์ที่ช่วยรักษาสุขภาพสมดุลภายในช่องปากก็ตาม แต่ความไม่สมดุลในองค์ประกอบหรือการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบางชนิดที่มากเกินไป อาจนำไปสู่ปัญหาสุขภาพช่องปากต่างๆ ได้ เช่น โรคฟันผุ โรคเหงือกอักเสบ และโรคปริทันต์อักเสบ นอกจากนี้แบคทีเรียบางชนิดในช่องปากยังมีส่วนทำให้เกิดภาวะกลิ่นปากอีกด้วย จากการศึกษาสารสกัดจากธรรมชาติและสมุนไพรไทยที่มีคุณสมบัติในการรักษาโรคในช่องปาก อาทิเช่น ฝรั่ง [4] ว่านหางจระเข้ [5] ใบบัวบก [6] ฟ้ายะลวยโจร [7] ข่อย [8] ชุมเห็ดเทศ [9] กระชาย [10] มะขามป้อม [11] ยูคาลิปตัส ที่สามารถยับยั้งเชื้อ *Streptococcus mutans* ที่ทำให้เกิดโรคฟันผุ [12] ผักหัวคราดหัวแหวน [13] ที่ช่วยบรรเทาอาการอักเสบในช่องปาก ตะไคร้ และข่อย [14] มีฤทธิ์ต้านการอักเสบที่ก่อให้เกิดเหงือกอักเสบ นอกจากนี้ยังพบว่ามะกอกป่า สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Streptococcus mutans* ได้ที่ระดับความเข้มข้นมากกว่า 3.0 mg/ml แต่ไม่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *Candida albicans* และเชื้อแบคทีเรีย *Haemophilus influenzae* ได้ [15] สารสกัดจากคาโมมายด์ สามารถป้องกันการเกิดเยื่อปากอักเสบได้ จึงมีการนำมาใช้เพื่อป้องกันและชะลอการเกิดเยื่อปากอักเสบในผู้ป่วยที่ได้รับการฉายแสงและยาเคมีบำบัด [16] ดังนั้นการแสวงหาสารประกอบธรรมชาติที่มีคุณสมบัติในการยับยั้งจุลินทรีย์และแบคทีเรียในช่องปาก รวมถึงรักษาโรคในช่องปากได้ จะนำไปสู่ความสนใจที่เพิ่มขึ้นในการสำรวจศักยภาพการออกฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดจากพืชและสมุนไพรไทย ที่จะเป็นส่วนหนึ่งในการผลักดันการพัฒนานวัตกรรมที่เกี่ยวข้องกับการดูแลสุขภาพในช่องปากได้อีกด้วย

มังคุด (*Garcinia mangostana* L.) เป็นหนึ่งในผลไม้ไทยประสิทธิภาพสูงที่มีคุณสมบัติยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในช่องปากได้ [17-20] เปลือกมังคุดที่เหลือทิ้งจากการบริโภคนั้นเป็นแหล่งอุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ รวมถึงสารต้านการเกิดออกซิเดชันซึ่งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับความผิดปกติด้าน

สุขภาพต่าง ๆ รวมถึงโรคในช่องปาก การแพร่กระจายของแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคฟันผุ โรคปริทันต์ และกลิ่นปาก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและต้านแบคทีเรียในช่องปาก *Streptococcus spp.* และ *Rhothia spp.* ของสารสกัดจากเปลือกมังคุดที่เหลือทิ้งจากการบริโภค เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางทันตกรรม และยังเป็นการสร้างมูลค่าจากเปลือกมังคุดเหลือทิ้งอีกด้วย

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี

เปลือกมังคุดเหลือทิ้งจากตลาดรังสิต จังหวัดปทุมธานี สารสกัดเปลือกมังคุดมาตรฐาน (*Garcinia Mangostana Peel Extract*; PYCM ประเทศไทย) เมทานอล (Kemaus; Australia) เอทานอล (องค์การสุรา; ประเทศไทย) กรดแกลิก (Acros# 41086; Germany) 2, 2 - diphenyl-1 - picrylhydrazyl; DPPH (Aldrich#D9132; USA) เควอซิติน (Glenthams#GP9232; UK)

2.2 การสกัดสารสำคัญจากเปลือกมังคุด [21]

คัดเลือกเปลือกมังคุดเหลือทิ้งจากการบริโภค ปอกเปลือกแช่ด้านนอกออกแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปผึ่งตากลมให้แห้งอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จนเปลือกมังคุดแห้งสนิท จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดจนละเอียด นำผงเปลือกมังคุด 100 g ไปแช่ในสารละลายเมทานอล (CH_3OH) 100 ml เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นกรองเอาสารละลายที่ได้ ไปเข้าเครื่องระเหยสุญญากาศจนได้สารสกัดเปลือกมังคุดเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไป

2.3 การหาปริมาณฟีนอลิกรวมโดยวิธี Folin-Ciocalteu reagent [22]

เตรียมสารละลายมาตรฐานกรดแกลิก (gallic acid) สารสกัดมังคุดมาตรฐานซึ่งเป็นสารสกัดมังคุดที่มีขายตามท้องตลาด และสารสกัดเปลือกมังคุดโดยการเจือจางด้วย 95% เอทานอล ที่ความเข้มข้น 0.020, 0.031, 0.062, 0.125, 0.250, 0.500 และ 1.000 mg/ml จากนั้นปิเปตสารสกัดเปลือกมังคุด 20 μl ลงในไมโครเพลท 96-well เติมสารละลาย 10% Folin-Ciocalteu reagent 100 μl ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที ที่อุณหภูมิห้องในที่มืด เติมสารละลาย 15% Sodium carbonate (Na_2CO_3) 80 μl ตั้งทิ้งไว้อีก 90 นาที ที่อุณหภูมิห้องในที่มืด จากนั้นนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 nm ด้วยเครื่อง Microplate reader ยี่ห้อ BioTek รุ่น Synergy H1 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำไปหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมในสารสกัดเปลือกมังคุดเปรียบเทียบกับกราฟของสารละลายมาตรฐานกรดแกลิก

2.4 การหาปริมาณฟลาโวนอยด์รวมโดย Aluminium chloride colorimetric [23]

ปิเปตสารสกัดมังคุดมาตรฐาน สารสกัดเปลือกมังคุด ความเข้มข้น 0.016 mg/ml -1.000 mg/ml และสารละลายมาตรฐานเควอซิตินเป็นสารละลายมาตรฐานลงในไมโครเพลท 96-well เติมสารละลาย 5% Sodium nitrite (NaNO_2) 10 μl ตั้ง

ไว้ที่อุณหภูมิห้อง 5 นาที แล้วเติมสารละลาย 10% Aluminum chloride (AlCl_3) 10 μl นำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 nm ด้วยเครื่อง Microplate reader ยี่ห้อ BioTek รุ่น Synergy H1 ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ครั้ง คำนวณหาค่าปริมาณฟลาโวนอยด์รวมจากสมการเส้นตรง ($y = mx+c$) ของกราฟมาตรฐานเคอซีทิน

2.5 การทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging assay [24]

เตรียมสารละลาย 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) 0.25 mM ในเอทานอล 80% เตรียมสารมาตรฐานกรดแอสคอร์บิกในน้ำกลั่น ความเข้มข้น 0.015, 0.031, 0.063, 0.125, 0.250, 0.500 และ 1.000 mg/ml และเตรียมสารสกัดมังคุดมาตรฐานและสารสกัดเปลือกมังคุดที่ความเข้มข้น 0.015 mg/ml - 1.000 mg/ml นำสารสกัด 20 μl ใส่ลงในไมโครเพลท 96-well เติมน้ำกลั่นที่มีสารละลาย DPPH ที่เตรียมไว้ 180 μl ผสมกับสารมาตรฐานกรดแอสคอร์บิก ทั้งไว้ในที่มี 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง และนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 nm ด้วยเครื่อง Microplate reader ยี่ห้อ BioTek รุ่น Synergy H1 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณร้อยละ free radical scavenging activity จากสูตร

$$\% \text{ scavenging activity} = \frac{100 (A_0 - A_1)}{A_0}$$

เมื่อ A_0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของ control

A_1 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง

2.6 การทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อ *Streptococcus spp.* และ *Rhothia Spp.* โดยวิธี disc diffusion assay [25]

นำสำลีที่ปราศจากเชื้อชุบเชื้อแบคทีเรีย *Streptococcus spp.* และ *Rhothia spp.* แล้วนำไป swab บนอาหารแข็ง Miller Hilton Agar (MHA) ที่เตรียมไว้ วางแผ่น paper disc ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ลงบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ MHA จากนั้นหยดสารสกัดเปลือกมังคุดตำแหน่งละ 10 μl และใช้ 20 $\mu\text{g/ml}$ Chlorhexidine เป็น positive control จากนั้นนำไปบ่มเลี้ยงเชื้อที่อุณหภูมิ 35 - 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณยับยั้ง (inhibition zone) หรือวงใส (clear zone) โดยใช้ vernier caliper ในหน่วย mm ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

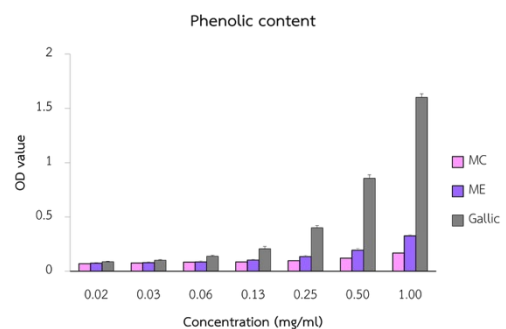
ข้อมูลทั้งหมดจะถูกสรุปในรูปแบบของ Mean and Standard Deviation (mean $\pm$ SD) โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง และคำนวณโดยใช้โปรแกรม ANOVA

3. ผลการวิจัย

3.1 การทดสอบหาฟีนอลิกรวมของสารสกัดเปลือก

มังคุด

การทดลองหาฟีนอลิกรวมของสารสกัดมังคุดมาตรฐาน (MC) และสารสกัดเปลือกมังคุด (ME) เปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกซึ่งใช้เป็น positive control (ภาพที่ 1) พบว่า ความเข้มข้นของกรดแกลลิกเพิ่มขึ้น ค่า OD ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น และค่า OD มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ความเข้มข้นของกรดแกลลิก 0.13, 0.25, 0.50 และ 1.00 mg/ml แสดงให้เห็นว่าปริมาณกรดแกลลิกเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับค่า OD และเมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดมังคุดมาตรฐาน สารสกัดเปลือกมังคุด และกรดแกลลิก จะเห็นความแตกต่างค่า OD ของสารสกัดมังคุดมาตรฐาน สารสกัดเปลือกมังคุด และกรดแกลลิก ได้อย่างชัดเจนที่ความเข้มข้น 0.13, 0.25, 0.50 และ 1.00 mg/ml และสารสกัดมังคุดมาตรฐาน จะมีค่า OD เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด สารสกัดเปลือกมังคุด มีค่า OD เพิ่มขึ้นอยู่ระหว่างสารสกัดมังคุดมาตรฐานและกรดแกลลิก ซึ่งมีค่า OD เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับสารสกัดมังคุดมาตรฐาน แต่มีค่า OD เพิ่มขึ้นน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับกรดแกลลิก เมื่อวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมโดยเทียบกับกราฟของสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกมีสมการเส้นตรงคือ $y = 1.5636x + 0.0428$ ($R^2 = 0.998$) พบว่าสารสกัดเปลือกมังคุดมาตรฐานและสารสกัดจากเปลือกมังคุดมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมเท่ากับ 0.081 ± 0.005 และ 0.181 ± 0.009 mgGAE/gDW ตามลำดับ (ตารางที่ 1) จะเห็นได้ว่าสารสกัดเปลือกมังคุดมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมมากกว่าสารสกัดมังคุดมาตรฐาน



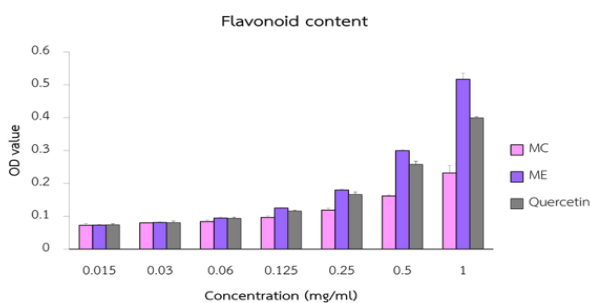
ภาพที่ 1 กราฟแสดงค่าดูดกลืนแสง (OD value) แสดงค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (mg/ml) ของสารสกัดมังคุดมาตรฐาน (MC) สารสกัดเปลือกมังคุด (ME) และกรดแกลลิก (gallic acid)

ตารางที่ 1 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมของสารสกัดมังคุดมาตรฐาน (MC) สารสกัดเปลือกมังคุด (ME) ที่ความเข้มข้น 1.000 mg/mL

สารสกัด	ปริมาณ (mgGAE/gDW)			
	ครั้งที่			เฉลี่ย±SD
	1	2	3	
MC	0.074	0.082	0.087	0.081±0.005
ME	0.184	0.192	0.168	0.181±0.009

3.2 การทดสอบหาสารประกอบฟลาโวนอยด์รวมของสารสกัดเปลือกมังคุด

จากการทดสอบหาสารประกอบฟลาโวนอยด์รวมของสารสกัดมังคุดมาตรฐาน และสารสกัดเปลือกมังคุดโดยเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานเคอควิทิน (ภาพที่ 2) พบว่าค่า OD ช่วงความเข้มข้น 0.015 mg/ml ถึงความเข้มข้น 0.06 mg/ml ของ สารสกัดมังคุดมาตรฐาน สารสกัดเปลือกมังคุด และเคอควิทินมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก จะเห็นความแตกต่างที่ชัดเจนของค่า OD ตั้งแต่ความเข้มข้น 0.125 mg/ml เป็นต้นไป เมื่อเปรียบเทียบค่า สารสกัดมังคุดมาตรฐาน สารสกัดเปลือกมังคุด และเคอควิทิน ตั้งแต่ความเข้มข้น 0.125 mg/ml, 0.25 mg/ml, 0.50 mg/ml และ 1.00 mg/ml จะพบว่า สารสกัดเปลือกมังคุด มีการเพิ่มขึ้นของค่า OD อย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือ เคอควิทิน และสารสกัดมังคุดมาตรฐานตามลำดับ เมื่อคำนวณปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวมเทียบกับกราฟของสารละลายมาตรฐานเคอควิทินโดยมีสมการเส้นตรง คือ $y = 0.3355x + 0.0738$ ($R^2 = 0.995$) พบว่าสารสกัดเปลือกมังคุดมาตรฐานและสารสกัดเปลือกมังคุด มีปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์เท่ากับ 0.47 ± 0.05 และ 1.32 ± 0.60 mgQE/gDW (ตารางที่ 2) จะเห็นได้ว่าสารสกัดเปลือกมังคุดมีปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวมมากกว่าสารสกัดมังคุดมาตรฐาน อีกทั้งสารสกัดเปลือกมังคุดยังมีปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวมมากกว่าเคอควิทินที่ความเข้มข้นเดียวกัน (ภาพที่ 2)



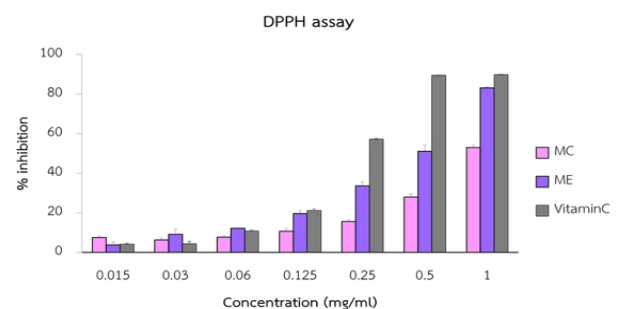
ภาพที่ 2 กราฟแสดงค่าดูดกลืนแสง (OD value) แสดงค่าปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (mg/ml) ของสารสกัดมังคุดมาตรฐาน (MC) สารสกัดเปลือกมังคุด (ME) และเคอควิทิน (quercetin)

ตารางที่ 2 ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวม ของสารสกัดมังคุดมาตรฐาน (MC) สารสกัดเปลือกมังคุด (ME) ความเข้มข้น 1.000 mg/mL

สารสกัด	ปริมาณ (mgQE/gDW)			
	ครั้งที่			เฉลี่ย±SD
	1	2	3	
MC	0.51	0.49	0.39	0.47±0.05
ME	1.25	1.31	1.40	1.32±0.60

3.3 การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดเปลือกมังคุด

จากการทดสอบการทดสอบหาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดเปลือกมังคุด ด้วยวิธี DPPH radical scavenging assay เปรียบเทียบกับกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) (ภาพที่ 3) พบว่า ในช่วงความเข้มข้น 0.015 mg/ml ถึง 0.125 mg/ml เกิดความผันผวนของค่าร้อยละการต้านออกซิเดชันของ DPPH radicals แต่หลังจากความเข้มข้น 0.125 mg/ml ค่าร้อยละการต้านออกซิเดชันของ DPPH radicals ของสารสกัดมังคุดมาตรฐาน สารสกัดเปลือกมังคุด และกรดแอสคอร์บิกมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบค่าร้อยละการต้านออกซิเดชันของ DPPH radicals ของสารสกัดมังคุดมาตรฐาน สารสกัดเปลือกมังคุด และกรดแอสคอร์บิก พบว่าค่าร้อยละการต้านออกซิเดชันของ DPPH radicals ของกรดแอสคอร์บิกมากที่สุด รองลงมาคือ สารสกัดเปลือกมังคุด และสารสกัดมังคุดมาตรฐาน ตามลำดับ การทดลองแสดงให้เห็นว่าสารสกัดเปลือกมังคุดมีประสิทธิภาพในการต้านออกซิเดชันมากกว่าสารสกัดมังคุดมาตรฐาน



ภาพที่ 3 กราฟแสดงร้อยละการยับยั้งอนุมูลอิสระ (%inhibition) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (mg/ml) ของสารสกัดมังคุดมาตรฐาน (MC) สารสกัดเปลือกมังคุด (ME) และกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid)

3.4 การทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย *Streptococcus spp.* และ *Rothia spp.*

ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย *Streptococcus spp.* และ *Rothia spp.* ด้วยวิธี disc diffusion assay ของสารสกัดเปลือกมังคุด (ตารางที่ 3) พบว่า ค่าเฉลี่ย inhibition zone ของ Chlorhexidine มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 16.85 ± 0.2 mm และ

สารสกัดเปลือกมังคุด ค่าเฉลี่ย inhibition zone มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 9.27 ± 0.2 mm ส่วนสารสกัดมังคุดมาตรฐาน ไม่พบการยับยั้งเชื้อ *Streptococcus spp.* แสดงให้เห็นว่า สารสกัดเปลือกมังคุด มีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Streptococcus spp.* แต่น้อยกว่า Chlorhexidine ส่วนการทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย *Rothia spp.* ของสารสกัดเปลือกมังคุดและสารสกัดมังคุดมาตรฐาน ไม่พบการต้านเชื้อ *Rothia spp.*

ตารางที่ 3 พื้นที่การยับยั้ง (inhibition zone) ของสารสกัดมังคุดมาตรฐาน สารสกัดเปลือกมังคุด และ Chlorhexidine

Compound	พื้นที่การยับยั้ง (inhibition zone)	
	<i>Streptococcus spp.</i>	<i>Rothia spp.</i>
Chlorhexidine	16.85 ± 0.2	14.32 ± 0.3
MC	-	-
ME	9.27 ± 0.2	-

4. สรุปผลการวิจัย

สารสกัดที่ได้เปลือกมังคุด พบว่า จากการทดลองหาสารประกอบฟีนอลิกรวม สารสกัดเปลือกจากมังคุดมีสารประกอบฟีนอลิกรวม มากกว่าสารสกัดมังคุดมาตรฐาน จากการทดลองหาสารประกอบฟลาโวนอยด์รวม พบว่าสารสกัดเปลือกมังคุดมีสารประกอบฟลาโวนอยด์รวมมากกว่าสารสกัดมังคุดมาตรฐาน และสารละลายมาตรฐานควอซิทินที่ความเข้มข้นเดียวกัน การทดสอบหาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging assay พบว่าสารสกัดเปลือกมังคุดมีประสิทธิภาพในการต้านออกซิเดชันมากกว่าสารสกัดมังคุดมาตรฐาน นอกจากนี้ ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี disc diffusion assay พบว่าสารสกัดเปลือกมังคุดค่าเฉลี่ย inhibition zone มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.27 ± 0.2 mm แต่ไม่พบการยับยั้งเชื้อ *Rothia spp.*

การศึกษาหาปริมาณและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดเปลือกมังคุด พบว่าในสารสกัดมังคุดนั้น มีสารจำพวกกลุ่มแซนโทน โดยเฉพาะแอลฟา-แมงโกสติน (α -mangostin) เป็นองค์ประกอบหลักสำคัญและมีปริมาณที่สูง เมื่อสกัดด้วยเอทานอล ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ Pedraza-Chaverri J. [26] ที่พบว่าสาร α -mangostin มีความเป็นพิษต่อเซลล์ร่างกายที่ต่ำ แต่มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ ได้แก่ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์ต้านการอักเสบ และฤทธิ์ต้านจุลชีพ อย่างไรก็ตาม ปริมาณของสารสำคัญในสารสกัดมังคุดยังขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น สายพันธุ์ของมังคุด ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยว วิธีการเตรียมวัตถุดิบก่อนการสกัด อุณหภูมิ ความเข้มข้นของตัวทำละลาย และระยะเวลาในการสกัด ซึ่งอาจมีผลต่อความคงตัว

ของ α -mangostin และสารอื่น ๆ ในกลุ่มแซนโทน เช่น γ -mangostin ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเช่นกัน ปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อความสม่ำเสมอของการสกัดในแต่ละครั้ง

จากผลการทดลองพบว่าสารสกัดเปลือกมังคุดมีประสิทธิภาพ ในยับยั้งการเจริญของ *Streptococcus spp.* โดยเฉพาะสายพันธุ์ที่อาจเป็นสาเหตุเกี่ยวข้องกับการเกิดโรคในช่องปาก เช่น *Streptococcus mutans* ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของฟันผุ และ *S. pyogenes* ที่เกี่ยวข้องกับการติดเชื้อทางเดินหายใจ การออกฤทธิ์ของสารสกัดมังคุดดังกล่าวอาจสัมพันธ์กับสารแซนโทน โดยเฉพาะ α -mangostin ที่สามารถทำลายแบคทีเรียโดยไปจับกับโครงสร้างของผนังเซลล์แบคทีเรีย อีกทั้งยังยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์โปรตีนภายในเซลล์ของแบคทีเรีย [27] อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าสารสกัดเปลือกมังคุดสามารถยับยั้งเชื้อ *Rothia spp.* ได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งจัดเป็นเชื้อ normal flora ที่พบบ่อยในช่องปากและทางเดินหายใจ ช่วยควบคุมสภาวะปกติในช่องปาก จึงอาจมีประโยชน์ในการควบคุมการแพร่กระจายของเชื้อก่อโรคได้ในช่องปากได้

จากผลการวิจัยนี้ สามารถนำเปลือกมังคุดที่เหลือทิ้งจากการบริโภค ทำให้มีมูลค่าและคุณค่ามากขึ้นโดยการนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับช่องปาก และนำไปต่อยอดพัฒนากระบวนการสกัดเปลือกมังคุดในการเป็นตัวยับยั้งเชื้อในช่องปากต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณาจารย์ผู้ร่วมงานวิจัย เครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ และขอขอบคุณคณาจารย์สาขาวิทยาศาสตร์พื้นฐานและวิทยาศาสตร์การแพทย์ คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยปทุมธานี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักทันตสาธารณสุข, กรมอนามัย. การประชุมวิชาการทันตสาธารณสุขแห่งชาติ ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ; 2566.
- [2] สำนักทันตสาธารณสุข, กรมอนามัย. รายงาน ประจำปี. กรุงเทพฯ; 2566.
- [3] เยาวเรศ วงศาสุลักษณ์, ณัฐมนันท์ ศรีทอง. การศึกษาการใช้บริการสุขภาพช่องปากในผู้สูงอายุไทย, วารสารวิชาการสาธารณสุข. 2567;33(1):49-62.
- [4] Mohamed YA, Allah AEA, Abass AN, et al. The antibacterial effect of pomegranate peel and guava leave extract mouthwash on oral *Streptococcus mutans* in scholar students: a controlled clinical study, J. Dent. Sci. 2022;25(3):359-363.
- [5] Nisha DS, Sebastian B, et al. Efficacy of aloe vera and probiotic mouthwashes vs fluoride mouthwash on *Streptococcus mutans* in plaque

- around brackets of orthodontic patients: a randomized clinical trial, *Randomized Controlled Trial Angle Orthod.* 2023;93(5):538-544
- [6] Luthfi M, Razak FA, Devy Putri Kusumawardhani DP, et al. The Effect of *Centella asiatica* methanolic extract on expression of IL-1 β proinflammatory cytokines in severe early childhood caries, *Eur J Dent.* 2023;17(4):1037-1042.
- [7] Kaewmanee PC, Aiumtrakul N, Sritaweessap P, et al. The effect of each crude extract from *Streblus asper*, *Andrographis paniculata* and *Curcuma longa* in combination with chlorhexidine for antimicrobial activity against *Streptococcus mutans*, *SWU Dent J.* 2023;16(2).
- [8] Lapinee C, Jumpatong K, Sansomchai P, Inhibition of *Streptococcus mutans* by extracted from *Streblus asper* for oral care product, *Journal of Applied Sciences, J. Applied Sci.* 2022;22(1):1-7.
- [9] Oliveira AB, Ferrisse TM, Annunzio SR, et al. In vitro evaluation of photodynamic activity of plant extracts from *Senna* species against microorganisms of medical and dental interest, *Pharmaceutics.* 2024;15(1):181.
- [10] Pham NN, Hieu TT, Chakole RD, et al. In-silico investigation on the inhibitory effect of compounds from essential oils of *Boesenbergia rotunda* on sortase-a of *Streptococcus mutans*, *S Afr J Bot* 2024;169:515-524.
- [11] Bane SP, Thosar NR, Rath NV, et al. Comparative evaluation of antibacterial efficacy of *Embllica officinalis* lollipop against *Streptococcus mutans* counts in institutionalized visually impaired children, *Cureus.* 2022;14(8):e28207.
- [12] Kaewmanee PC, Leesattrupai N, Techasaengmanee P, et al. The effect of antimicrobial activity against oral pathogenic microbe by chlorhexidine 0.12% with each *Andrographis paniculata*, *Boesenbergia rotunda*, *Phyllanthus emblica*, *Eucalyptus globulus*, *SWU Dent J.* 2024;17(1):202438.
- [13] รสสุคนธ์ สุคนประดิษฐ์. การตั้งตำรับและการทดสอบความคงสภาพของเจลผักคราดหัวแหวน เพื่อใช้ในช่องปาก. วิทยานิพนธ์, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่; 2548.
- [14] Kusuma AO, Lestari ES, Prihatiningsih T, et al. Effect of lemongrass stem infusion (*Cymbopogon citratus*) on growth of *Streptococcus mutans*, *J. Kedokt. Diponegoro*, 2022;11(3).
- [15] วุฒิสักดิ์ คุณุ, พิบุรณ์ เหง้าณี, พรดา เพชรสุก และคณะ ประสิทธิภาพของการต้านเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคในช่องปากและทางเดินหายใจของสารสกัดจากผลมะกอกป่าสุก และผลกระทบของสารสกัดต่อน้ำยาฆ่าเชื้อบางชนิด, *วารสารเกษตรพระวรุณ* 2022;19(2): 100–108.
- [16] Elhadad MA, El-N E, Taalab MR, et al. The effect of topical chamomile in the prevention of chemotherapy-induced oral mucositis: A randomized clinical trial, *Oral Dis* 2022;28(1):164-172.
- [17] Andayani R, Armin F, Mardhiyah A, Determination of the total phenolics and antioxidant activity in the rind extracts of *Garcinia mangostana* L., *Garcinia cowa* Roxb., and *Garcinia atroviridis* Griff. ex T. anders. *Asian J Pharm Clin Res.* 2020:149–152.
- [18] Prijambodo SK, Ramadhani A and Setyowati L, Antibiofilm activity of mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) flavonoids against *Streptococcus mutans* bacteria, *Conserv. Dent.* 2020;10(2):48-50.
- [19] Nguyen PT.M., Nguyen MT.H., Quach LT., et al. Antibiofilm activity of alpha-mangostin loaded nanoparticles against *Streptococcus mutans*, *Asian Pac. J. Trop. Biomed.* 2020;10(7):325-332.
- [20] Park T-Y, Lim Y, Lee DS, et al. Antimicrobial effect of ethanol extract of *Garcinia mangostana* L. against *Enterococcus faecalis* isolated from human oral cavity, *Int J Oral Biol.* 2018;43(3):129-132.
- [21] ชนัญผล ประไพ และคณะ. อิทธิพลของวิธีการสกัดต่อผลได้ การสกัดและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของ สารสกัดพืชสมุนไพรไทย. *Thai Journal of Science and Technology*, 2019;8(5):493-508.
- [22] Andressa B, Gisely C. L, João C. P. M. Application and analysis of the Folin Ciocalteu method for the determination of the total phenolic content from *Limonium brasiliense* L. 2013;18(6): 6852–6865.
- [23] Prommuak C, De-Eknamkul W, Shotipruk A. Extraction of flavonoids and carotenoids from Thai

- silk waste and antioxidant activity of extracts. Sep Purif Technol. 2008;62(2):444-448.
- [24] Kanathip S, Apitsada S, Kanokpich W, Asamaporn M, The Comparison of phenolic compounds, flavonoids and antioxidant activities of the ethanolic extracts of shoots, leaves, fruit and seeds of *Leucaena leucocephala*. Naresuan Phayao J. 2020;13(3): 66-73.
- [25] DOMIG Konrad J., et al. Antibiotic susceptibility testing of *Bifidobacterium thermophilum* and *Bifidobacterium pseudolongum* strains: Broth microdilution vs. agar disc diffusion assay . International Journal of Food Microbiology, 2007;120(1-2);191-195.
- [26] Pedraza-Chaverri J., Cárdenas-Rodríguez N., Orozco-Ibarra M., & Pérez-Rojas, J. M., Medicinal properties of mangosteen (*Garcinia mangostana*) , Food and chemical toxicology, 2008;46(10);3227-3239.
- [27] Flenghi L., Mazouffre M., Le Loc'h A., Le Loc'h G., & Bulliot C. Normal bacterial flora of the oral cavity in healthy pet rabbits (*Oryctolagus cuniculus*). Veterinary Medicine and Science . 2023;9(4);1621-1626

ผลของน้ำกระตุ้นพลาสมาต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในผักสลัดใบกรีนโอ๊ค

Effect of Plasma Activated Water on Inhibition of Microbial Cells in Green Oak Lettuce

กมลทิพย์ ปรีเปรม^{1*}, ขจรเดช ลาบุตร², กระวี ตรีอำรรค¹, เทวรัตน์ ตรีอำรรค², วิชาญณรงค์ วงศ์บับพา¹
Kamonthip Preeprem^{1*}, Kajondet Labut², Krawee Treeamnuk¹, Tawarat Treeamnuk², Wichannarong Wongbubpa¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

² สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

¹ School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

² School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

*Corresponding author Email: kamontip.preeprem@gmail.com

Received: 03-10-2024 Revised: 7-05-2025 Accepted: 30-06-2025

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของน้ำกระตุ้นพลาสมา (Plasma Activated Water: PAW) ต่อการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในผักสลัดใบกรีนโอ๊ค (Green Oak) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีความเสื่อมสภาพทางชีวเคมีได้ง่ายหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากจุลินทรีย์ การทดสอบใช้ตัวอย่างผักสลัดใบกรีนโอ๊คขนาด 3 x 3 cm. รูปแบบปลูก 2 รูปแบบคือ แบบลงดิน (N) และปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ (H) และน้ำ PAW ผลิตจากเครื่องต้นแบบที่มีแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุด 15 กิโลโวลต์ จ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์เป็นเวลา 25 นาที จากนั้นนำผักสลัดใบ กรีนโอ๊คจุ่มล้างด้วย PAW เป็นเวลา 10, 15 และ 20 นาที เทียบกับจุ่มล้างด้วยน้ำประปา จากนั้นทำการทดสอบการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ด้วยการวิเคราะห์ Total Plate Count (TPC) พบว่าการเจริญของจุลินทรีย์นั้นมีแนวโน้มที่ลดลงจาก 1.53×10^6 ลดลงเป็น 5.00×10^5 CFU/ml ของผักสลัดใบกรีนโอ๊คที่มีการปลูกแบบลงดิน และ 1.77×10^6 ลดลงเป็น 5.61×10^5 CFU/ml ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ ตามลำดับ ในส่วนการเปลี่ยนแปลงของสี Color Difference (ΔE) พบว่าแนวโน้มของสีหลังการชะล้างในแต่ละวันนั้นไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า Color difference และค่าความเป็นกรด - ด่างของ PAW มีค่าระหว่าง 6.7 - 7.5 ดังที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าทั้ง 3 ตัวแปร ยังมีผลความแตกต่างเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีผลกระทบ เนื่องจากเครื่องต้นแบบปัจจุบันกระตุ้นน้ำพลาสมาเพียงรอบเดียว จึงคาดว่าจะปรับปรุงรูปแบบการผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบละอองหมอกเป็นระบบหมุนวนหรือกระตุ้นพลาสมาที่น้ำโดยตรง เพื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์และเปรียบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในผักสลัดใบกรีนโอ๊คในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ: น้ำกระตุ้นพลาสมา ผักสลัดใบกรีนโอ๊ค เชื้อจุลินทรีย์

ABSTRACT

This study examines the effects of Plasma-Activated Water (PAW) on the inhibition of microbial growth in green oak leaf lettuce (Green Oak), a postharvest perishable crop prone to biochemical deterioration primarily caused by microbial contamination. Lettuce samples measuring 3 x 3 cm were collected from two cultivation methods: soil-based (N) and hydroponic (H). The PAW was generated using a prototype device with a maximum output voltage of 15 kV, delivering pulsed high-voltage electricity for 25 minutes. The lettuce samples were then immersed in PAW for 10, 15, and 20 minutes, with tap water immersion used as a control. Microbial inhibition was assessed using the Total Plate Count (TPC) method. The results showed a decreasing trend in microbial load, from 1.53×10^6 to 5.00×10^5 CFU/mL in soil-grown lettuce and from 1.77×10^6 to 5.61×10^5 CFU/mL in hydroponically-grown lettuce. As for color changes, the Color Difference (ΔE) analysis revealed no significant variation in color over time following the washing treatments. The pH values of PAW ranged from 6.7 to 7.5, indicating no substantial impact on acidity or alkalinity. As previously discussed, the three variables microbial growth inhibition, color difference, and pH showed only minor or negligible differences. This is likely due to the current prototype generating PAW in a single activation cycle. Consequently, future developments are expected to focus on enhancing the system, such as adopting a mist-circulation design or applying

plasma directly to water. These modifications aim to improve the analysis and comparison of PAW's antimicrobial efficacy in green oak leaf lettuce in future research.

Keyword: Plasma Activated Water, Green Oak lettuce, Microbial

1. บทนำ

ในปัจจุบันความนิยมในการบริโภคผักสลัดและผักใบได้เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดทั้งในกลุ่มคนรุ่นใหม่และกลุ่มผู้สูงอายุ ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ผักสลัดกลายเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย ประกอบด้วย การตระหนักถึงสุขภาพที่ดีขึ้นและการดูแลรูปร่าง [1] ซึ่งการตระหนักถึงสุขภาพเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการเพิ่มพูนความนิยมในการบริโภคผักสลัดซึ่งเป็นผักที่นิยมทานสด นอกจากนั้นผักสลัดยังให้คุณค่าทางอาหารสูง โดยเฉพาะไฟเบอร์ แคลเซียม วิตามินซี วิตามินเอ และยังมีใยอาหารสูงซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่ คลอโรฟิลล์ และแคโรทีนอยด์ รวมถึงสารอาหารอื่น ๆ ที่มีคุณค่าต่อผู้บริโภค [2] แม้ว่าการทานผักสดจะมีประโยชน์ต่อสุขภาพในหลายด้าน แต่ก็มีผลเสียบางประการที่ควรระวัง กล่าวคือมีรายงานหลายฉบับเกี่ยวกับการเกิดโรคอาหารเป็นพิษจากการรับประทานผักสด [3, 4] และการตรวจพบจุลินทรีย์ก่อโรคหลายชนิดในผักสดของประเทศไทย [5, 6] นอกจากนั้นสำนักมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติระบุว่าสินค้าพืชไทย เช่น ผักที่ส่งออกไปสหภาพยุโรปซึ่งเป็นตลาดนำเข้ารายใหญ่ตรวจพบจุลินทรีย์ปนเปื้อนอย่างต่อเนื่องบ่อยครั้ง โดยเฉพาะ *Salmonella* spp. และ *Escherichia coli* [7] การล้างผักไม่สะอาดหรือการบริโภคผักที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อโรคอย่างเหมาะสมอาจเพิ่มความเสี่ยงต่อการติดเชื้อ ดังนั้นเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดจากการทานผักสด ควรคำนึงถึงการล้างและเตรียมผักอย่างถูกวิธี

ปัจจุบันคลอรีนนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการฆ่าเชื้อในการเตรียมผักและผลไม้สด แม้ว่าจะงานวิจัยหลายฉบับแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ยอดเยียมของการล้างด้วยคลอรีนในการยับยั้งจุลินทรีย์และแบคทีเรีย แต่การใช้สารเคมีฆ่าเชื้อที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม [8]

ดังนั้นเกิดการคิดค้นวิธีการใหม่ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้เทคโนโลยีพลาสมา เนื่องจากเทคโนโลยีนี้ได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้ในด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพและเทคโนโลยี เทคโนโลยีนี้มีจุดเด่นคือเป็นเทคโนโลยีสะอาดและเน้นการพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติของผิววัสดุผลิตภัณฑ์เป้าหมายหรือใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยเรียกน้ำหลังการปรับปรุงว่าน้ำกระตุ้นพลาสมา โดยการใช้การฉายพลาสมาลงบนพื้นผิววัสดุหรือน้ำเหล่านั้น และยังสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนบนผิววัสดุได้อีกด้วย งานวิจัยบางฉบับได้รายงานการใช้พลาสมาในการกำจัดเชื้อโรคในอาหาร [9] กล่าวคือสามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคในอาหาร เช่นเดียวกับในงานวิจัยของนาริรัตน์ ปี 2554 [10] และพบอีกว่าสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้สดได้นานขึ้น 7 วัน และ Khan et al., 2019 [11] ผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาจากวิธี

Glow plasma โดยใช้ออกซิเจนและอากาศป้อนให้กับระบบ ยังพบว่าสามารถลดความเข้มข้นของ *Salmonella enterica* serovar Typhimurium ได้ 3.0 log และ 2.6 log สำหรับผักกาดแก้วและผักสลัดใบแดง โดยการนำตัวอย่างของใบผักสลัดใบขนาด 3 x 3 cm. จุ่มลงในน้ำกระตุ้นพลาสมาเป็นเวลา 1 ถึง 3 นาที และงานวิจัยของ Fröhling et al., 2018 [12] ผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาจากการใช้เครื่อง PLEX² มีการจุ่มลงในผักสลัดขนาด 5 x 5 cm. ในน้ำกระตุ้นพลาสมาและน้ำที่ไม่ได้ปรับปรุงหลังการจุ่มลงในผักสลัดใบไว้ที่อุณหภูมิ 2°C เป็นเวลา 7 วัน พบว่าสามารถลดความเข้มข้นของ Total viable count ได้ 0.64 ถึง 1.6 log และ 0.27 - 0.95 log CFU/ml สำหรับวันที่ 0 และวันที่ 7 ของการเก็บรักษา นอกจากนี้งานวิจัยของ Patange et al., 2019 [13] ผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาจากวิธี DBD แบบได้น้ำ โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV กำลัง 7.45 W นำตัวอย่างของใบผักกาดแก้วขนาด 3 x 3 cm. จุ่มลงในน้ำกระตุ้นพลาสมาเป็นเวลา 0 ถึง 10 นาที พบว่าสามารถลดความเข้มข้นของ *Pseudomonas fluorescens* ในการจุ่ม 3 นาที ลดลงต่ำกว่าขีดจำกัดของการตรวจนับและ *Listeria innocua* ลดลง 2.4 log สำหรับการจุ่ม 5 นาที และงานวิจัยของ Schnabel et al., 2019 [14] ผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาจากการใช้เครื่อง PLEX² จุ่มผักสลัดใบด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมาด้วยสถานการณ์ที่แตกต่างกัน พบว่าสามารถลดความเข้มข้นของ Total aerobic bacteria สำหรับขนาดน้ำร่อนน้อยกว่า 2 log และสำหรับขนาดระดับห้องปฏิบัติการมากกว่า 6.0 log

จากงานวิจัยดังกล่าวทำให้เห็นว่าการใช้เทคโนโลยีพลาสมาเป็นวิธีที่น่าสนใจในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในผักและผลไม้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีและยืดอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกเป็นการศึกษาและสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา และส่วนที่สองเป็นการประยุกต์ใช้ด้านการเกษตร กล่าวคือนำน้ำกระตุ้นพลาสมาจากเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในผักสลัดใบกรีนโอ๊ค โดยการจุ่มลงในตัวอย่างผักสลัดใบกรีนโอ๊ค ซึ่งทำการวัดผลพารามิเตอร์ของน้ำที่ผ่านการจุ่มผักสลัดใบกรีนโอ๊ค โดยการวิเคราะห์หาค่าการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์แบบ Total Plate Count (TPC) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และการเปลี่ยนแปลงสี (Color Difference, ΔE)

2. วัสดุ อุปกรณ์และ วิธีดำเนินการวิจัย

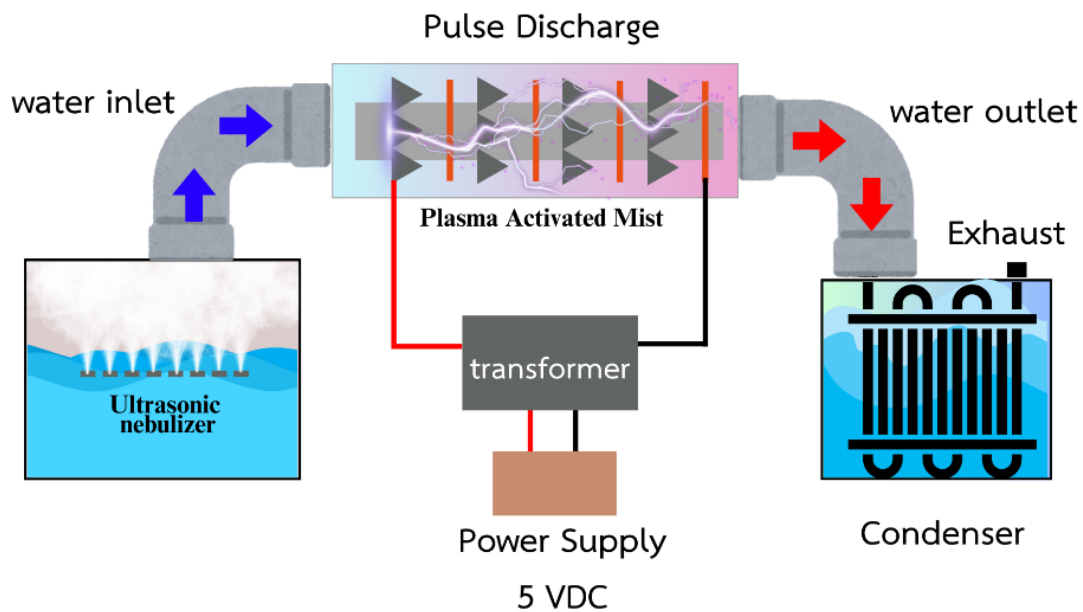
ผักสลัดใบกรีนโอ๊ค (*Lactuca sativa* var. *crispa* L.) การปลูก 2 รูปแบบคือ แบบไฮโดรโปนิคส์และปลูกลงดิน จากฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ที่มีระยะแก่ทางการค้า จากนั้นคัดเลือกใบที่มีขนาดสม่ำเสมอ ไม่มีตำหนิ ไม่

ถูกทำลายจากโรคและแมลงและไม่เน่าเสีย เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

1.1. ชุดอุปกรณ์การทดลอง

ชุดกำเนิดลพลาสมาความดันบรรยากาศ แสดงดังภาพที่ 1 ใช้ในการศึกษาการตรึงไนโตรเจนในอากาศ ระบบประกอบด้วย 3 ส่วน คือ (1) เครื่องกำเนิดละอองหมอกซึ่งใช้น้ำประปาเป็นวัตถุดิบในการสร้างละอองหมอกอย่างต่อเนื่อง (2) บริเวณดิสชาร์จ (3) อุปกรณ์ควบแน่นละอองหมอก ส่วนที่ 1 ใช้เครื่องกำเนิดละอองหมอกแบบอัลตราโซนิก แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3 -12 โวลต์ กำลังไฟ 1.5 วัตต์ หัวพ่นหมอกเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกปลอกซิลิโคน 20 มิลลิเมตร หัวพ่นหมอก 1 ชุดประกอบด้วยหัวพ่น 4 หัว ใช้จำนวน 2 ชุด ความถี่ในการทำงานของเครื่องพ่นฝอยละอองอัล

ตราโซนิกคือ 108 ± 2 กิโลเฮิรซ์ โดยในส่วนของ 2 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสไฟฟ้าขาเข้าที่ 5 โวลต์และ 4 แอมแปร์ตามลำดับ เชื่อมผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าโดยแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุด 15 กิโลโวลต์ ซึ่งจ่ายไฟแรงดันสูงแบบพัลส์ ขนาดของบริเวณดิสชาร์จมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.25 มิลลิเมตร ยาว 26 เซนติเมตร บริเวณดิสชาร์จประกอบด้วย 4 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียมความกว้าง 3 เซนติเมตร ตัดเป็นแฉก 30 องศา จำนวน 11 แฉก พร้อมด้วยลวดทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 มิลลิเมตรและมีท่อขบวนการไหลของละอองน้ำ



ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงชุดผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมา

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24.25 มิลลิเมตร บรรจุอยู่กึ่งกลาง ซึ่งชุดดิสซาร์จพลาสมาถูกบรรจุอยู่ในกล่องอะคริลิกขนาด 25 เซนติเมตร และส่วนที่ 3 ละอองหมอกเหล่านี้ไหลผ่านแผงปล่อยพลาสมาในอากาศโดยตรง เมื่อละอองหมอกเหล่านี้ไหล ผ่านโซนพลาสมา จะถูกทำการควมแน่นด้วยคอนเดนเซอร์ โดยใช้น้ำเย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 0°C โดยทำการเปิดเครื่องทำน้ำกระตุ้นพลาสมาเป็นเวลา 25 นาที

1.2. การจุ่มล้างในน้ำกระตุ้นพลาสมา

1.2.1. ทำการเตรียมตัวอย่างผักสลัดใบกรีนโอ๊คขนาด 3 x 3 cm. โดยวิธีการปลูก 2 รูปแบบคือ แบบไฮโดรโปนิคส์ (H) และปลูกลงดิน (N) ที่เตรียมไว้มาแบ่งรูปแบบละ 4 กรรมวิธี ดังนี้ กรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุมคือจุ่มล้างในน้ำประปา กรรมวิธีที่ 2 จุ่มล้างในน้ำกระตุ้นพลาสมา 10 นาที กรรมวิธีที่ 3 จุ่มล้างในน้ำกระตุ้นพลาสมา 15 นาทีและกรรมวิธีที่ 4 จุ่มล้างในน้ำกระตุ้นพลาสมา 20 นาที

1.2.2. ทำการดึงตัวอย่างน้ำที่ผ่านการจุ่มล้างใส่หลอดทดลองที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วหลอดละ 1 mL หลอดแรกคือตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเจือจางความเข้มข้นที่ 10^0 (dilution $\times 10^0$) จากนั้นนำตัวอย่างจากหลอด 10^0 ไปทำการเจือจางเพิ่มโดยใช้เทคนิค Serial Dilution ใส่หลอดถัดไปที่มีสารละลาย Peptone 0.1 (%w/v) เตรียมไว้ในหลอดทดลอง จากนั้นทำการเจือจางเพิ่มในหลอดถัดไปอีก 3 ระดับ และเลือกระดับความเจือจางที่มีความเจือจางความเข้มข้นอยู่ที่ 10^{-6} (dilution $\times 10^{-6}$) เนื่องจากเป็นระดับความเจือจางที่มีเชื้อเจริญที่ 30-300 CFU/plate เพื่อไม่ให้เชื้อที่เลี้ยงเจริญในจานเพาะเชื้อมากเกินไป จนนับเชื้อที่เจริญไม่ได้

1.2.3. ขั้นตอนการเตรียมจานเพาะเชื้อจะต้องมีการนำไปอบที่ตู้อบลมร้อน 180°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จึงจะนำมาใช้งานได้และปลอดเชื้อแล้ว ขั้นตอนการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ อาหารเลี้ยงเชื้อมีการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 15 psi เป็นเวลา 15 นาที ก่อนนำไปใช้และเตรียมตะเกียงแอลกอฮอล์ที่จุดไฟแล้วมาอยู่ในอาณาบริเวณทำการทดลอง จากนั้นดูดสารละลายเชื้อที่เตรียมไว้ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ใส่บนลงจานอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate count agar (PCA) แบบสำเร็จรูป ยี่ห้อ HiMedia บริษัท HiMedia Laboratories, India โดยจะทำการชั่งอาหารเลี้ยงเชื้อ 23.5 g ละลายต่อน้ำ DI 1000 mL จากนั้นให้อุณหภูมิ 90°C แล้วรอนจนกว่าอาหารเลี้ยงเชื้อจะมีฟองเดือด จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึง 60°C

แล้วทำการเทอาหารเลี้ยงเชื้อลงบนจานเพาะเชื้ออย่างระมัดระวัง จากนั้นปล่อยให้จานอาหารเลี้ยงเชื้อจับกันเป็นวัน ใช้แท่งแก้วเขี่ยเชื้อ (Spreader glass) ทำการเขี่ยบริเวณผิวอาหารเลี้ยงเชื้อเป็นเวลา 30 วินาที อย่างระมัดระวัง เมื่อเกลี่ยเชื้อจนทั่วแล้วปิดฝาเพื่อป้องกันไม่ให้เชื้อในอากาศเข้าไปได้

1.2.4. เมื่อเตรียมเชื้อในจานเพาะเชื้อเรียบร้อยแล้วนำไปบ่มที่ตู้อบลมเพาะเชื้อควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิในการบ่ม 37°C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อบ่มเสร็จแล้วทำการนับจำนวน colony ของเชื้อจุลินทรีย์ โดยที่การนับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์จะนับเป็นกลุ่มของประชากรเชื้อหรือโคโลนี (colony) ซึ่งการหาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ (CFU/mL หรือ CFU/g) ได้จากดังสมการที่ 1 ดังนี้

$$\text{ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ (CFU/mL)} = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยของจำนวนโคโลนีที่นับได้ต่อจานอาหาร}}{\text{ระดับความเจือจาง} \times \text{ปริมาตรอาหารที่ดูมา}} \quad (1)$$

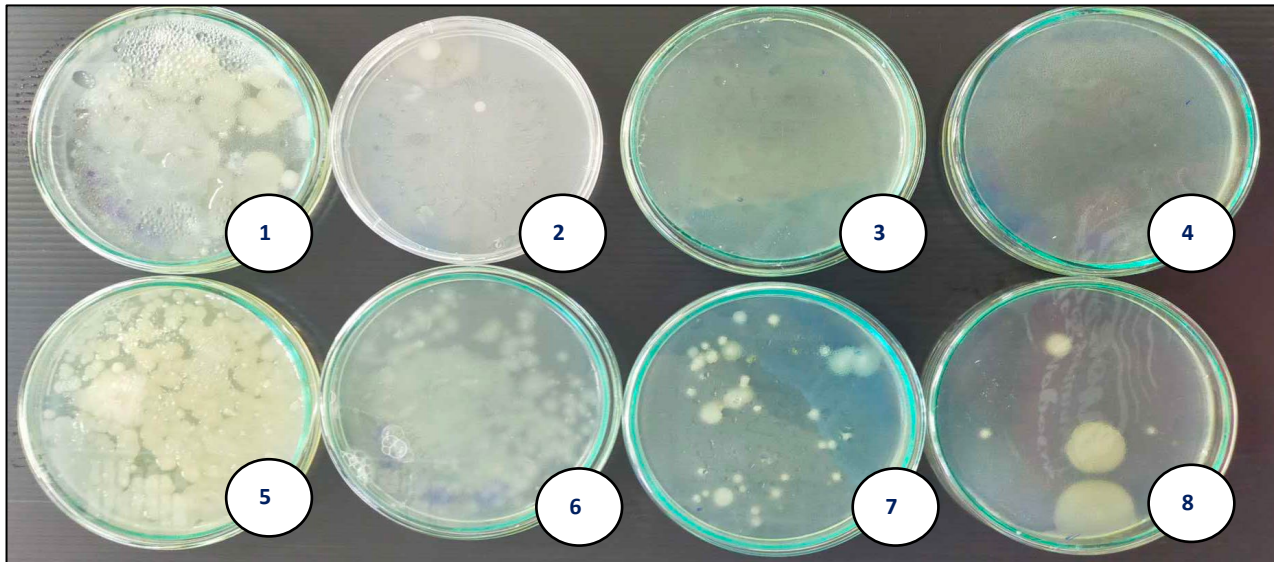
โดยที่ ค่าเฉลี่ยของจำนวนโคโลนีที่นับได้ต่อจานอาหารมีหน่วย CFU, ระดับความเจือจางความเข้มข้นของเชื้อในที่นี้จะทำการเจือจางที่ 10^{-6} และปริมาตรอาหารที่ดูมา มีหน่วย mL

1.1.1. จากนั้นนำผักสลัดใบกรีนโอ๊คทุกกรรมวิธีไป

วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) จากเครื่อง Benchtop pH Meter รุ่น pH700 ยี่ห้อ EUTECH ประเทอังกฤษ และทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของใบผักสลัดด้วยเครื่อง Colorimeter ยี่ห้อ HunterLab รุ่น UltraScan แล้วทำการเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียส และวัดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นเวลา 0 – 4 วัน

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การทดสอบการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่มีผลจากน้ำกระตุ้นพลาสมาในผักสลัดใบกรีนโอ๊คจากการทดสอบการเจริญของเชื้อ จุลินทรีย์ในผักสลัดใบกรีนโอ๊คที่ทำการทดสอบจากผักที่ปลูกแบบ N และ H ซึ่งแบ่งการทดสอบเป็นการจุ่มล้างด้วยน้ำประปา และน้ำกระตุ้นพลาสมาในช่วงเวลา 10, 15 และ 20 นาที โดยการทดสอบครั้งนี้จะทำการใช้การวิเคราะห์แบบ Total Plate Count (TPC) มีการเจริญเติบโตดังภาพที่ 2 และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยโปรแกรม Minitab® 17 (Minitab Inc., USA) ด้วยวิธี Tukey- HSD multiple comparison test ดังแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 2 การเจริญของจุลินทรีย์บนจานเพาะเชื้อโดยมีตัวอย่างของผักสลัดใบกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบ ไฮโดรโปนิคส์ (1) HC, (2) H10, (3) H15, (4) H20, และปลูกแบบบนดิน (5) NC, (6) N10, (7) N15 และ (8) N20 ตามลำดับ

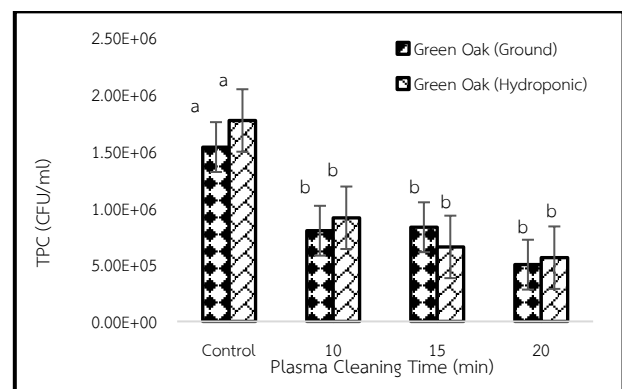
ตารางที่ 1 การเจริญของจุลินทรีย์ในผักสลัดใบกรีนโอ๊คที่จุ่มล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกระตุ้นพลาสมาระยะเวลา 10, 15 และ 20 นาที

ตัวอย่างทดสอบผักสลัดใบกรีนโอ๊คหลังการเก็บเกี่ยว	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (CFU/ml)
ผักสลัดใบกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบบนดิน (N)	NC 1.53 x 10 ⁶ a
	N10 7.98 x 10 ⁵ b
	N15 8.29 x 10 ⁵ b
	N20 5.00 x 10 ⁵ b
ผักสลัดใบกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ (H)	HC 1.77 x 10 ⁶ a
	H10 9.12 x 10 ⁵ b
	H15 6.56 x 10 ⁵ b
	H20 5.61 x 10 ⁵ b

หมายเหตุ a,b ตัวอักษรยกกำลังภาษาอังกฤษที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 1 พบว่าปริมาณของจุลินทรีย์ที่เจริญในผักสลัดใบกรีนโอ๊ค NC และ HC ที่ถูกจุ่มล้างด้วยน้ำประปา ยังมีจุลินทรีย์ที่เจริญอยู่ที่ 1.53 x 10⁶ CFU/ml และ 1.77 x 10⁶ CFU/ml ตามลำดับ เมื่อได้จุ่มล้างด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมาพบว่า น้ำกระตุ้นพลาสมาที่มีสมบัติในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่มีผลต่อการเน่าเสียของใบผักสลัด ซึ่งน้ำกระตุ้นพลาสมาที่มีสมบัติความเป็นอนุมูลอิสระที่สามารถทำลายผนังเซลล์ของจุลินทรีย์โดยสารเหล่านี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Peroxidation กับ phospholipid cell membrane ของ aerobic bacteria ที่ทำให้ ผัก ผลไม้เกิดการเน่าเสีย เช่น Escherichia coli หรือ Staphylococcus ทำให้แบคทีเรียถูกทำลาย [15] โดยสังเกตจากค่าปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ได้ จากการทดลองตัวอย่างใบผักในสถานะที่ใช้น้ำกระตุ้น

พลาสมาจุ่มล้าง 20 นาที N20 และ H20 ได้ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด 5.00 x 10⁵ CFU/ml และ 5.61 x 10⁵ CFU/ml ตามลำดับจะเห็นว่าน้ำกระตุ้นพลาสมาสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ของผักสลัดใบกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบ NC และ HC ซึ่งสามารถเห็นแนวโน้มการยับยั้งจุลินทรีย์ และการวิเคราะห์ทางสถิติโดยโปรแกรม Minitab® 17 (Minitab Inc., USA) ด้วยวิธี Tukey- HSD multiple comparison test ของการเปรียบเทียบการล้างด้วยน้ำประปากับการจุ่มล้างด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมาระยะเวลา 10 15 และ 20 นาที ดังภาพที่ 3 ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานของ [16,17] ที่พบว่าการล้างด้วยน้ำประปากับการจุ่มล้างด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งเวลา 10 15 และ 20 นาที ดังแสดงเป็นตัวอักษรยกกำลังภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 3 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในผักสลัดใบกรีนโอ๊คที่ผ่านการล้างด้วยน้ำประปา และน้ำกระตุ้นพลาสมาระยะเวลา 10 15 และ 20 นาที

การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของผัก สลัดใบกรีนโอ๊ค

จากการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงของสีด้วยเครื่อง Colorimeter ด้วยหลักการ Color Difference (Delta E, ΔE) โดยจะทำการวิเคราะห์จากค่า L^* a^* และ b^* และไปคำนวณในสมการดังสมการที่ 2 ดังนี้ [18]

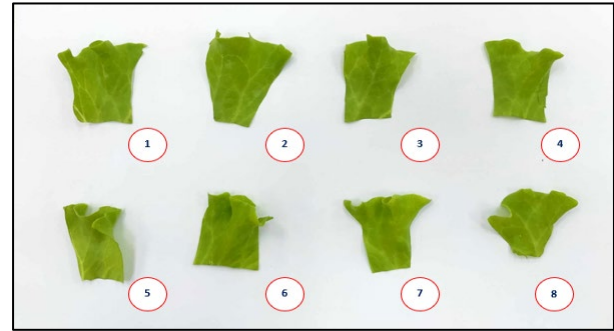
$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (2)$$

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสีในผักสลัดใบ กรีนโอ๊ค นั้นสามารถบ่งชี้ได้ถึงสภาพของเซลล์พืชภายในและกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ผัก โดยผักนั้นเป็นอาหารที่เสื่อมเสียง่ายเนื่องจากมีปริมาณน้ำสูง มีสารอาหารที่เหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์ เมื่อมีแรงกระแทกจากการเก็บเกี่ยว การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้จุลินทรีย์นั้นเจริญและส่งผลต่อสีของวัตถุดิบได้ สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของสีของผักสลัดใบกรีนโอ๊ค ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของผักสลัดใบกรีน โอ๊ค ที่เปลี่ยนไปในแต่ละวัน ของตัวอย่างผักสลัดใบ กรีนโอ๊ค ที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์และปลูกแบบลงดิน

ตัวอย่าง ผักสลัดใบ กรีน โอ๊ค	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4
	$\Delta E1$	$\Delta E2$	$\Delta E3$	$\Delta E4$
NC	11.00	25.04	34.90	38.92
N10	12.73	25.08	33.85	37.85
N15	12.21	26.25	33.73	37.18
N20	12.74	26.81	34.44	36.63
HC	8.66	21.47	32.26	37.85
H10	8.37	21.21	32.45	37.41
H15	8.12	21.12	32.54	38.07
H20	8.25	20.98	31.63	37.45

จากตารางที่ 2 จะแสดงให้เห็นข้อมูลของผักสลัดใบกรีนโอ๊คที่ผ่านการล้างด้วยน้ำกระดุนพลาสติกเป็นเวลาทั้งหมด 4 วัน และจะพบว่าค่า ΔE มีค่าเพิ่มขึ้นในแต่ละวันเมื่อเปรียบเทียบผักที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ค่าความต่างของสีจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าการปลูกแบบลงดินเนื่องจากจุลินทรีย์ของผักที่มีการปลูกบนดินนั้นมีมากกว่าทำให้เกิดการเสียสภาพได้ไวกว่า เมื่อเทียบกับการปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์เพราะได้รับจุลินทรีย์โดยตรงจากในดินเพาะปลูก จากการวิเคราะห์ผลของน้ำกระดุนพลาสติกนั้นไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ อาจเป็นเพราะปริมาณน้ำที่ใช้ชำระล้างนั้นมีปริมาณที่น้อย [19] และพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสีค่า (ΔE) ผักสลัดใบกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบบนดินและไฮโดรโปนิคส์เพิ่มขึ้นจากที่เก็บจากวันที่ 0 ถึง วันที่ 4 แสดงดังภาพที่ 4 และ 5 ตามลำดับ



ภาพที่ 4 ผักสลัดใบกรีนโอ๊คของวันที่ 0 ที่จุ่มล้างด้วยน้ำกระดุนพลาสติกของตัวอย่างผักสลัดใบกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ (1) HC, (2) H10, (3) H15, (4) H20, และปลูกแบบบนดิน (5) NC, (6) N10, (7) N15 และ (8) N20 ตามลำดับ



ภาพที่ 5 ผักสลัดใบกรีนโอ๊คของวันที่ 4 ที่จุ่มล้างด้วยน้ำกระดุนพลาสติกของตัวอย่างผักสลัดใบกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ (1) HC, (2) H10, (3) H15, (4) H20, และปลูกแบบบนดิน (5) NC, (6) N10, (7) N15 และ (8) N20 ตามลำดับ

ซึ่งมีผลแตกต่างจากงานวิจัยของ [11 – 14] คือ การจุ่มล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกระดุนพลาสติกที่มีรูปแบบการผลิตที่ต่างกันไป มีความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงสีอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการสร้างน้ำกระดุนพลาสติกจากเครื่องต้นแบบปัจจุบัน กระดุนน้ำพลาสติกเพียงรอบเดียวไม่ได้เป็นระบบหมุนวน จึงคาดว่าทำให้การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ส่งผลต่อการยับยั้งการเน่าเสียในผักสลัดใบกรีน โอ๊คยังไม่เห็นผลต่างกันอย่างชัดเจน

การศึกษาค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของน้ำกระดุนพลาสติก

ค่าความเป็นกรด - ด่าง เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างโมเลกุลของน้ำและเซลล์ผักสลัดใบกรีนโอ๊คทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างกันและกัน แต่การกระดุนน้ำพลาสติกเพียงรอบเดียวนั้นไม่ได้มีผลกระทบต่อค่ากรด - ด่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab® 17 (Minitab Inc., USA) ด้วยวิธี Tukey- HSD multiple comparison test ดังแสดงได้ในตารางที่ 3 [20]

ตารางที่ 3 ค่าความเป็นกรด - ด่างของน้ำกระตุ้นพลาสมาใน ตัวอย่างจุ่มล้างน้ำผักสลัดใบกรีนโอ๊ค

ผักสลัดปลูกแบบลงดิน		ผักสลัดปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์	
ตัวอย่าง	pH	ตัวอย่าง	pH
NC	7.13±0.08a	HC	7.09±0.04a
N10	6.89±0.04a	H10	6.89±0.03a
N15	6.85±0.04a	H15	6.87±0.04a
N20	6.91±0.06a	H20	6.89±0.04a

หมายเหตุ a,b ตัวอักษรยกกำลังภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของการชะล้างผักสลัดใบกรีนโอ๊คด้วยน้ำกระตุ้นพลาสมา ผลการทดสอบการยับยั้งจุลินทรีย์มีความสามารถยับยั้งจุลินทรีย์ได้จริงทั้งผักสลัดใบกรีนโอ๊คที่ปลูกแบบบนดินและปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ โดยพิจารณาจากค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่มีผลต่อค่าความแตกต่างของสีที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่วันที่ 0 ถึงวันที่ 4 และไม่ได้มีผลกระทบต่อค่ากรด - ด่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีและผลกระทบต่อค่ากรด - ด่าง ยังมีผลความแตกต่างเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีผลกระทบ เนื่องจากเครื่องต้นแบบปัจจุบัน กระตุ้นน้ำพลาสมาเพียงรอบเดียว จึงคาดว่าจะมีการปรับปรุงรูปแบบการผลิตน้ำกระตุ้นพลาสมาแบบละอองหมอกเป็นระบบหมุนวนหรือกระตุ้นพลาสมาที่น้ำโดยตรง เพื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์และเปรียบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในผักสลัดใบกรีนโอ๊คในอนาคตต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา ที่สนับสนุนการทำวิจัยนี้

6. เอกสารเอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐธิดา ปัญญามากไพบุลย์, พันธจิตต์ สีเหนียง. พฤติกรรมการบริโภคและการตัดสินใจเลือกซื้อผักสลัดของผู้บริโภคในสถานประกอบการ PB Valley KaoYai Winery อำเภอปากช่องจังหวัดนครราชสีมา. วิทยาศาสตร์เกษตรและการจัดการ. 2561; 1(1): 37-46
- [2] สุภาพร ราชฯ, ศิรดาธิญากร จันทร์ขิธาพร. ผลของน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาและผักที่มีต่อการ เจริญเติบโตและลักษณะทาง สรีระวิทยาของผักกาดหอมพันธุ์โอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 2560; 22:216-224
- [3] Brackett RE, Splittstoesser DF. Compendium of methods for the microbiological examination of

foods. American Public Health Association. 2001. 4: 515-520.

- [4] Jackson G., Madden J., Hill W., et al. Investigation of Food Implicated in Illness. In: Bacteriological Analytical Manual. [online]. [cited 2024 Aug. 3]; Available from: URL: <http://www.cfsan.fda.gov/~ebam/bam-25.html>.
- [5] อติศร เสวตวัฒน์, ปรีชา จึงสมานกุล. ซาลโมเนลลา และลิสทีเรียในผักสด. กองวิเคราะห์อาหาร กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. 2538; 25 (3): 185-189.
- [6] ภาวนาฏ บุนนาค, ชวรัตน์ ทับทิมไทย, สุวณี กิตติลาภานนท์ และคณะ. งานบริการวิเคราะห์สินค้าเกษตรร้านพืชเพื่อการส่งออก [ออนไลน์]. 2550; [เข้าถึงเมื่อ 2567 สิงหาคม 8]. เข้าถึงได้จาก: URL:<http://it.dao.go.th/re/5/show.php?record>
- [7] ปรีชา จึงสมานกุล, นวรัตน์ รัตนดิลล ญ ภูเก็ท และกมลวรรณ กันแต่ง. กรมวิทยาศาสตร์ การแพทย์. 2553; 52 (1-2) : 30-39
- [8] Gil M. I., Selma M. V., López-Gálvez F., et al. Fresh-cut product sanitation and wash water disinfection: problems and solutions. International journal of food microbiology. 2009. 134(1-2), 37-45.
- [9] เครือวัลย์ พรหมลักษณ์. พลาสมาพลังต่อสู้เชื้อโรคในอาหาร. [ออนไลน์]. 2556. [2567 มิถุนายน 23]. เข้าถึงได้จาก: <http://fic.nfi.or.th/images/stories/document/IN-18-06-56.pdf>.
- [10] นาริรัตน์ อนรรฆเมธี. Plasma beamอาวุธลับสำหรับยืดอายุอาหาร. [ออนไลน์]. 2554. [2567 มิถุนายน 23]. เข้าถึงได้จาก:http://fic.nfi.or.th/images/stories/document/innovation_4778.pdf.
- [11] Khan M. S. I., and Y. J. Kim. Inactivation mechanism of Salmonella typhimurium on the surface of lettuce and physicochemical quality assessment of samples treated by micro-plasma discharged water. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2019. 52: 17–24.
- [12] Fröhling A., J Ehlbeck, and O. Schlüter. Impact of a pilot-scale plasma-assisted washing process on the culturable microbial community dynamics related to fresh-cut endive lettuce. Applied Sciences. 2018. 8(11): 2225.
- [13] Patange A., P. Lu, D. Boehm, et al. Efficacy of cold plasma functionalised water for improving microbiological safety of fresh produce and wash water recycling. Food Microbiology. 2019. 84:103226.

- [14] Schnabel U., M. Andrasch, J. Stachowiak, et al. Sanitation of fresh-cut endive lettuce by plasma processed tap water (PPtW): Up-scaling to industrial level. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2019. 53:45–55.
- [15] Rastogi G., Sbodio A., Tech J., et al. Leaf microbiota in an agroecosystem: spatiotem - poral variation in bacterial community composition on field-grown lettuce. 2012. *ISME J.* 6 (10): 1812–1822
- [16] Heema K.N. Vyas, Binbin Xia, David Alam e, et al. Plasma activated water as a pre-treatment strategy in the context of biofilm-infected chronic wounds. *Biofilm*. 2023. 6: 100154.
- [17] Panagiotis D., Marianna G., Zacharoula M., et al. Application of plasma-activated water as an antimicrobial washing agent of fresh leafy produce. *Plasma Processes and polymers*. 2021: e2100030.
- [18] C. S. Gode and A. N. Ganar. Image Retrieval by Using Colour, Texture and Shape Features. *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.* 2014. 3(4): 8637–8644.
- [19] Rouphael Y., Colla G. Growth, yield, fruit quality and nutrient uptake of hydroponically cultivated zucchini squash as affected by irrigation systems and growing seasons. *Scientia Horticulturae*. 2015. 105(2): 177-195.
- [20] Yong H. I., Park J., Kim H. J., et al. An innovative curing process with plasma-treated water for production of loin ham and for its quality and safety. *Plasma Processes and Polymers*. 2018. 15(2): 1700050

อิทธิพลของตัวขวางการไหลในหอบแห้งแบบอินฟราเรดที่มีต่ออุณหภูมิของข้าวเปลือก

Influence of Flow interrupters in Infrared Drying Column on Temperature of the paddy grains

วิชาญณรงค์ วงศ์บับพา^{1*}, กระวี ตรีอำนรรค์¹, เทวรัตน์ ตรีอำนรรค์² และ กมลทิพย์ ปรีเปรม¹
Wichannarong Wongbubpa^{1*}, Krawee Treeamnuk¹, Tawarat Treeamnuk² and
Kamonthip Preeprem¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000

¹School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

²School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

*Corresponding author Email: wichannarong.w@gmail.com

Received: 3-10-2024 Revised: 10-05-2024 Accepted: 30-06-2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวขวางการไหลเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งที่ใช้ ฮีตเตอร์อินฟราเรดเป็นแหล่งให้ความร้อนในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 42 – 43 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิ 30 - 31 องศาเซลเซียส เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบนี้ถูกใช้ในการทดลองกับข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ตัวอย่างข้าวมีน้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้น 22 - 25% มาตรฐานเปียก อุณหภูมิอากาศที่ใช้ทดลองคือ 60 และ 80 องศาเซลเซียส ควบคุมอัตราการไหลข้าว 1.5 กิโลกรัมต่อนาที โดยการทดลองใช้อุปสรรคขวางการไหลสามแบบคือ แบบครีบลับฟันปลา แบบตะแกรงเหล็กฉีกและหอบแห้งเปล่า จากการทดลองพบว่าปัจจัยดังกล่าวมีอิทธิพลต่อเวลาที่ทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยหอบแห้งเปล่าที่อุณหภูมิอากาศ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาต่ำสุดในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 42 - 43 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาเพียง 3.3 นาที หอบแห้งเปล่าที่อุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียสและครีบลับฟันปลาที่อุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียส ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ 0.10 กิโลวัตต์ - ชั่วโมง และจากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 24% มาตรฐานเปียก อบแห้งจนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้าย 14 % มาตรฐานเปียก พบว่าแบบหอบแห้งเปล่าใช้เวลาในการอบแห้งต่ำที่สุดคือ 95 นาที และแบบครีบลับฟันปลาใช้เวลาคือ 140 นาที ใช้เวลาต่างกันถึง 32.14 %

คำสำคัญ : ตัวขวางการไหล รังสีอินฟราเรด การอบแห้งข้าวเปลือก อัตราการอบแห้ง

ABSTRACT

This research aimed to investigate the influence of flow obstructions on the movement of paddy grains within a drying chamber utilizing infrared heaters as the heat source. The objective was to raise the grain temperature from an initial 30 – 31°C to a target of 42 – 43°C. A prototype paddy dryer was employed in the experiments, using Khao Dawk Mali 105 rice variety. Each sample weighed 1.5 kilograms with an initial moisture content ranging from 22% to 25% wet basis. Experiments were conducted at air temperatures of 60°C and 80°C, with a controlled paddy flow rate of 1.5 kilograms per minute. Three types of flow obstructions were tested: alternating fin barriers, expanded metal mesh, and an unobstructed (empty) drying chamber. The results indicated that these factors significantly affected the time required for the paddy to reach the target temperature. The unobstructed drying chamber at an air temperature of 80°C required the shortest heating time, taking only 3.3 minutes to reach 42 – 43°C. Furthermore, the lowest energy consumption, at 0.10 kilowatt - hours, was observed in both the unobstructed chamber at 60°C and the alternating fin barrier at 60°C. In an additional drying experiment with an initial moisture content of 24% wet basis, the grains were dried to a final moisture content of 14% wet basis. It was found that the unobstructed chamber required the shortest drying time at 95 minutes, whereas the alternating fin barrier configuration required 140 minutes a difference of 32.14%.

Keyword: Flow interruption, Infrared radiation, Paddy drying, Drying rate

1. บทนำ

ข้าวถือเป็นพืชที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประเทศไทย [1] ทั้งในด้านเศรษฐกิจ สังคม และวัฒนธรรมเนื่องจากเป็นพืชหลักที่เกษตรกรส่วนใหญ่ในประเทศเพาะปลูก ครอบคลุมพื้นที่เพาะปลูกมากที่สุดถึง 66 ล้านไร่ โดยคิดเป็น 46.2% ของพื้นที่การเกษตรทั้งหมดของประเทศ [2] ซึ่งในปี 2566 ประเทศไทยมีการส่งออกข้าวกว่า 8.76 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่ามากถึง 178,136 ล้านบาท [3] นอกจากนี้ข้าวยังเป็นอาหารหลักของ คนไทย ทำให้ข้าวเป็นส่วนสำคัญที่ขับเคลื่อนการเติบโตและการพัฒนาของประเทศอย่างต่อเนื่อง โดยหลังกระบวนการเก็บเกี่ยวเมล็ดข้าวจะมีความชื้นประมาณ 20 - 25% มาตรฐานเปียก [4] เมื่อนำข้าวเปลือกมากองรวมกันเพื่อเก็บรักษาอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ เนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกมีการหายใจจะทำให้กองข้าวมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต่างๆ [5] มีผลทำให้ข้าวเสื่อมคุณภาพ เช่น เกิดข้าวเน่า ข้าวบูด ข้าวเหลือง ข้าวมีคุณภาพการสีต่ำ [6] ดังนั้นเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาข้าวเปลือกให้ยาวนานขึ้นจึงต้องทำการลดความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกให้เหลือประมาณ 14% มาตรฐานเปียก สำหรับการเก็บข้าวไว้นาน 2 - 3 เดือน แต่ถ้าเก็บนานเกินกว่า 3 เดือน ควรลดความชื้นเมล็ดให้เหลือต่ำกว่า 12% มาตรฐานเปียก [7] ในปัจจุบันการลดความชื้นข้าวเปลือกสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้หลักการเคลื่อนที่ของอากาศเป็นตัวช่วยพาความชื้นออกจากเมล็ด ทำให้ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกลดลง ซึ่งเป็นวิธีการที่ประหยัด เนื่องจากไม่มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและค่าซ่อมบำรุง แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้แรงงานและพื้นที่ในการตากเป็นจำนวนมาก และยังไม่สามารถควบคุมสภาพอากาศระหว่างการตากได้ และอีกวิธีคือ การใช้เครื่องอบแห้งแบบต่างๆ เช่น เครื่องอบแห้งแบบถาด เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ [8] เป็นต้นซึ่งการใช้เครื่องอบแห้งมีข้อดีคือไม่ต้องใช้พื้นที่เยอะเหมือนการตากด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และยังสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องให้เป็นไปตามที่ต้องการได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามการใช้เครื่องอบแห้งแบบต่างๆ ย่อมมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกันไป เช่น ด้านประสิทธิภาพในการอบแห้ง คุณภาพของข้าวที่ได้หลังการอบแห้ง รวมไปถึงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน [9] ซึ่งนับว่าเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงและพัฒนาเครื่องอบแห้งให้ดีขึ้น โดยในปี 2560 ญัฐพล แซ่ลิ้ม [10] ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรดในแนวนอน พบว่าสถานะที่ดีที่สุดมีอัตราการอบแห้ง 1.1397 กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 3.7920 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำ มีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน 39.09 เปอร์เซ็นต์ และค่าดัชนีความขาวเท่ากับ 38.03 ปี 2557 ญัฐพงษ์ วงศ์บัพพา [11] ได้ทำการสร้างและทดลองเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นที่เป็นท่อข้อแบบสลับฟันปลา ซึ่งเป็นท่ออง 45 องศา 16 ขยัก สูงรวม 3 เมตร สลับซ้าย-

ขวา เพื่อห้วงเวลาการพ่นให้ยาวนานขึ้นกว่าปกติและช่วยให้มีการคลุกเคล้าที่มากขึ้น จากการทดลองพบว่าการสร้างข้อแบบสลับฟันปลาเพื่อใช้เป็นท่ออบแห้งนั้น สามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งให้สูงขึ้นได้ อีกทั้งยังลดเวลาของการอบแห้งและช่วยเพิ่มปริมาณข้าวตันให้สูงขึ้นได้ นอกจากนั้นยังสามารถลดการใช้พลังงานได้อีกด้วย ซึ่งพลังงานรวมจำเพาะที่ต่ำสุดของการอบแห้งในงานวิจัยนี้คือ 4.74 MJ/kg น้ำระเหย และในงานวิจัยปี 2565 ญัฐพงษ์ วงศ์บัพพา และ ทวีช จิตรสมบูรณ์ [12] ได้ทำการศึกษาถึงความสามารถขั้นต้นในการลดความชื้นของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นในท่อฟันปลา เครื่องอบแห้งต้นแบบนี้ใช้แนวคิดใหม่ที่สามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว โดยการบังคับให้ข้าวเปลือกไหลในท่ออบแห้งแบบเป็นช่องสลับไปมา เทคนิคนี้ช่วยห้วงเวลาการเป่าพ่นให้ยาวนานขึ้นกว่าปกติและยังทำให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างเมล็ดพืชกับอากาศร้อนที่มากขึ้น ซึ่งจะเกิดการอบแห้งที่รวดเร็วและใช้พลังงานความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ ผลการทดสอบพบว่าการอบแห้งในท่อแบบ 16 ข้ออ ให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าแบบ 8 ข้ออ การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงให้อัตราการอบแห้งสูงกว่า ที่อุณหภูมิต่ำ ในปี 2557 ญัฐพงษ์ วงศ์บัพพา และ ทวีช จิตรสมบูรณ์ [13] ได้ทำการสร้างและทดลองเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นห้วงที่ให้มีการไล่ตะแกรง ภายในท่ออบแห้ง เพื่อให้ตะแกรงทำหน้าที่ขวาง และห้วงการไหลของเมล็ดข้าวและลมร้อนในท่ออบแห้ง ซึ่งเป็นการเพิ่มเวลาสัมผัสระหว่างข้าวและลมร้อน จากการทดลองพบว่า ความร้อนและความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นทำให้การอบแห้งรวดเร็วขึ้น อีกทั้งตะแกรงห้วงที่ไล่เพิ่มขึ้น ก็ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นด้วย รวมทั้งการประหยัดพลังงานที่เพิ่มขึ้น และในปี 2567 ญัฐพงษ์ วงศ์บัพพา, กรณ์ทกมล ภูครองหิน, เอกบติ เมืองกลาง และคณะ [14] ได้ศึกษาอิทธิพลของท่ออบแห้งที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลของอากาศภายในท่อซึ่งจะส่งผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือก จากผลการทดสอบพบว่าการอบแห้งโดยใช้ท่ออบแห้งที่เป็น ท่อแบบกระเปาะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าและมีค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้งที่ สูงกว่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งในการทดสอบที่เป็นท่อตรงจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งความร้อนให้กับระบบมีจุดเด่นคือ ไม่อาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน และความร้อนสามารถทะลุเข้าเนื้อวัสดุได้ดี เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการอบแห้งจึงทำให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ [15] และจากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการขวางการไหลหรือห้วงการไหลมีอิทธิพลเป็นอย่างมากสำหรับกระบวนการอบแห้ง

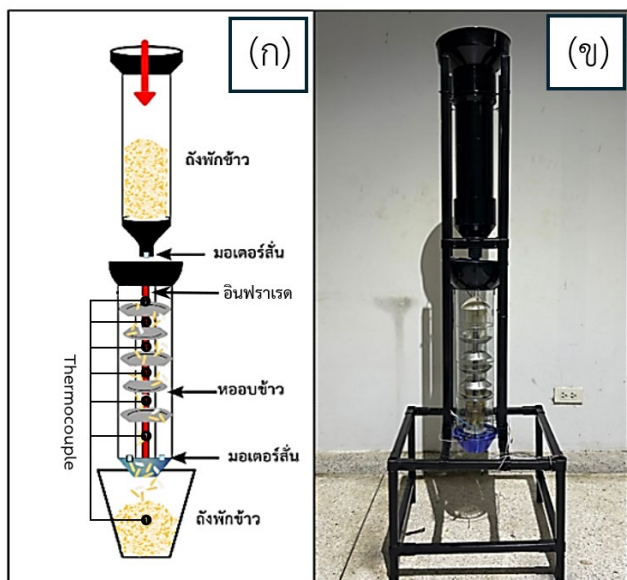
ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์เครื่องอบแห้งที่ใช้รังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งให้ความร้อนมาทำงานร่วมกับการใช้ตัวขวางการไหลข้าวเปลือกเพื่อช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณท่ออบแห้งได้เนื่องจากการไหลของเมล็ดข้าวทำให้ข้าวอยู่ในท่ออบแห้งนานขึ้น และทำให้เมล็ดข้าวเกิดการกระจายตัวในท่ออบแห้งดีขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างข้าวเปลือกกับอากาศได้ดีขึ้น และส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการแลกเปลี่ยนความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้ดียิ่งขึ้น

ตามไปด้วย ทำการออกแบบตัวขบวนการไหล 2 แบบคือ แบบครีบลับพื้นปลาและแบบตะแกรงเหล็กฉีก ทดลองเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแบบข้าวเต็มหอบและไม่มีกรวยขบวนการไหล ที่อุณหภูมิและอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเดียวกัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวขบวนการไหลเมล็ดข้าวเปลือกในกรอบแห้งที่ใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดเป็นแหล่งให้ความร้อน เพื่อศึกษาเวลาที่ใช้ในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 42 – 43 องศาเซลเซียส ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ และเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือก

2 วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการที่ใช้ในการทดลองนี้ใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดเป็นตัวทำความร้อนให้กับระบบด้วยการแผ่รังสีความร้อน ในแนวนอนมี แสดงดังภาพที่ 1 โดยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วยกรอบแห้งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกจำนวน 2 ชั้น ทำจากแก้วซึ่งชั้นในและชั้นนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงที่ 6 เซนติเมตร และ 45 เซนติเมตร กับ 12 เซนติเมตร และ 48 เซนติเมตร ตามลำดับ ใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดขนาด 700 วัตต์ ยาว 40 เซนติเมตร และใช้เครื่องสั่นสะเทือน (Vibrator motor) 2 ขนาดคือ ขนาด 17 x 6 มิลลิเมตร และขนาด 10.27 x 10.34 มิลลิเมตร แรงดันไฟฟ้า 3 - 6 VDC ช่วยในการควบคุมอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกออกจากกรอบแห้งทางช่องด้านล่าง และติดตั้ง Thermocouple type k เพื่อวัดอุณหภูมิเฉลี่ยในกรอบแห้ง 6 จุด



ภาพที่ 1 (ก) ระบบเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ทดลอง
(ข) เครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้น

2.2 การทดสอบเครื่องอบแห้งต้นแบบ

การทดสอบนี้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งงานวิจัยนี้แบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนคือ ทดสอบอบข้าวเปลือกโดยแบ่งออกเป็น 3 เงื่อนไข คือ 1.การขบวนการไหลของ

เมล็ดข้าวเปลือกด้วยครีบลับพื้นปลาในกรอบแห้ง 2.การขบวนการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกด้วยตะแกรงเหล็กฉีก ในกรอบแห้ง และ 3.กรอบแห้งที่ไม่ติดตั้งตัวขบวนการไหล (กรอบแห้งเปล่า) อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ใช้ในการทดสอบคือ 60 และ 80 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาเวลาที่ใช้ในการทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 42 - 43 องศาเซลเซียส และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือก หลังจากการพิจารณาเวลาและค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้แล้วจะนำเงื่อนไขที่เหมาะสมมาทำการทดสอบต่อในส่วนที่สองเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมกรอบแห้งต่อไป

วัสดุทดสอบจะเตรียมข้าวเปลือกที่มีความแห้งตามวิธีธรรมชาติ ซึ่งมีความชื้นประมาณ 11.23 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก โดยการจำลองให้ข้าวมีความชื้นอยู่ที่ประมาณ 20 - 25 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ซึ่งเป็นค่าใกล้เคียงกับข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่ [16] ด้วยการพ่นละอองน้ำให้ปะปนกับข้าวเปลือกและคลุกเคล้าให้เข้ากัน จากนั้นนำไปเก็บใส่ภาชนะที่ทึบแสงเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้ข้าวมีความชื้นที่สม่ำเสมอทั่วถึงกัน [17] ในงานวิจัยนี้เลือกความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก โดยปริมาณน้ำที่ต้องเติมให้กับข้าวเปลือก คำนวณดังสมการที่ (1) [18]

$$M_{\text{water, add}} = \frac{100(m_{w, \text{net}} - m_{d, \text{net}}) - (M_{w, \text{target}} \times m_{w, \text{net}})}{(M_{w, \text{target}} - 100)} \quad (1)$$

โดยที่

$M_{\text{water, add}}$ = ปริมาณน้ำที่ต้องเติมให้กับข้าวเปลือก (กิโลกรัม)

$M_{w, \text{target}}$ = ความชื้นข้าวเปลือกที่ต้องการ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก)

$m_{w, \text{net}}$ = มวลวัสดุเปียก (กิโลกรัม)

$m_{d, \text{net}}$ = มวลวัสดุแห้ง (กิโลกรัม)

ทำการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกจากถังพักทุก ๆ 5 นาที จนกระทั่งถึงความชื้นที่ต้องการคือ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาข้าวเปลือก [19] จึงยุติการทดสอบ ทดสอบซ้ำรูปแบบละ 3 ซ้ำ ในการทดสอบนี้ใช้ข้าวเปลือกครั้งละ 1.5 กิโลกรัม ควบคุมอัตราการไหลผ่านกรอบแห้งของข้าวเปลือกคงที่ที่ 1.5 กิโลกรัมต่อนาที เนื่องจากเป็นอัตราการไหลสูงสุดที่ไม่ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกติดค้างที่อุปกรณ์ขบวนการไหล และมีการวัดและบันทึกอุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อมและวัดอุณหภูมิข้าวที่ถังพักข้าว

ตัวอย่างข้าวเปลือกตัวอย่างที่เก็บไว้จะนำไปวิเคราะห์หาความชื้นตามมาตรฐานของ Association of Official Analytical Chemists (AOAC) [20] โดยนำมาเมล็ดข้าวเปลือกประมาณ 5 กรัมใส่ในถ้วยอะลูมิเนียม จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเมื่อครบเวลาแล้วจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง แล้วจึงคำนวณค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก การคำนวณดังสมการที่ (2)

$$M_w = \frac{W_{i,oven} - W_{f,oven}}{W_{i,oven}} \quad (2)$$

โดยที่

M_w = เศษส่วนความชื้นมาตรฐานเปียก (เศษส่วน)

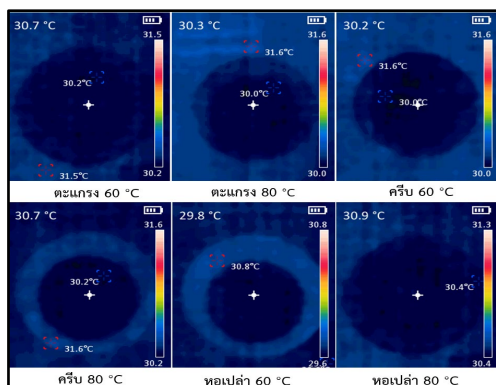
$W_{i,oven}$ = น้ำหนักข้าวเปลือกก่อนนำเข้าตู้อบลมร้อน (กรัม)

$W_{f,oven}$ = น้ำหนักข้าวเปลือกหลังนำออกจาก ตู้อบลมร้อน (กรัม)

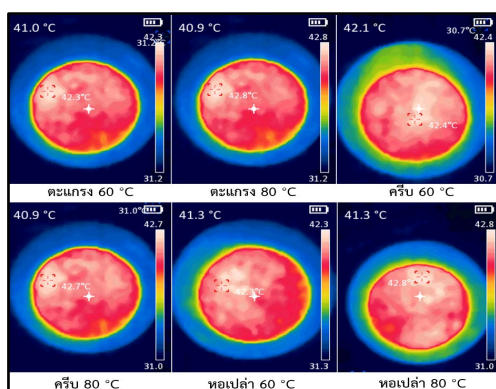
ประเมินสมรรถนะการอบแห้งจากพฤติกรรมการอบแห้ง

3 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการทดสอบในส่วนที่หนึ่ง ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวขวางการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งที่ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30 – 31 องศาเซลเซียสเป็น 42 – 43 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3



ภาพที่ 2 อุณหภูมิข้าวเปลือกก่อนการอบ

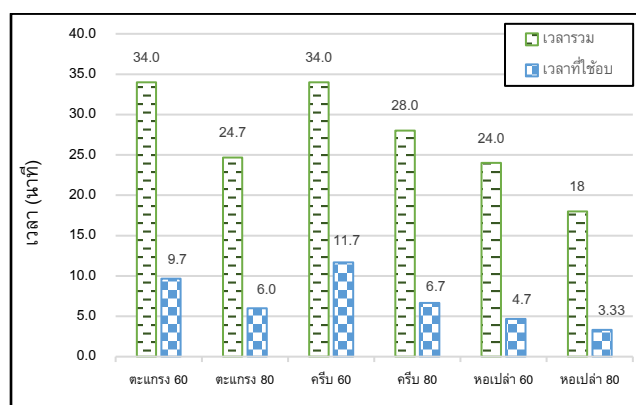


ภาพที่ 3 อุณหภูมิข้าวเปลือกหลังการอบ

จากภาพที่ 2 และ 3 พบว่าทั้ง 3 เงื่อนไขการอบแห้งสามารถเพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือกจากประมาณ 30 องศาเซลเซียสไปเป็นอุณหภูมิประมาณ 42 องศาเซลเซียส ได้ในระหว่างทำการทดสอบเมื่อพิจารณาพบว่ารูปแบบการอบแห้งแบบติดตั้งตัวขวางการไหลทั้ง 2 รูปแบบ สามารถทำให้ข้าวเปลือกได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึงกว่ารูปแบบการอบแห้งแบบหอบแห้ง

เปล่า เนื่องจากตัวขวางการไหลทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีการกระจายตัวในหอบแห้ง จึงส่งผลให้ได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง [13] ต่างจากรูปแบบหอบแห้งเปล่า เมล็ดข้าวเปลือกมีการไหลอย่างช้า ๆ ในหอบแห้งและมีความหนาของชั้นข้าวเปลือกประมาณ 2 เซนติเมตร จึงทำให้ข้าวเปลือกชั้นนอกไม่ได้รับความร้อน ถ้าสังเกตจากภาพที่ 3 อาจจะไม่เห็นถึงความแตกต่างเนื่องจากในขณะที่ทำการทดลองมีการคลุกเคล้าข้าวเปลือกช่วยด้วยเพื่อให้ได้อุณหภูมิข้าวเปลือกที่ต้องการ

เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 42 – 43 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าตัวขวางการไหลมีอิทธิพลต่อระยะเวลาที่ทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4



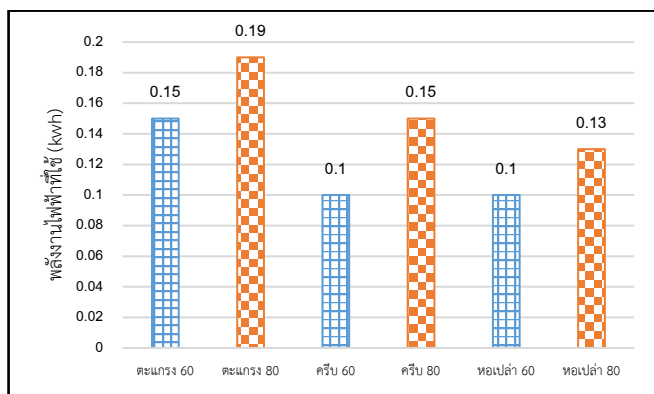
ภาพที่ 4 เวลาที่ใช้ทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิ 42 – 43

องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 4 จะเห็นว่าการทดสอบอบแห้งแบบหอบเปล่าที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิ 42 – 43 องศาเซลเซียส น้อยที่สุด คือ 3.3 นาที และรองลงมาจะเป็นเงื่อนไขการทดสอบอบแห้งแบบหอบเปล่าที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 4.7 นาที เนื่องจากรูปแบบการอบแห้งแบบหอบเปล่าเมล็ดข้าวเปลือกมีการไหลอย่างช้า ๆ ภายในหอบแห้งที่มีการควบคุม อัตราการไหลที่ด้านล่างของหอบแห้ง 1.5 กิโลกรัมต่อนาที ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในหอบแห้งนานกว่าตัวขวางการไหลอีกสองรูปแบบ จึงทำให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่า ส่งผลให้ใช้เวลา น้อยกว่าในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในขณะที่รูปแบบการอบที่ใช้ตัวขวางการไหลแบบตะแกรงเหล็กฉีกและครีบลับฟันปลา เป็นการปล่อยให้เมล็ดข้าวเปลือกไหลจากถังพักข้าวด้านบน ที่มีการควบคุมอัตราการไหล 1.5 กิโลกรัมต่อนาที จากนั้นตกลงสู่หอบแห้งที่มีตัวขวางการไหลซึ่งเมล็ดข้าวเปลือกตกลงอย่างอิสระภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในหอบแห้งเพียงชั่วขณะ ส่งผลให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำกว่า จึงทำให้ใช้เวลามากกว่าในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น [12]

และเมื่อพิจารณาในส่วนของการพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับเมล็ดข้าวเปลือกดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่าเงื่อนไขการอบแห้งแบบหอบเปล่าที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศ

60 องศาเซลเซียส มีการใช้พลังงานเท่ากันกับเงื่อนไขการทดสอบ อบแห้งที่มีตัวขวางการไหลแบบคริสตัลลีนพลาสติกที่อบแห้งด้วย อุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมี การใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 0.1 กิโลวัตต์ - ชั่วโมง

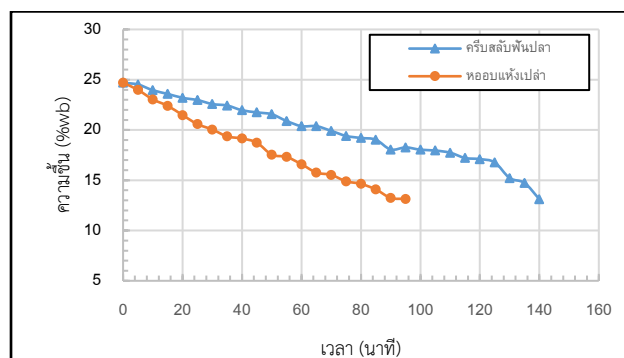


ภาพที่ 5 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือกให้มีอุณหภูมิ 42 - 43 องศาเซลเซียส

เนื่องจากในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เป็น 42 - 43 องศาเซลเซียส หอบเปล่าที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียส ใช้กำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ เป็นเวลา 24 นาที ในขณะที่ตัวขวางการไหลแบบคริสตัลลีนพลาสติกที่อบแห้งด้วย อุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียส ใช้กำลังไฟฟ้า 180 วัตต์ เป็น เวลา 34 นาที เมื่อพิจารณาผลคูณของกำลังไฟฟ้าและเวลาใน หน่วยชั่วโมงของทั้งสองรูปแบบการอบพบว่ามีความเท่ากันคือ 0.1 กิโลวัตต์ - ชั่วโมง จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าทั้งสองรูปแบบการ อบใช้อุณหภูมิอากาศเท่ากันคือ 60 องศาเซลเซียส แต่ใช้ กำลังไฟฟ้าไม่เท่ากัน เนื่องจากตัวขวางการไหลแบบคริสตัลลีน พลาสติกจากสแตนเลสซึ่งมีความสามารถในการดูดซับความร้อนจาก การแผ่รังสีของฮีตเตอร์อินฟราเรดทำให้ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำกว่าแบบ หอบแห้งเปล่า ในการทำให้อุณหภูมิอากาศในหอบแห้งเป็น 60 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงนำ 2 รูปแบบนี้ มาทำการทดสอบต่อเนื่อง เพื่อวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการอบแห้ง

ผลการทดสอบในส่วนที่หนึ่งทำให้ได้เงื่อนไขการอบแห้ง สำหรับส่วนที่สองคือ เงื่อนไขการทดสอบอบแห้งแบบ หอบแห้ง เปล่าและแบบ คริสตัลลีนพลาสติกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศา เซลเซียส ทั้ง 2 รูปแบบ โดยการทดสอบเพิ่มเติมในส่วนที่สองเป็น การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกจำนวน 1.5 กิโลกรัม จากความชื้น เริ่มต้นประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จนกระทั่งเหลือ ความชื้น 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก และควบคุมอัตราการไหล ของเมล็ดข้าวเปลือก 1.5 กิโลกรัมต่ออนาที จากผลการทดสอบเมื่อ พิจารณาในแง่ของพฤติกรรมการอบแห้งพบว่า ความชื้นข้าวเปลือก มีการลดลงแบบคงที่ทั้ง 2 รูปแบบการอบแห้ง เนื่องจากเมื่อใช้ เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกมีค่า สูงขึ้น ทำให้น้ำที่อยู่ภายในชั้นเนื้อข้าวเกิดการเคลื่อนตัวออกมาสู่ บริเวณเปลือกของเมล็ดข้าวและทำให้ความชื้นภายในเมล็ด ข้าวเปลือกลดลงอย่างสม่ำเสมอ และพบว่าผลการทดสอบในเงื่อนไข

หอบแห้งเปล่าใช้เวลาในการอบแห้งเพียง 95 นาที ซึ่งต่ำกว่าแบบ คริสตัลลีนพลาสติกใช้เวลาในการอบแห้งถึง 140 นาที ดังแสดงใน ภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเมื่อเทียบกับเวลา

เนื่องจากรูปแบบการอบแห้งแบบหอบเปล่า เมล็ด ข้าวเปลือกมีการไหลอย่างช้า ๆ ภายในหอบแห้งที่มีการควบคุม อัตราการไหลที่ด้านล่างของหอบแห้ง 1.5 กิโลกรัมต่ออนาที ทำให้ เมล็ดข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในหอบแห้งนานกว่าตัวขวางการไหล อีกสองรูปแบบ จึงทำให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่า ส่งผล ให้ใช้เวลาน้อยกว่าในการลดความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกจาก 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ให้เหลือ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก [11] ในขณะที่ยังรูปแบบการอบที่ใช้ตัวขวางการไหลแบบตะแกรง เหล็กฉีกและคริสตัลลีนพลาสติก เป็นการปล่อยให้เมล็ดข้าวเปลือก ไหลจากถังพักข้าวด้านบนที่มีการควบคุมอัตราการไหล 1.5 กิโลกรัมต่ออนาที จากนั้นตกลงสู่หอบแห้งที่มีตัวขวางการไหล ซึ่ง เมล็ดข้าวเปลือกตกลงอย่างอิสระภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้ เมล็ดข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในหอบแห้งเพียงชั่วขณะ ส่งผลให้มีการ แลกเปลี่ยนความร้อนต่ำกว่า จึงทำให้ใช้เวลามากกว่าในการลด ความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกจาก 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกให้ เหลือ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก

4 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกในหอบแห้งโดยใช้ ฮีตเตอร์อินฟราเรดเป็นตัวทำความร้อน ซึ่งมีการวางหรือการ หน่วงการไหลเมล็ดข้าวที่แตกต่างกันพบว่า จากการทดลองพบว่า ปัจจัยดังกล่าวมีอิทธิพลต่อเวลาที่ทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยหอบแห้งเปล่าที่อบด้วยอุณหภูมิอากาศ 80 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาต่ำสุดในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 42 - 43 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาเพียง 3.3 นาที พบว่าหอบแห้ง เปล่าที่อบด้วยอุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียสและคริสตัลลีน พลาสติกที่อบด้วยอุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียส ใช้พลังงานไฟฟ้า ต่ำที่สุดคือ 0.10 กิโลวัตต์ - ชั่วโมง และจากการทดสอบอบแห้ง ข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 24% มาตรฐานเปียก อบแห้ง จนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้าย 14% มาตรฐานเปียก พบว่าแบบ หอบแห้งเปล่าใช้เวลาในการอบแห้งต่ำที่สุดคือ 95 นาที และ แบบคริสตัลลีนพลาสติกใช้เวลาคือ 140 นาที ใช้เวลาต่างกันถึง 32.14 % อย่างไรก็ตามสำหรับงานวิจัยนี้ยังพบว่า การอบแห้ง

ข้าวเปลือกด้วยวิธีนี้ไม่เหมาะสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความหนาแน่นของชั้นข้าวเปลือกในแนวรัศมีได้ เนื่องจากรังสีอินฟราเรดไม่สามารถทะลุผ่านชั้นของเมล็ดข้าวเปลือกได้ ดังนั้นเมื่อต้องการอบในปริมาณที่เพิ่มขึ้นต้องออกแบบให้หอบแห้งมีความสูงที่เพิ่มขึ้นแทน จากผลการวิจัยดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีแนวคิดสำหรับเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาต่อยอดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบต่อไป ซึ่งจะมีการออกแบบเครื่องให้สามารถเพิ่มปริมาณการอบแห้งได้จาก 1.5 กิโลกรัม เป็น 15 กิโลกรัม พร้อมทั้งทดสอบปรับอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอบแห้งชนิดนี้ ซึ่งผลที่ได้จะมีการทดสอบเปรียบเทียบกับ การลดความชื้นด้วยวิธีธรรมชาติหรือการตากแดด เพื่อศึกษาเวลาที่ใช้ในการลดความชื้น อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ รวมถึงผลถึงกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้เครื่องอบแห้งในด้านของคุณภาพข้าวที่ได้หลังการอบแห้งทั้ง 2 รูปแบบ ในแง่ของการแตกหักของเมล็ดข้าวเปลือก (เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน)

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

6 เอกสารเอกสารอ้างอิง

- [1] กิตติ สถาพรประสารณ์, และ โพธิ์ทอง ปราณีตพล กรัง. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด. Engineering and Technology Horizons. 2017; 34(4):22-29.
- [2] DigitalMedia Thai PBS. เกษตรกรไทย ปลูกอะไรมากที่สุด 5 อันดับแรก. [ออนไลน์]. 2567 [เข้าถึงเมื่อ 2567 กรกฎาคม 20]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.thaipbs.or.th/now/infographic/283>
- [3] กรมการค้าต่างประเทศ. (2567). สรุปตัวเลขปี 2566 ส่งออกข้าว 8.76 ล้านตัน คาดการณ์ปี 67 ส่งออกข้าว 7.5 ล้านตัน. [ออนไลน์]. 2567 [เข้าถึงเมื่อ 2567 กรกฎาคม 20]. เข้าถึงได้จาก : <http://gcc.go.th/?p=139954>
- [4] อภิสิทธิ์ ภักดีแก้ว, กระวี ตรีอำนาจ, และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ. แบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่อง อบแห้งแบบพาหะลม. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและ เทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ, 2565; 8(2): 99-109.
- [5] เกรียงไกร เพชรน้ำเขียว. การทดลองและวิเคราะห์หาแนวทางอบแห้งข้าวเปลือกให้ได้ประสิทธิภาพสูงด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครราชสีมา :มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2551.
- [6] บุญทริกา ศิลา. การพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยรังสีอินฟราเรด [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครราชสีมา :มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2565.
- [7] กองวิจัยและพัฒนาข้าว. องค์ความรู้เรื่องข้าว. [ออนไลน์]. 2559 [เข้าถึงเมื่อ 2567 กรกฎาคม 20]. เข้าถึงได้จาก : <https://webold.ricethailand.go.th/rkb3 / title-index.php-file=content.php&id=3-5.htm>
- [8] ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, กระวี ตรีอำนาจ, และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ. อิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือก.วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร , 2565; 16(1): 165-176.
- [9] จิตรารัตน์ จอกแก้ว. การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครราชสีมา :มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2559.
- [10] ณัฐพล แซ่ลิม. การอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรดในแนวรัศมี [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครราชสีมา :มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2560.
- [11] ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา. เส้นแนวปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นช่อง [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครราชสีมา :มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2557.
- [12] ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, ทวีข จิตรสมบูรณ์. การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นในท่อพินปลา.วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2565; 17(1):53-63
- [13] ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, ทวีข จิตรสมบูรณ์. (2557). เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหน้าต่างติดตะแกรง. ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28; 15-17 ตุลาคม 2557; ขอนแก่น, มหาวิทยาลัยขอนแก่น,. 2557.
- [14] ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, กรณ์กมล ภูครองหิน, เอกบดี เมืองกลาง, ปรีชา สมหวัง, เด่น คอกพิมาย, กัมพล อรนนท์ และ วิชาญณรงค์ วงศ์บับพา. (2567). เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหมุนวนในท่อกระเปาะ. ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 38; 16-19 กรกฎาคม 2567; ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี,. 2567.
- [15] บริษัท สุพรีมไลน์ จำกัด. บทความสาระน่ารู้มีประโยชน์ ฮีตเตอร์อินฟราเรด Infrared Heater. [ออนไลน์]. 2567 [เข้าถึงเมื่อ 2567 กรกฎาคม 20]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.supremelines.co.th/สาระน่ารู้/2063-ฮีตเตอร์อินฟราเรด-infrared-heater.html>
- [16] Department of Agriculture. Quality and Inspection of Thai Hom Mali Rice. Jirawat express co., ltd. Bangkok Thailand; 2004.

- [17] Limpiti, S. and Changrue, V. Effects of Rewetting on Milling Quality of Wet Season Japanese Rice. *Journal of Agricultural*. 1996; 12(2):134-139.
- [18] อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว. การพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครราชสีมา :มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2564.
- [19] Nuttaphon, S., Tawarat, T. and Krawee, T. Development of a Continuous Flow Paddy Dryer with Infrared Radial Radiation Technique. *RMUTP Research Journal*. 2018; 12(2): 37-46.
- [20] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). *Official Methods of Analysis*. 17th ed., Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, Maryland; 2000.

การสะสมของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินตัวอย่างจากสวนส้มโอทับทิมสยาม อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช

Accumulation of Radionuclides in Soil Samples from *Citrus maxima* (Burm.f.) Merr cultivation farm at Pak Phanang District, Nakhon Si Thammarat Province

วุฒิชัย จันทร์แจ่มใส¹ พวงทิพย์ แก้วทับทิม^{1*}
Wuttichai Janjamsai¹ and Pungtip Kaewtubtim^{1*}

¹สาขาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

¹Department of Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani Province

Corresponding author: 0819594215 Email: pungtip.k@psu.ac.th

Received: 21-10-2024 Revised: 26-06--2025 Accepted: 30-12-2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในตัวอย่างดินจากสวนส้มโอพันธุ์ทับทิมสยาม อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช และเพื่อประเมินดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสี ทำการเก็บตัวอย่างดินตามระดับความลึกช่วงละ 5 cm จากระดับผิวดินจนถึงระดับ 30 cm รวมจำนวน 10 ตำแหน่ง ๆ ละ 6 ตัวอย่าง รวม 60 ตัวอย่าง โดยใช้ระบบการวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมตรี หัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) พบว่าค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Ra-226, Th-232 และ K-40 มีค่าเฉลี่ย 93.50 ± 6.16 , 17.51 ± 2.70 และ 610.49 ± 59.05 Bq/kg ตามลำดับ ซึ่งค่านิวไคลด์กัมมันตรังสี Ra-226 และ K-40 มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของประเทศไทยและค่าเฉลี่ยทั่วโลก ส่วนนิวไคลด์กัมมันตรังสี Th-232 มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของประเทศไทยและค่าเฉลี่ยทั่วโลก นอกจากนี้ค่าอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (D) สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดโดย UNSCEAR ส่วนปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) และค่าดัชนีความเสี่ยงจากการได้รับรังสีจากภายนอกร่างกาย (H_{ex}) ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดโดย UNSCEAR ผลการศึกษารูปลักษณ์ดินในสวนส้มโอพันธุ์ทับทิมสยาม อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราชมีการปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสีต่ำ และประชาชนผู้อยู่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้นปลอดภัยจากการได้รับปริมาณสารกัมมันตรังสีธรรมชาติ

คำสำคัญ: กัมมันตภาพรังสี, ค่าดัชนีความเป็นอันตรายทางรังสี, สวนส้มโอพันธุ์ทับทิมสยาม, หัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง

Abstract

The objective of this research was to study the specific activity of natural radionuclides in soil samples from *Citrus maxima* (Burm.f.) Merr cultivation farm, Pak Phanang District, Nakhon Si Thammarat Province and assess the radioactive hazard index. The soil samples were collected at a depth of 5 cm per layer from the surface to 30 cm, a total of 10 locations, 6 samples each, for a total of 60 samples by using the gamma spectrometry analysis system with a High-Purity germanium detector (HPGe). The result show that the specific activity of Ra-226, Th-232 and K-40 were 93.50 ± 6.16 , 17.51 ± 2.70 and 610.49 ± 59.05 Bq/kg respectively. The radionuclides of Ra-226 and K-40 were higher than the Thai average and world standard, while the radionuclide of Th-232 was lower than. In addition, the gamma radiation absorption rate (D) was above the threshold set by UNSCEAR. The annual external effective dose rate (E), the radium equivalent (Ra_{eq}) and the external hazard index (H_{ex}) were below the thresholds set by UNSCEAR. The results of the study concluded that the soil samples from *Citrus maxima* (Burm.f.) Merr cultivation farm, Pak Phanang District, Nakhon Si Thammarat Province is low radioactive contamination and that people living in the area are naturally safe from exposure to radioactive substances.

Keywords: Radioactive, Radiological Hazard Index, *Citrus maxima* (Burm.f.) Merr cultivation Farm, High-Purity Germanium Detectors (HPGe)

1. บทนำ

ส้มโอพันธุ์ทับทิมสยามเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยม และมีการปลูกอย่างแพร่หลายในอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่มีพื้นที่เพาะปลูก 3,465 ไร่ ให้ผล 1,680 ไร่ พื้นที่ปลูกส้มโอพันธุ์ทับทิมสยามส่วนใหญ่อยู่ในตำบลคลองน้อย ตำบลเกาะทวด และตำบลคลองกระเปาะ อำเภอปากพนัง สภาพภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่ม เดิมมีสภาพเป็น นาข้าว เกษตรกรจึงได้ขุดร่องเพื่อปลูกส้มโอพันธุ์ทับทิมสยาม ซึ่งตำบลที่มีการปลูกมากที่สุดคือ ตำบลคลองน้อย คิดเป็นสัดส่วนต่อพื้นที่ทั้งหมด 80 % [1] โดยส้มโอพันธุ์ทับทิมสยามมีราคาผลละ 80-180 บาท (ขึ้นอยู่กับขนาดของผล) สำหรับตลาดของส้มโอพันธุ์ทับทิมสยามมีทั้งตลาดภายใน เช่น จังหวัดภูเก็ต สุราษฎร์ธานี หรือกรุงเทพมหานคร และส่งออกต่างประเทศ ได้แก่ฮ่องกง ไต้หวัน เป็นต้น ส้มโอพันธุ์ทับทิมสยามเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่ทำรายได้มหาศาลให้กับประเทศไทยโดยมีรายได้สูงสุด 25,000 บาทต่อเดือนต่อครอบครัว [2] ซึ่งการส่งพืชผลทางเศรษฐกิจไปขายต่างประเทศควรได้รับการตรวจสอบคุณภาพในหลาย ๆ ด้าน รวมทั้งการตรวจสอบการปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสีด้วย พืชผลทางเศรษฐกิจจะมีการปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสีสูงถ้าดินที่ใช้เพาะปลูกมีความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีสูง เนื่องจากพืชจะดูดซับสารกัมมันตรังสีเข้าสู่ลำต้น และส่งไปยังส่วนต่างๆ รวมทั้งส่วนของผล การบริโภคผลไม้ที่มีสารกัมมันตรังสีปนเปื้อน จะทำให้ร่างกายได้รับสารกัมมันตรังสีไปด้วย สารกัมมันตรังสีมีผลต่อสุขภาพของผู้บริโภค การได้รับสารกัมมันตรังสีส่งผลต่อการเกิดโรคมะเร็ง เนื้องอก และเกิดความเสียหายทางพันธุกรรมได้ [3]

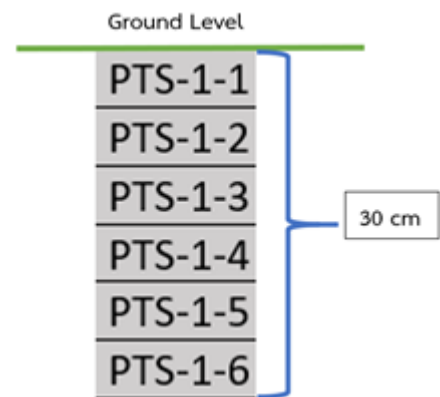
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อตรวจสอบระดับการสะสมของสารกัมมันตรังสีในตัวอย่างดินที่เก็บมาจากสวนส้มโอพันธุ์ทับทิมสยาม อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อประเมินความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นต่อผู้บริโภค

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วิธีการเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

วางแผนกำหนดจุดเก็บตัวอย่างดินในบริเวณสวนส้มพันธุ์โอทับทิมสยาม ตำบลคลองน้อย และตำบลเกาะทวด อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราชจำนวน 10 สถานี ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการปลูกส้มโอพันธุ์ทับทิมสยามมากที่สุดในอำเภอปากพนังการเก็บตัวอย่างดินโดยใช้ท่อเจาะดิน เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ยาว 50 cm ซึ่งเจาะลึกจากผิวดิน ประมาณ 30 cm จากนั้นเก็บดินตามระดับความลึกช่วงละ 5 cm จากระดับผิวดินจนถึงระดับ 30 cm คือ ระดับ 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, และ 25-30 cm ตัวอย่างสถานีที่ 1 ตั้งรหัสเป็น PTS-1-1, PTS-1-2, PTS-1-3, PTS-1-4, PTS-1-5, PTS-1-6 เรียงลำดับจากบนลงล่าง ทั้งหมด 10 สถานี ๆ ละ 6 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 60 ตัวอย่าง ภาพที่ 1 นำตัวอย่างดินแต่ละชั้นมาจัดเรียงบนเบื่อน นำไปตากจนแห้ง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น

และอบตัวอย่างซ้ำจนกระทั่งความชื้นคงที่ จากนั้นบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดตัวอย่าง แล้วร่อนด้วยตะแกรงร่อน ขนาด 120 μm เพื่อให้ตัวอย่างมีขนาดเท่ากัน แล้วนำตัวอย่างดินผงบรรจุในภาชนะพลาสติกรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 cm สูง 10.2 cm ซึ่งมีขนาดเท่ากับภาชนะบรรจุสารมาตรฐานดิน IAEA-375 และความสูงของตัวอย่างในภาชนะพลาสติกรูปทรงกระบอกเท่ากับ ความสูงของสารมาตรฐาน ปิดฝาภาชนะพลาสติกรูปทรงกระบอกให้สนิทโดยใช้เทปพันสายไฟพันรอบรอยต่อระหว่างฝากับตัวภาชนะพลาสติกรูปทรงกระบอกวางทิ้งไว้เป็นเวลา 30 วันเพื่อให้เข้าสู่สภาวะสมดุลทางรังสีอย่างถาวร [4]



ภาพที่ 1 การเก็บตัวอย่างดินสถานีที่ 1

2.2 ตรวจวัดและวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ (Ra-226, Th-232, K-40) ในดินจากสวนส้มโอพันธุ์ทับทิมสยาม อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช

วัดค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Ra-226, Th-232 และ K-40 ในตัวอย่างดินที่เตรียมไว้ ในข้อ 2.1 ด้วยหัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) ทำการปรับเทียบเครื่องมือวัดโดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีมาตรฐาน Cs-137 และ Co-60 เป็นระยะเวลา 18,000 วินาที และคำนวณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในธรรมชาติ โดยใช้สารมาตรฐานดิน IAEA-375 จากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ บางเขน กทม. ในการคำนวณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี วิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ Ra-226 ที่พลังงาน 609.31 keV ซึ่งเป็นพลังงานของ Bi-214 สำหรับ Th-232 วิเคราะห์ที่พลังงาน 911.21 keV ซึ่งเป็นพลังงานของ Ac-228 เนื่องจากนิวไคลด์ดังกล่าวมีเปอร์เซ็นต์การสลายตัวให้รังสีแกมมา ในธรรมชาติสูง และ K-40 วิเคราะห์ที่พลังงาน 1460.75 keV ประเมินผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป GenieTM 2000 Basic Spectroscopy Software ในการบันทึกจำนวนนับได้สเปกตรัมรังสีแกมมา เพื่อ

หาคัมมันตภาพจำเพาะของ Ra-226, Th-232 และ K-40 ดังสมการที่ (1)

$$A_x = \frac{N_s}{E_{ff} \times P_\gamma \times T \times M_s} \quad (1)$$

เมื่อ A_x คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างดิน (Bq/kg) N_s คือ อัตรานับสุทธิ (พื้นที่ใต้พีค/เวลาที่วัด) E_{ff} คือประสิทธิภาพของหัววัดรังสี (อัตรานับวัด/ เบ็กเคอเรล) P_γ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ที่มีรังสีแกมมาออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสี (%yield) T คือ เวลาที่นับวัด (วินาที) M_s คือมวลของตัวอย่างดินที่ทำการวัดรังสี (กิโลกรัม)

2.3 วิเคราะห์ค่าดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีในตัวอย่างดิน

วิเคราะห์ค่าดัชนีอันตรายจากกัมมันตภาพ รังสีที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Ra-226, Th-232 และ K-40 ในตัวอย่างดินจากบริเวณสวนส้มโอพันธุ์ทับทิมสยาม ตำบลคลองน้อย และตำบลเกาะหวด อำเภอบางแพ จังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อเป็นตัวชี้วัดระดับความเป็นอันตรายจากการได้รับสารกัมมันตรังสีจากธรรมชาติต่อการใช้ชีวิตประจำวัน โดยคณะกรรมการวิทยาศาสตร์ขององค์กรสหประชาชาติเกี่ยวกับผลของรังสีปรมาณู [5] ได้กำหนดเกณฑ์ไว้ดังนี้

2.3.1 ปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) เป็นค่าความเข้มรังสีแกมมาในอากาศ ซึ่งเป็นรังสีจากวัสดุกัมมันตรังสีที่มาจากพื้นโลก ที่ความสูง 1 เมตรจากพื้นดิน โดยค่า 0.462, 0.604 และ 0.0417 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการแปลง ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ เป็นอัตราปริมาณรังสีที่ดูดกลืนอากาศ ของ Ra-226, Th-232 และ K-40 ตามลำดับ [6,7] สำหรับค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนที่เฉลี่ยจากทั่วโลกมีค่าเท่ากับ 57 nGy/h [5] คำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$D(\text{nGy/h}) = 0.462A_{\text{Ra-226}} + 0.604A_{\text{Th-232}} + 0.0417A_{\text{K-40}} \quad (2)$$

2.3.2 ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) เป็นปริมาณรังสีที่ได้รับต่อปีสามารถคำนวณได้จากการแปลงค่าความสัมพันธ์จากค่าปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) เป็นปริมาณรังสียังผลที่บุคคลทั่วไปได้รับหรือใช้เวลาออกอากาศบ้านเรือนประมาณ 20 % ของเวลาทั้งหมดใน 1 ปี ซึ่งไม่ควรเกิน 0.48 mSv/y [5] คำนวณได้จากสมการ (3)

$$E(\text{mSv/y}) = D \times 8760 \times 0.2 \times 0.7 \times 10^{-6} \quad (3)$$

เมื่อ D คือ ปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (nGy/h), 8760 คือ ค่าปริมาณที่ได้รับรังสีรายปี(ชั่วโมงต่อปี), 0.2 คือ เวลาที่ประชาชนอยู่นอกอาคารบ้านเรือนใน 1 ปี และ 0.7 คือ ค่าปริมาณรังสียังผล ที่บุคคลทั่วไปได้รับภายนอกอาคารมีหน่วยเป็น (Sv/Gy)

2.3.3 ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (Ra_{eq}) เป็นผลรวมของค่าถ่วงน้ำหนักของค่ากัมมันตภาพรังสีของทั้ง 3 ไอโซโทป ที่มีการศึกษาพบว่า Ra-226 มีกัมมันตภาพรังสีที่ 1 Bq/kg จะให้ปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีเทียบเท่าของกัมมันตภาพรังสีของ Th-232 ที่ 1.43 Bq/kg และค่ากัมมันตภาพรังสีของ K-40 ที่ 0.077 Bq/kg [8,9,7] ดังนั้นสามารถคำนวณค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม และ Ra_{eq} มีค่าไม่ควรเกิน 370 Bq/kg (UNSCEAR, 2000)[5] คำนวณได้จากสมการ (4)

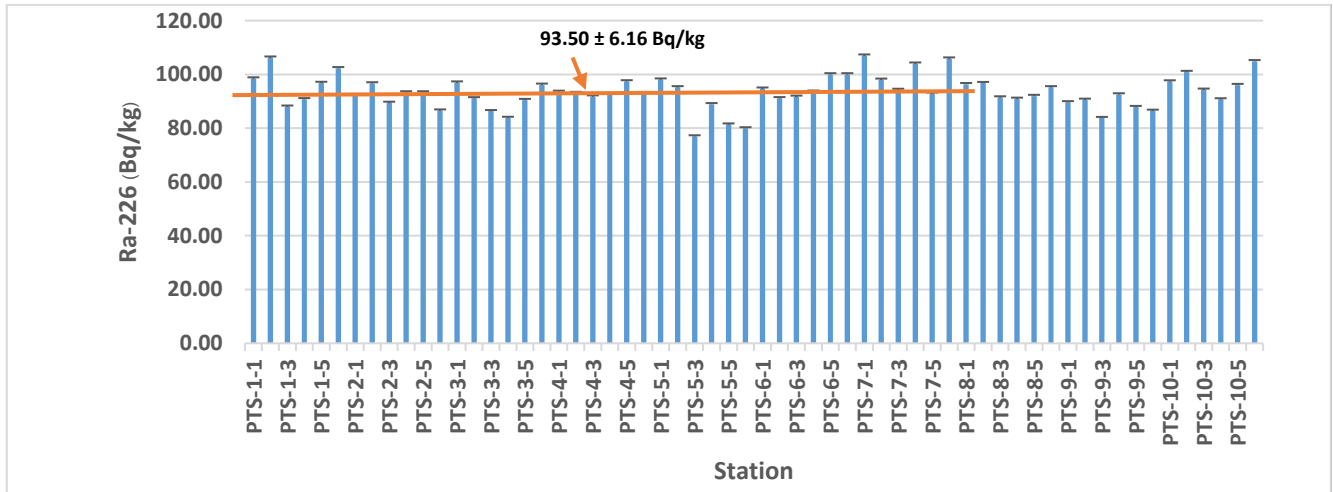
$$Ra_{eq}(\text{Bq/kg}) = A_{\text{Ra-226}} + 1.43A_{\text{Th-232}} + 0.077A_{\text{K-40}} \quad (4)$$

เมื่อ $A_{\text{Ra-226}}$, $A_{\text{Th-232}}$ และ $A_{\text{K-40}}$ คือ ค่า กัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Ra-226, Th-232 และ K-40 ในตัวอย่างดิน ตามลำดับ มีหน่วยเป็น Bq/kg

2.3.4 ค่าดัชนีวัดความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอกร่างกาย (H_{ex}) เป็นปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับอันตรายจากแหล่งกำเนิดรังสีที่อยู่ในธรรมชาติโดยกัมมันตภาพรังสีที่ร่างกายได้รับส่วนใหญ่มักจะเป็นกัมมันตภาพรังสีแกมมา เพราะรังสีแกมมามีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงกว่ารังสีอื่น ๆ โดย H_{ex} จะประเมินผลกระทบที่มนุษย์ได้รับรังสีเนื่องจากรังสีแกมมาภายนอก หากค่า $H_{ex} < 1$ แสดงว่าปริมาณ ดัชนีความเสี่ยงรังสีจากภายนอกมีค่าน้อยมากจนละทิ้งได้ ถ้า $H_{ex} = 1$ แสดงว่าร่างกายจะได้รับปริมาณรังสีดูดกลืน เท่ากับ 1.5 mGy/y และถ้า $H_{ex} > 1$ แสดงว่าร่างกายจะได้รับอันตรายจากภายนอก หมายความว่าสิ่งต่าง ๆ ที่อยู่รอบ ๆ ตัวเราไม่ควรนำมาใช้ในการดำเนินชีวิตหรือควรหลีกเลี่ยง [5-7,9] คำนวณได้จากสมการ (5)

$$H_{ex} = \frac{A_{\text{Ra-226}}}{370} + \frac{A_{\text{Th-232}}}{259} + \frac{A_{\text{K-40}}}{4810} \quad (5)$$

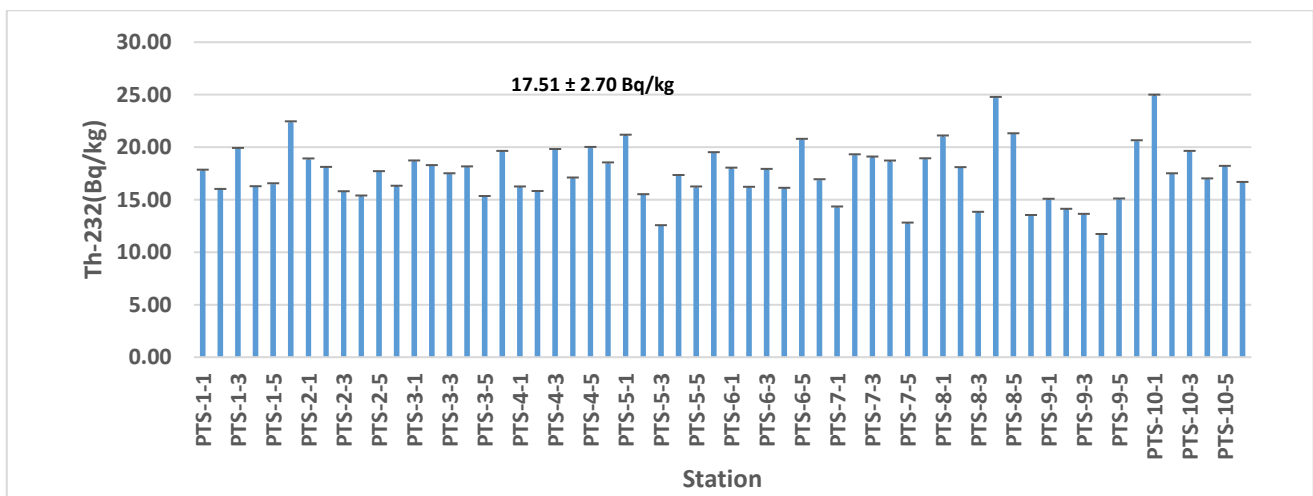
3. ผลการวิจัยและอภิปราย



ภาพที่ 2 ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Ra-226 ในตัวอย่างดิน

จากภาพที่ 2 แสดงปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Ra-226 มีค่าเฉลี่ยที่ 93.50 ± 6.16 Bq/kg ค่าสูงสุด 106.93 ± 0.50 Bq/kg ที่ตัวอย่าง PTS-7-1 รองลงมาที่ 106.17 ± 0.50 Bq/kg ตัวอย่าง PTS-1-2 และค่าน้อยที่สุด 76.98 ± 0.39 Bq/kg ที่ตัวอย่าง PTS-5-3 จะเห็นว่าที่ระดับความลึกต่าง ๆ ในสถานี

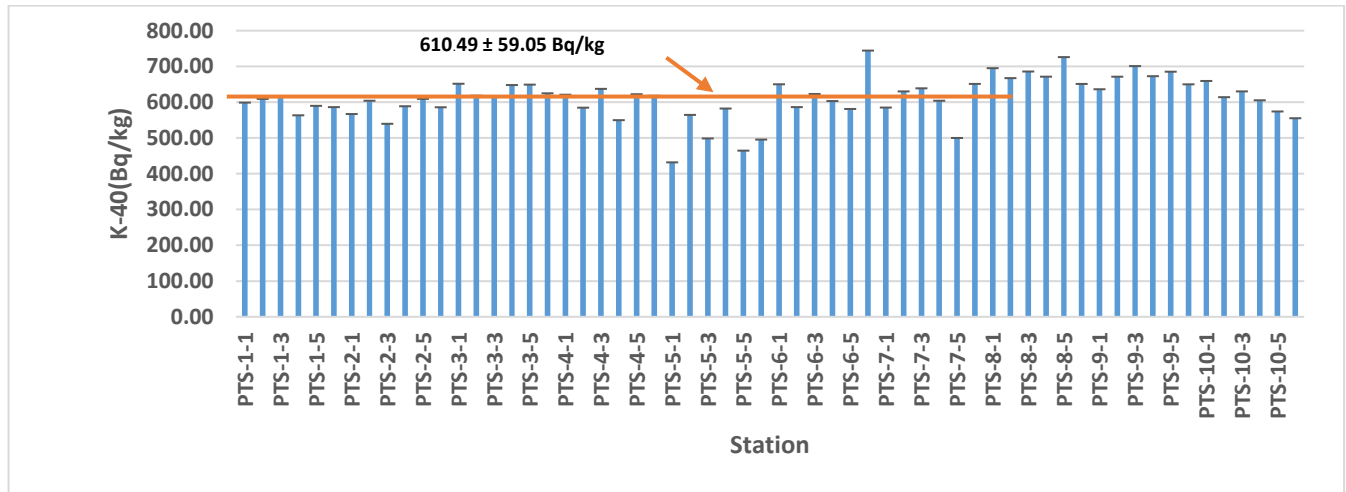
เดียวกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน และในแต่ละสถานีมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ อาจจะมีสาเหตุมาจากในขั้นตอนการเตรียมแปลงปลูกเกษตรกรมีการขุด ยกร่อง จึงทำให้ดินที่ระดับความลึก 30 cm มีการผสมกัน



ภาพที่ 3 ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Th-232 ในตัวอย่างดิน

จากภาพที่ 3 แสดงปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Th-232 มีค่าเฉลี่ยที่ 17.51 ± 2.70 Bq/kg มีค่าสูงสุด 24.90 ± 0.10 Bq/kg ที่ตัวอย่าง PTS-10-1 รองลงมาที่ 24.69 ± 0.10 ตัวอย่าง PTS-8-4 และค่าน้อยที่สุด 11.66 ± 0.07 Bq/kg ที่ตัวอย่าง PTS-9-4 ที่ระดับความลึก ต่าง ๆ ในสถานี

เดียวกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ อาจจะมีสาเหตุมาจากในขั้นตอนการเตรียมแปลงปลูกเกษตรกรมีการขุดยกร่อง จึงทำให้ดินที่ระดับความลึก 30 cm มีการผสมกัน เช่นเดียวกับความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Ra-226



ภาพที่ 4 ความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี K-40 ในตัวอย่างดิน

จากภาพที่ 4 แสดงปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี K-40 มีค่าเฉลี่ย 610.49 ± 59.05 Bq/kg มีค่าสูงสุด 722.12 ± 0.95 Bq/kg ที่ตัวอย่าง PTS-6-6 รองลงมาที่ 722.12 ± 0.95 Bq/kg ตัวอย่าง PTS-8-5 และค่าน้อยที่สุด 431.03 ± 0.48 Bq/kg ที่ตัวอย่าง PTS-5-1 จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้นของนิวไคลด์

กัมมันตรังสี K-40 มีค่าที่สูงกว่านิวไคลด์อื่นๆ เนื่องจากโพแทสเซียมเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับที่ 7 ในเปลือกโลก คิดเป็น 2.6% ของน้ำหนักของเปลือกโลก [10] ขึ้นอยู่กับสภาพลักษณะทางธรณีวิทยาของแต่ละพื้นที่ และการใช้ปุ๋ยในพื้นที่เพาะปลูกนั้นๆ

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างดิน จากผลการศึกษาทั้งใน และต่างประเทศ

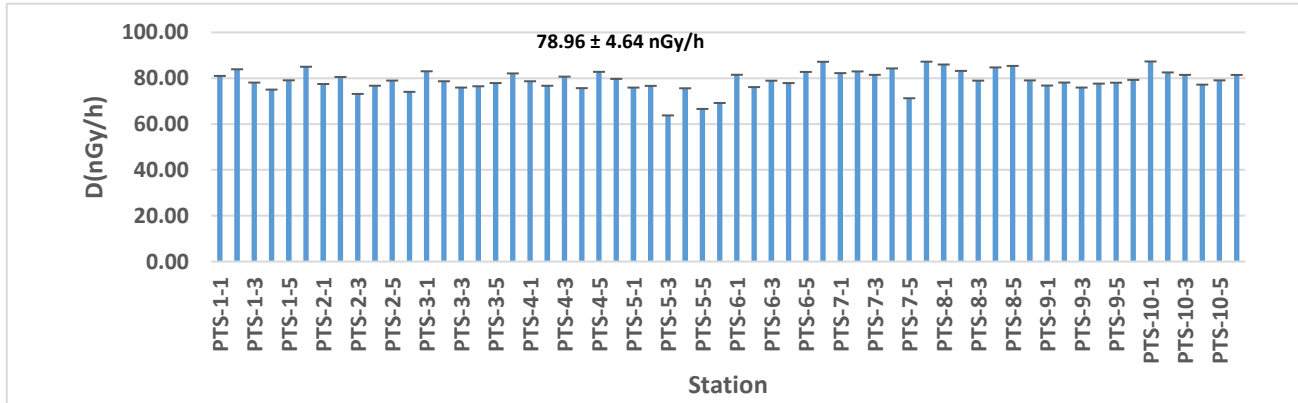
Locations	Specific Activity (Bq/kg)			Reference
	Ra-226	Th-232	K-40	
Pak Phanang District	93.50 ± 6.16	17.51 ± 2.70	610.49 ± 59.05	Present Study
Satun (2011)	98.75 ± 6.76	63.63 ± 2.34	$4,020.90 \pm 246.55$	[11]
Narathiwat (2016)	421.89 ± 10.11	221.57 ± 26.09	1436.35 ± 144.92	[12]
Malaysia (2015)	51.06 ± 5.83	78.44 ± 6.42	125.66 ± 7.26	[13]
Laos (2020)	44.4 ± 3.2	63.2 ± 5.2	523 ± 18	[14]
Turkey (2021)	8 ± 3	7 ± 3	136 ± 15	[15]
Southern Thailand Data	171.55 ± 3.13	211.19 ± 1.98	511.04 ± 7.04	[16]
Thailand Data	48	40	400	[16]
Worldwide	35	30	400	[5]

จากตารางที่ 1 ค่าความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Ra-226 มีค่าเฉลี่ย 93.50 ± 6.16 Bq/kg ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ในตัวอย่างดินของจังหวัดสตูล [11] มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินของประเทศ มาเลเซีย ลาว ตุรกี ไทย และของโลก [5,13-16] และมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับผลการ

วิเคราะห์ตัวอย่างดินของจังหวัดนราธิวาส และภาคใต้ของประเทศไทย [12,16] สำหรับค่าความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Th-232 มีค่าเฉลี่ย 17.51 ± 2.70 Bq/kg ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ในตัวอย่างดินของโลก [5] มีค่า สูงกว่าเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ในตัวอย่างดินของประเทศตุรกี [15] และมีค่าต่ำกว่า

เมื่อเทียบผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินของจังหวัดสตูล นราธิวาส ประเทศมาเลเซีย ลาว ภาคใต้ของประเทศไทย และของประเทศ ไทย [11-14,16] และค่าความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสี K-40 610.49 ± 59.05 Bq/kg ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ใน ตัวอย่างดินของประเทศลาว ภาคใต้ของประเทศไทย ประเทศไทย

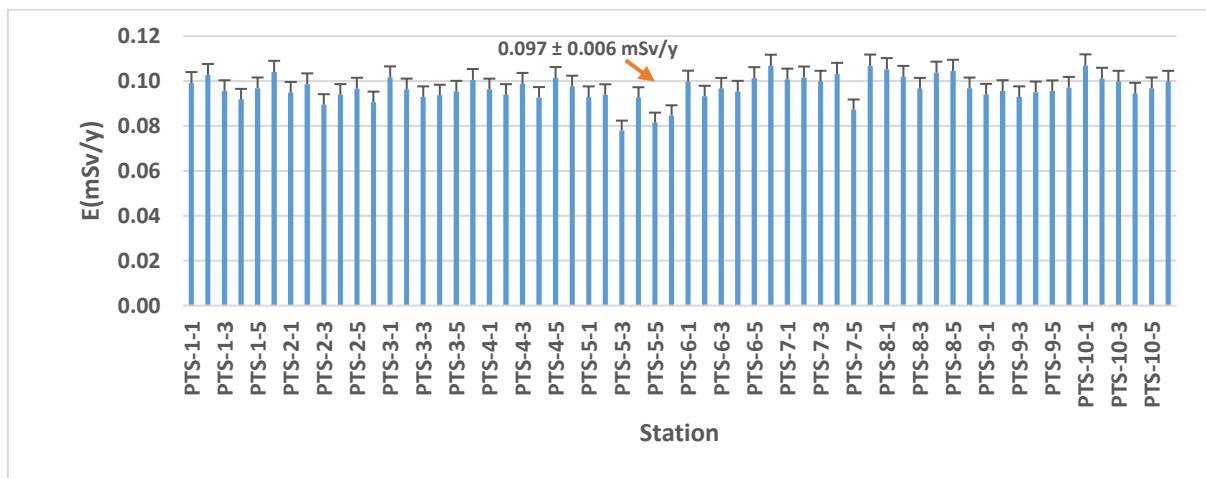
และของโลก [5,14,16] มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์ในตัวอย่างดินของประเทศมาเลเซีย และประเทศ ตุรกี [13,15] และมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน ของจังหวัดสตูล และจังหวัดนราธิวาส [11,12]



ภาพที่ 5 ค่าปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (D)

จากภาพที่ 5 แสดงค่าปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศ (D) มีค่าอยู่ในช่วง 63.65 ± 0.12 ถึง 87.18 ± 0.14 nGy/h เฉลี่ย 78.96 ± 4.64 nGy/h มีค่าสูงสุดที่ตัวอย่าง PTS-10-1 และมีค่าต่ำ ที่สุดที่ตัวอย่าง PTS-5-3 โดยที่สถานีต่าง ๆ มีค่า ใกล้เคียงกัน

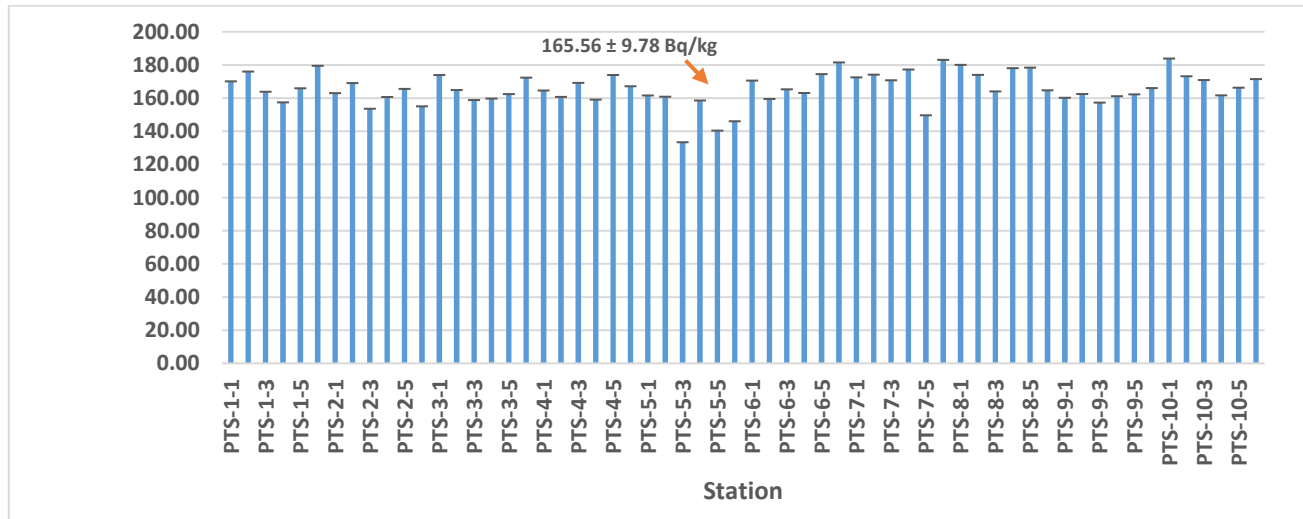
และที่ระดับความลึกต่าง ๆ ในสถานีเดียวกันก็มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่ง จะเห็นว่ามีค่าปริมาณรังสีดูดกลืนในอากาศทุกตัวอย่างมีค่าสูงกว่า ค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนที่เฉลี่ยจากทั่วโลกมีค่าเท่ากับ 57 nGy/h [5]



ภาพที่ 6 ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E)

จากภาพที่ 6 แสดงค่าปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอก ร่างกายประจำปี (E) มีค่าอยู่ในช่วง 0.078 ± 0.004 ถึง 0.107 ± 0.005 mSv/y เฉลี่ย 0.097 ± 0.006 mSv/y มีค่าสูงสุดที่ ตัวอย่าง PTS-7-6, PTS-10-1 และมาค่าต่ำที่สุดที่ตัวอย่าง PTS-

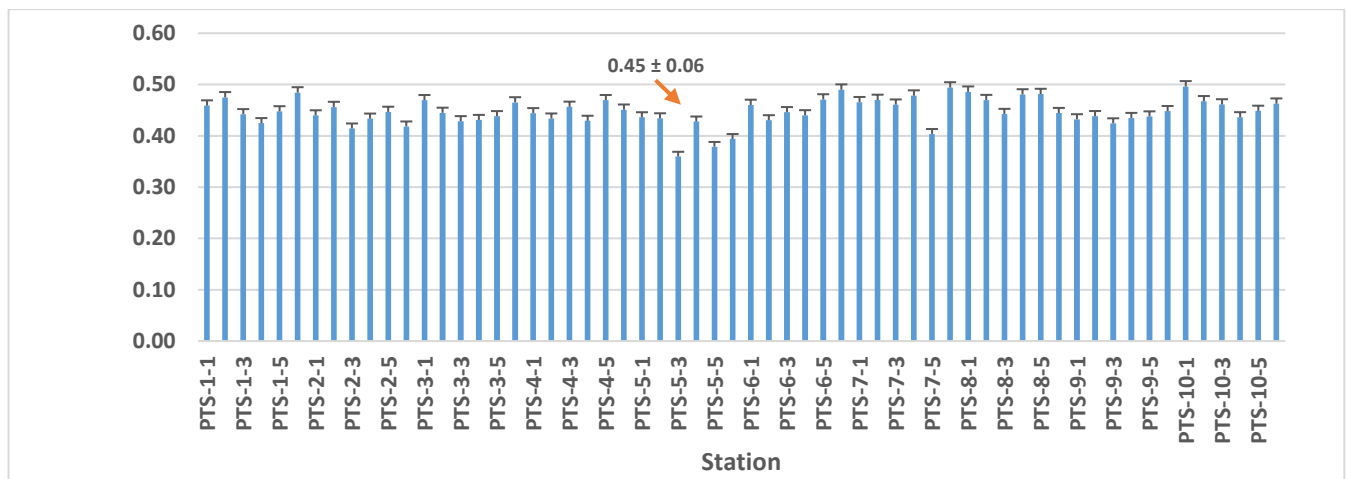
5-3 โดยที่สถานีต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน และที่ระดับความลึก ต่าง ๆ ในสถานีเดียวกันก็มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจะเห็นว่า มีค่า ปริมาณรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายประจำปี (E) ทุก ตัวอย่างมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ ซึ่งไม่ควรเกิน 0.48 mSv/y [5]



ภาพที่ 7 ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (R_{eq})

จากภาพที่ 7 แสดงค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (R_{eq}) มีค่าอยู่ในช่วง 133.19 ± 0.18 ถึง 183.66 ± 0.20 Bq/kg เฉลี่ย 165.56 ± 9.78 Bq/kg มีค่าสูงสุดที่ตัวอย่าง PTS-10-1 และ มาค่าต่ำที่สุดที่ตัวอย่าง PTS-5-3 โดยที่สถานีต่าง ๆ มี ค่า

ใกล้เคียงกัน และที่ระดับความลึกต่าง ๆ ในสถานีเดียวกันก็มีค่า ใกล้เคียงกัน จะเห็นว่ามีค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (R_{eq}) ทุกตัวอย่าง มีค่าต่ำกว่าค่าความเสี่ยง ซึ่งไม่ควรเกิน 370 Bq/kg [5]



ภาพที่ 8 ดัชนีวัดความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอกร่างกาย (H_{ex})

และจากภาพที่ 8 แสดงค่าดัชนีวัดความเสี่ยงจากการได้รับรังสี ภายนอกร่างกาย (H_{ex}) มีค่า อยู่ในช่วง 0.36 ± 0.01 ถึง 0.50 ± 0.01 เฉลี่ย 0.45 ± 0.06 มีค่าสูงสุดที่ตัวอย่าง PTS-10-1 และมี ค่าต่ำที่สุดที่ตัวอย่าง PTS-5-3 โดยที่สถานีต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน และที่ระดับความลึกต่าง ๆ ในสถานีเดียวกันก็มีค่า ใกล้เคียงกัน ซึ่ง จะเห็นว่ามีค่าดัชนี วัดความเสี่ยงจากการได้รับรังสีภายนอก ร่างกายทุกตัวอย่างมีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่ง หากค่า $H_{ex} < 1$ แสดงว่า ปริมาณ ดัชนีความเสี่ยงรังสีจากภายนอกมีค่าน้อยมากจนละทิ้งได้ [5-7,9]

4. บทสรุป

ผลการวิเคราะห์ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ กัมมันตรังสี Ra-226, Th-232 และ K-40 ในตัวอย่างดินจากสวน สัมโพพันธุ์ทับทิมสยาม อำเภอบางแพ จังหวัดนครศรีธรรมราช รวมทั้งหมด 10 ตำแหน่ง ๆ ละ 6 ตัวอย่าง รวม 60 ตัวอย่าง พบว่ากัมมันตภาพจำเพาะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 93.50 ± 6.16 , 17.51 ± 2.70 และ 610.49 ± 59.05 Bq/kg ตามลำดับ และผลการ ประเมินค่าอัตราปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนในอากาศ (D) มี ค่าเฉลี่ย 78.96 ± 4.64 nGy/h พบว่ามีค่าสูงกว่าขีดจำกัดที่แนะนำ โดยคณะกรรมการวิทยาศาสตร์ขององค์กรสหประชาชาติเกี่ยวกับ ผลของรังสีปริมาณ [5] เพียง 1.39 เท่า สำหรับปริมาณรังสีที่ได้รับ จากภายนอกประจำปี (E) มีค่าเฉลี่ย 0.097 ± 0.006 mSv/y กัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียม (R_{eq}) มีค่าเฉลี่ย $165.56 \pm$

9.78 Bq/kg และค่าดัชนีความเสี่ยงการได้รับรังสีจากภายนอก (H_{ex}) มีค่าเฉลี่ย 0.45 ± 0.06 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดที่แนะนำโดยคณะกรรมการวิทยาศาสตร์ขององค์การสหประชาชาติเกี่ยวกับผลของรังสีปรมาณู [5] จะเห็นว่าดินบริเวณสวนส้มโอพันธุ์ทับทิมสยาม อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช มีค่า กัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสี Ra-226, Th-232 และ K-40 ต่ำ และค่าดัชนีความเสี่ยงต่ำกว่าขีดจำกัดที่แนะนำโดยคณะกรรมการวิทยาศาสตร์ขององค์การสหประชาชาติเกี่ยวกับ ผลของรังสีปรมาณู [5] จึงสรุปได้ว่าดินในสวนส้มโอพันธุ์ทับทิมสยาม อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช มีการปนเปื้อนสารกัมมันตรังสีต่ำ และค่าดัชนีความเสี่ยงต่ำเช่นกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ในการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2567 ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในการรอบตัวอย่าง และเครื่องวัดรังสีแกมมา ชนิดเจอร์มานีเยมบริสุทธิ์สูง (HPGe) ขอขอบคุณนายธนาพันธ์ นาควารี ที่ช่วยทำเครื่องมือในการเก็บตัวอย่างดิน ขอขอบคุณนายสมชาย ราหมาด นายอุดม แท่นเนี่ยว นายศรัณย์ ศักร์ คงเจาะ และนางสาวพรกมล ตุดเกื้อ ที่ช่วยเก็บตัวอย่างดิน และขอขอบคุณเจ้าของสวน ส้มโอทับทิมสยาม ตำบลคลองน้อย และตำบล เกาะหวด อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้พื้นที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารเอกสารอ้างอิง

- [1] วิฑิตวิทย์ เกียรติเมธา, ชัชวาล แสงทองล้วน,กาญจนา พันธุ์เอี้ยว. กลยุทธ์การจัดการการตลาดส้มโอทับทิมสยามตามสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์จังหวัดนครศรีธรรมราช. วารสารสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยราชภัฏ มหาสารคาม. 2567;11(1):549-564.
- [2] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. สารสนเทศเศรษฐกิจการเกษตรรายสินค้ากรุงเทพมหานคร: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร; 2557.
- [3] สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับรังสี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร:กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและ นวัตกรรม; 2566.
- [4] Taskin H, Karavus M, Ay P, et al. Radionuclide concentrations in soil and Lifetime cancer risk due to gamma Radioactivity in Kirklareli, Turkey. Journal of Environmental Radioactivity. 2009;100(1):49-53.
- [5] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. New York: United

Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; 2000.

- [6] Lolila F, Mazunga MS. Measurements of Natural radioactivity and evaluation of Radiation hazard indices in soils around The Manyoni uranium deposit in Tanzania. Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 2023;16(1):100- 524.
- [7] Singh S, Rani A, Mahajan RK. ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K analysis in soil samples from some areas of Punjab and Himachal Pradesh, India using gamma ray spectrometry. Radiation Measurements. 2005;39:431-439.
- [8] Júnior JA, Araújo EE, Fernández ZH, et al. Measurement of natural radioactivity and radium equivalent activity for pottery making clay samples in Paraíba and Rio Grande do Norte – Brazil. Environmental Advances. 2021;6:100-121.
- [9] Agbalagba EO, Onoja RA. Evaluation of natural radioactivity in soil, sediment and water samples of Niger Delta (Biseni) flood plain lakes, Nigeria. Journal of Environmental Radioactivity. 2011;102(7) 667-671.
- [10] Absar N, Abedin J, Rahman MM, et al. Radionuclides Transfer from Soil to Tea Leaves and Estimation of Committed Effective Dose to the Bangladesh Populace. Life. 2021;11(282):1-15.
- [11] มาริษา มีนา, ศุภวุฒิ เบ็ญกุล, ประสงค์ เกษราธิคุณ. การประเมินค่ากัมมันตภาพรังสี ธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้นในตัวอย่างดิน บริเวณจังหวัดสตูล ประเทศไทย. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 2554;14(3):160-167.
- [12] ณัฐชยา จันทรวีไชย, อติพันธ์ เจ๊ะชู, และอัมตัม แลหะ. ปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสี ในดินบริเวณเหมืองแร่ทองคำเก่า ตำบล ภูเขาทอง อำเภอสุคิริน จังหวัดนราธิวาส. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์. 2559;8(3):121-128.
- [13] Nisar A, Suhaimi JM, Alsaffar MS. Natural radioactivity in virgin and agricultural soil and its environmental implications in Sungai Petani, Kedah, Malaysia. Pollution. 2015;1(3):305-313.
- [14] Leuangtakoun S, T.Phan GT, Duong TD, et al. Natural radioactivity measurement and radiological hazard evaluation in surface soils in a goldmining area and surrounding regions in Bolikhamxay province, Laos. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2020;326:997-1007.
- [15] Oge TO, Ozdemir FB, Oge M. Assessment of environmental Radioactivity in soil samples from

Bartın Province, Turkey. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2021;328:149-162.

[16] Office of Atoms for Peace (OAP). Annual Report in Thailand. Ministry of Science and Technology, Thailand. 2000

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำและการทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า

Heating efficiency comparison of induction heating and electric heater

วสวัตดี thingsborirak^{1*}, กระวี ตรีอำนรรค¹, และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค²

Wasawat Thingborirak^{1*}, Krawee Treeamnuk¹, and Tawarat Treeamnuk²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

²สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

¹School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000

²School of Agricultural Engineering, institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000

*Corresponding author Email: nop75072@gmail.com

Received: 22-10-2024 Revised: 2-04-2025 Accepted: 30-06-2025

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบผลิตลมร้อนด้วยการทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแก่กระบอกกลวงโลหะผิวเรียบผนังบาง ขนาดกำลัง 1,800 W เพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรหลังจากการเกี่ยวในอนาคต การทดลองเลือกใช้อัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบทำความร้อนในรูปของเลขเรย์โนลด์สในช่วง 6,000 7,000 และ 8,000 โดยศึกษาที่อุณหภูมิอากาศร้อนที่ต้องการ 3 ค่า คือ 50 60 และ 70 °C เปรียบเทียบกับการใช้ขดลวดความร้อนไฟฟ้าขนาด 1,000 W ผลพบว่าที่อุณหภูมิอากาศ 50 °C การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้เวลาน้อยกว่าการทำความร้อนขดลวดความร้อนไฟฟ้า 79.55-84.96% ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 66.13-70.96% มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่า 67.11-73.43% ที่อุณหภูมิของอากาศออก 60 °C การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้เวลาน้อยกว่าการทำความร้อนขดลวดความร้อนไฟฟ้า 71.30-72.24% ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 64.44-67.58% มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่า 50.42-53.77% และที่อุณหภูมิของอากาศออก 70 °C การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้เวลาน้อยกว่าการทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า 54.46-62.03% ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 59.43-64.31% มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่า 26.02-32.99% การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการเหนี่ยวนำซึ่งต่างจากการทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้าที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ

คำสำคัญ : การเหนี่ยวนำความร้อน การผลิตอากาศร้อน ขดลวดความร้อนไฟฟ้า ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

ABSTRACT

This research article studies, a hot air production system using electromagnetic induction heating for a thin-walled, smooth-surfaced hollow metal cylinder with an electric power of 1,800 W. It is expected that can be used as a heat source for drying agricultural products after harvesting in the future. In the experiment, the flow rate of air fed into the heating system was used in the form of Reynolds number in the range 6,000, 7,000, and 8,000. Four hot air temperatures were studied at 50, 60 and 70 °C and an induction heating was compared to 1,000 W electric heating. The results found that an outlet air temperature of 50 °C, an induction heating takes 79.55-84.96% less time than electric heating, consume 66.13-70.96% less power and, energy efficiency of more than 67.11-73.43%. An outlet air temperature of 60 °C, induction heating takes 71.30-72.24% less time than electric heating, consume 64.44-67.58% less power and, energy efficiency of more than 50.42-53.77%. An outlet air temperature of 70 °C, induction heating takes 54.46-62.03% less time than electric heating, consume 59.43-64.31% less power and, energy efficiency of more than 26.02-32.99%. The induction heating provides, the rising temperature rapidly at the first period of testing. This is different from an electric heater which has a slower temperature increasing.

Keywords: Induction heating, Hot air production, Electric heater, Energy efficiency

1 บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกสินค้าเกษตรที่สำคัญประเทศหนึ่งของโลก ประชากรส่วนใหญ่ของประเทศไทยประกอบอาชีพเกษตรกรรม การผลิตภาคเกษตรจึงมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศอย่างยิ่ง การวิจัยและพัฒนาเพื่อนำนวัตกรรม เทคโนโลยี และองค์ความรู้ใหม่ ๆ มาผนวกใช้จึงมีความสำคัญ และมีส่วนช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์เกษตรมีคุณภาพดียิ่งขึ้น ซึ่งการอบแห้งเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ใช้ในการลดความชื้นของผลผลิต เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรือการทำงานของเอนไซม์เพื่อยืดอายุการจัดเก็บ นอกจากนี้การอบแห้งยังถูกใช้เพื่อแปรรูปผลิตผลอีกด้วย ปัจจุบันแหล่งพลังงานความร้อนที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการอบแห้งผลผลิตเกษตรและอาหารได้มาจากขดลวดความร้อนไฟฟ้า แก๊สหุงต้ม น้ำมันเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตาม แหล่งพลังงานความร้อนเหล่านี้คิดเป็นต้นทุนที่สูงในกระบวนการอบแห้ง เพื่อลดต้นทุนของกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนจึงเกิดแนวคิดในการนำแหล่งพลังงานความร้อนอื่นมาใช้

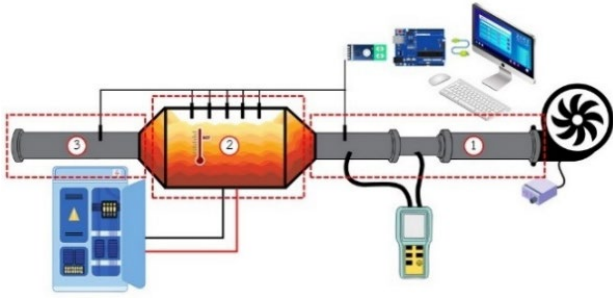
การเหนี่ยวนำความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นแหล่งพลังงานความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง [1] ประหยัดพลังงานทำความร้อนรวดเร็วและสม่ำเสมอ [2-3] ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสำหรับการให้ความร้อนแก่วัตถุจำพวกโลหะหรือเฟอร์โรแมกเนติก [4] ในงานวิจัยการวิเคราะห์ทางความร้อนเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของกระบอกโลหะกลวงที่ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนที่ถูกเหนี่ยวนำในตำแหน่งความลึกต่าง ๆ จากผิวของชิ้นงาน พบว่าความหนาแน่นของกระแสที่ผิวโลหะมีค่าสูงมาก ในทางกลับกันที่ความลึกลงไปจากผิวของกระบอกโลหะความหนาแน่นของกระแสจะมีค่าน้อยมาก และลดลงเรื่อย ๆ ตามความลึกที่เพิ่มขึ้นจนแทบจะไม่มีค่าความหนาแน่นของกระแสเหลืออยู่เลย จึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำความร้อนขึ้นเฉพาะบริเวณผิวของกระบอกโลหะที่มีความหนาแน่นของกระแสที่สูง [5] โดยตำแหน่งที่ลึกลงไปจากผิวความร้อนเกิดที่ก้นชิ้นงานจากการนำความร้อนจากผิวด้านนอกลงสู่เนื้อโลหะ ดังนั้นการเลือกใช้กระบอกโลหะกลวงที่มีความหนาแน่นน้อย ๆ ในการเหนี่ยวนำความร้อนจะส่งผลดีกว่าทั้งในด้านของพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิวกระบอกโลหะกับอากาศ และการใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ต้องการก็จะเพิ่มเร็วขึ้น เวลาในการเหนี่ยวนำกระบอกโลหะให้เกิดความร้อนก็จะลดลงเนื่องจากไม่สิ้นเปลืองพลังงานจากการนำความร้อนเข้าสู่แกนกลางกระบอกโลหะ นอกจากนี้การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำให้มีรูปร่างที่เหมาะสมกับภาระเหนี่ยวนำ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำความร้อน และการกระจายตัวของอุณหภูมิได้อย่างมีนัยสำคัญ [6-7] จากการศึกษาเชิงทดลองและการจำลองตัวเลขระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำแบบพิทซ์เท่ากัน พิตซ์แปรผัน และรัศมีแปรผัน ต่อประสิทธิภาพการทำความร้อนและการกระจายตัวของอุณหภูมิพบว่า เมื่อพิจารณาที่ผิวนอกสุดของชิ้นงานที่เหนี่ยวนำด้วยขดลวดพิทซ์เท่ากันจะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอมากกว่า พิตซ์แปรผัน และรัศมีแปรผัน ซึ่งผลที่

ได้จากการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ [8] และการใช้ขดลวดทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำหลายชุดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำความร้อน และการกระจายตัวของอุณหภูมิที่วัสดุได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ขดลวดทำความร้อนเหนี่ยวนำเพียงชุดเดียว [9] เช่นเดียวกับการเพิ่มขดลวดเหนี่ยวนำการใช้วงจรภาคกำลังเพียงหนึ่งชุดต่อขดลวดเหนี่ยวนำหนึ่งชุด สามารถเพิ่มพื้นที่การให้ความร้อนได้ แต่ก็สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้นด้วย [10]

งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนแก่กระบอกโลหะกลวงบางเปรียบเทียบกับทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้าแบบที่ใช้ในปัจจุบัน เพื่อผลิตอากาศร้อนภายใต้การไหลของอากาศแบบปั่นป่วนในชุดทดลองที่สร้างขึ้น เพื่อช่วยเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนให้ดีขึ้น โดยใช้เลขเรย์โนลด์ส หรือสัดส่วนของแรงเฉื่อย ต่อ แรงเนื่องจากความหนืดเป็นตัวแปรไร้มิติที่บอกสภาพปรากฏการณ์การไหลของของไหล [11-12] ทำการศึกษาเวลา กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตอากาศร้อนตามอุณหภูมิที่ต้องการ และประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในการผลิตอากาศร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ในอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

ชุดทดสอบมีส่วนประกอบต่าง ๆ ที่สำคัญ ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนของอากาศเข้า (Inlet section, หมายเลข 1) จะใช้พัดลม (Blower) ขนาด 370 W เป่าอากาศให้เคลื่อนที่เข้าไปตามท่อยาว 600 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 57 mm เข้าสู่ห้องทำความร้อน (Heating section, หมายเลข 2) ที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม ยาว 300 mm กว้าง 200 mm และสูง 200 mm โดยกำหนดอัตราการไหลในเทอมของเลขเรย์โนลด์ส 6,000 7,000 และ 8,000 วัดความดันของอากาศขาเข้าด้วย Digital Manometer (ยี่ห้อ AUTOOL) เพื่อคำนวณหาความเร็วของอากาศขาเข้า และปรับความเร็วรอบของพัดลมด้วยอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ได้อัตราการไหลและความเร็วของอากาศ ซึ่งเมื่อคำนวณด้วยสมการ (1) แล้วได้ค่าเรย์โนลด์สตามที่กำหนด อากาศนี้จะไหลผ่านเข้าสู่ชุดทำความร้อน 2 รูปแบบ ที่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ CKC tinner รุ่น PID REX-C 100) ลมร้อนจะไหลออกผ่านท่อส่วนสุดท้าย (Outlet section, หมายเลข 3) ที่มีความยาว 300 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 57 mm ซึ่งใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermocouple type K ร่วมกับ MAX6675 Sensor module) ทั้งหมด 7 จุด แบ่งเป็นวัดอุณหภูมิขาเข้าและออกอย่างละ 1 จุด และอีก 5 จุดวัดอุณหภูมิที่ห้องทำความร้อน ติดตั้งโดยเว้นระยะห่างเท่ากันทุก 50 mm ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของห้องทำความร้อน ซึ่งค่าของอุณหภูมิจะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ทุก ๆ วินาทีของการทำอุณหภูมิอากาศร้อนในช่วงที่ต้องการคือ 50 60 และ 70 °C และบันทึกค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วย Power meter (ยี่ห้อ Intertek) ตลอดการทดลอง โดยชุดทำความร้อน 2 รูปแบบ ได้แก่



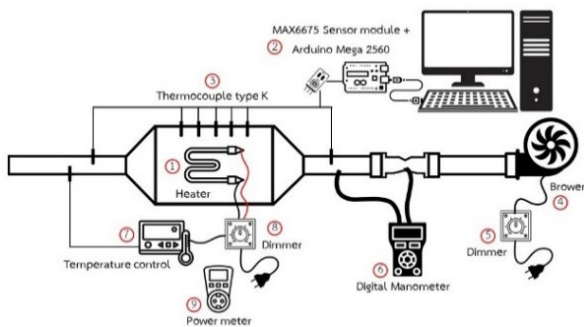
ภาพที่ 1 แผนภาพชุดทดสอบผลิตลมร้อน

2.1 ชุดทำความร้อนแบบขดลวดความร้อนไฟฟ้า (ภาพที่ 2 ก)

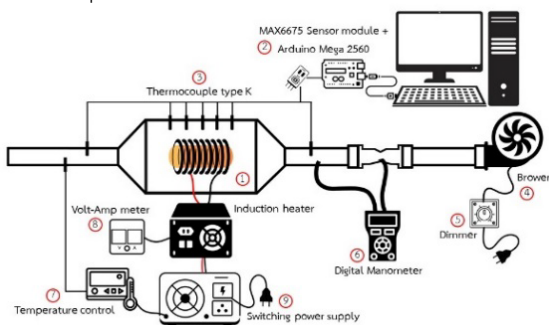
ทำความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อนไฟฟ้า 230 โวลต์ ขนาด 1,000 วัตต์ คัดด้วย ยาว 21 มิลลิเมตร (ภาพที่ 3 ก)

2.2 ชุดทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (ภาพที่ 2 ข)

ทำความร้อนโดยใช้บอร์ดโมดูลเหนี่ยวนำความร้อนสำเร็จรูป (ZVS) ซึ่งเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพูลบริดจ์ (ภาพที่ 3 ข) เพื่อควบคุมเครื่องทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ขนาดแรงดัน 24 V 40 A แกะกระบอกโลหะผิวเรียบกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 mm หนา 1.2 mm ซึ่งวางไว้ตำแหน่งกึ่งกลางตามแนวแกนของขดลวดที่ทำจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4 mm หนา 1 mm ขดเป็นเกลียววงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 mm จำนวน 10 รอบ โดยมีระยะพิทช์ของเกลียวขดลวด 10 mm ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสม อุณหภูมิของภาระเหนี่ยวนำที่ถูกให้ความร้อนเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ [7]



(ก) ระบบชุดทดสอบทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า



(ข) ระบบชุดทดสอบทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ

ภาพที่ 2 แผนภาพระบบชุดทดสอบผลิตลมร้อน



(ก) ขดลวดความร้อนไฟฟ้า



(ข) บอร์ดโมดูลเหนี่ยวนำความร้อน (ZVS)

ภาพที่ 3 อุปกรณ์ทำความร้อน

ค่าเลขเรย์โนลด์สที่แสดงอยู่ในรูปเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (D_h) ดังแสดงในสมการที่ 1 [13]

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

U คือ ความเร็วของของไหล (m/s)

D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าท่อ (m)

μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล (kg/m.s)

เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของท่อสี่เหลี่ยม หาได้จากสมการที่ 2 [13]

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ (m^2)

P คือ เส้นรอบวงท่อโมเมนต์ (m)

ประเมินสมรรถนะการทำความร้อนของชุดทดสอบทั้ง 2 รูปแบบจากเวลาที่ใช้ในการทำให้อากาศร้อนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ และประสิทธิภาพการใช้พลังงานตามสมการที่ 3

$$\text{Efficiency (\%)} = \frac{\dot{Q}_{\text{conv}}}{VI} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ $\dot{Q}_{\text{conv}} = \dot{m}C_p(T_o - T_i)$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลอากาศ (kg/s)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kg°C)

T_o คือ อุณหภูมิที่ทางออก (°C)

T_i คือ อุณหภูมิที่ทางเข้า (°C)

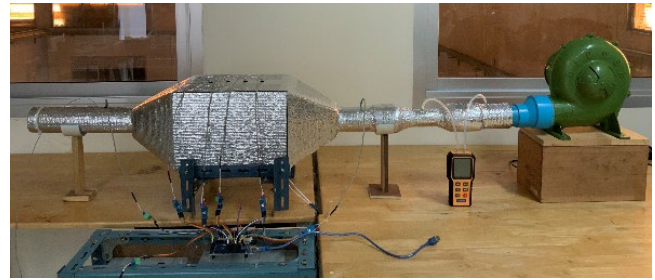
V คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V)

I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

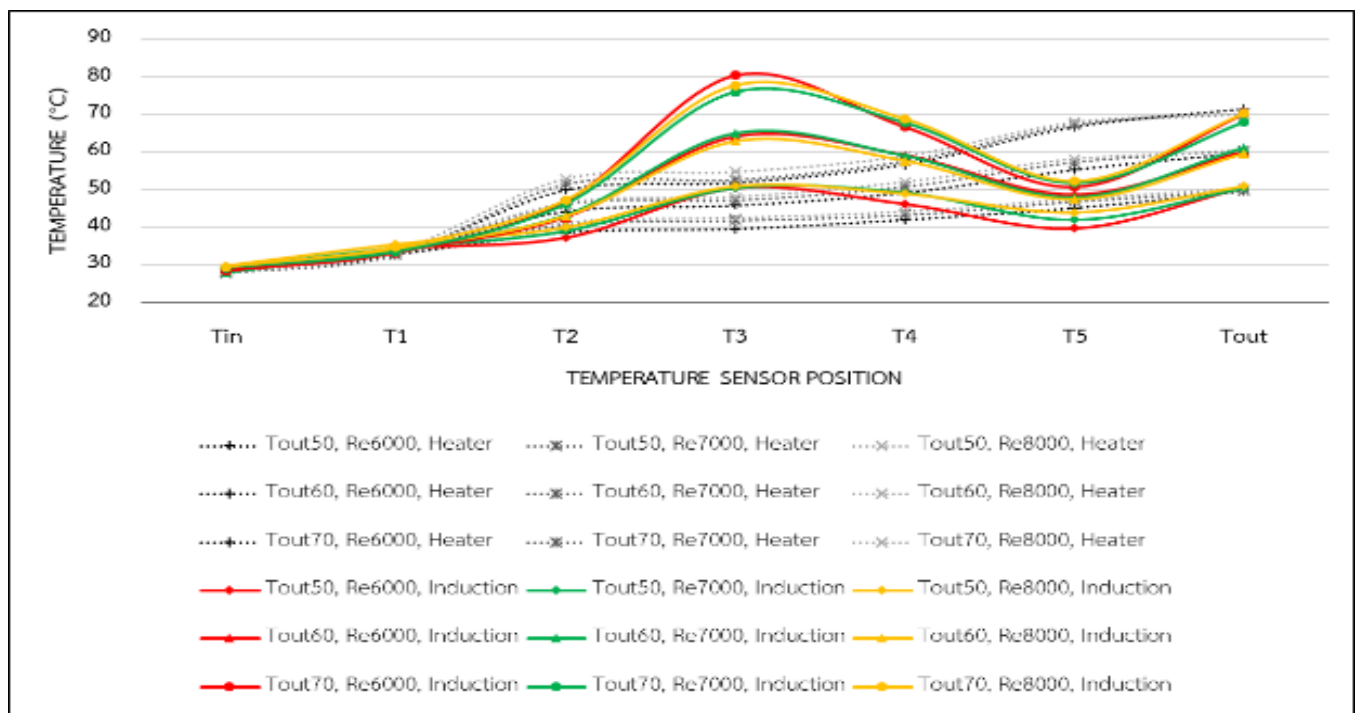
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 พฤติกรรมการทำความร้อน

การผลิตความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้าและการทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เป็นการใช้ลมเป่าผ่านอุปกรณ์ทำความร้อนทั้ง 2 ชนิดโดยตรง ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งการทำความร้อนลักษณะดังกล่าว อากาศร้อนที่ได้นั้นเกิดจากการพาความร้อนโดยส่วนใหญ่ [14] จึงได้ทำการวัดอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อดูพฤติกรรมการทำความร้อน ได้ผลดังแสดงใน ภาพที่ 5



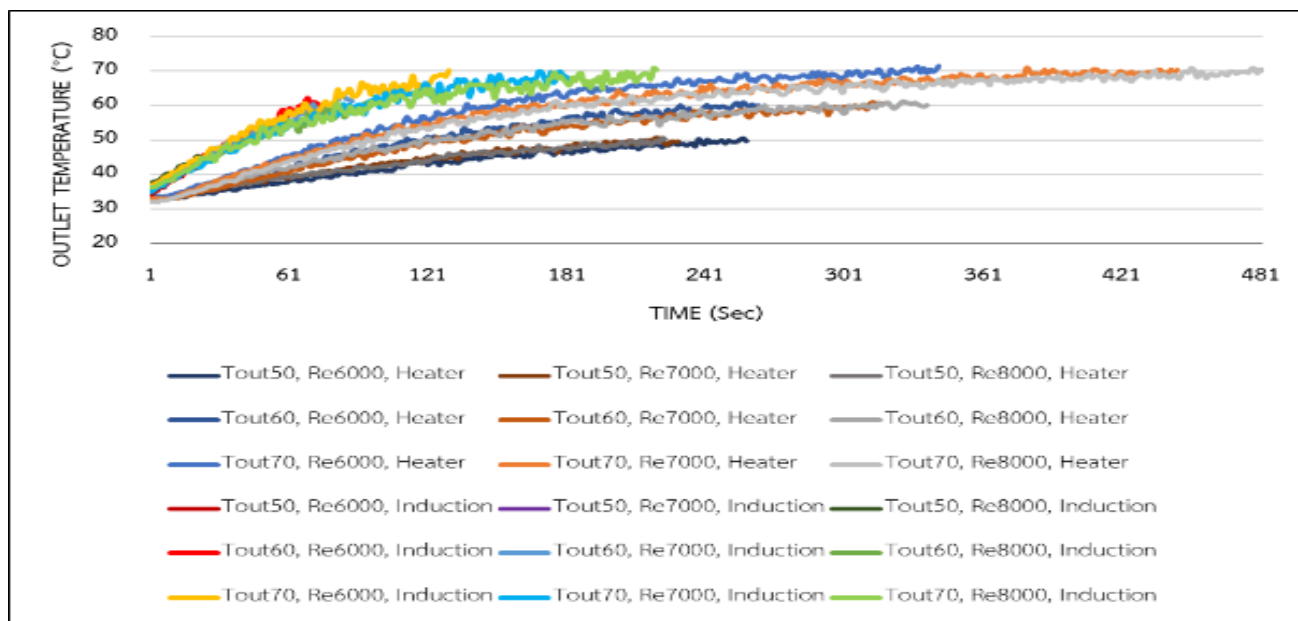
ภาพที่ 4 ชุดทดสอบผลิตความร้อน



ภาพที่ 5 แสดงอุณหภูมิของชุดทำความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ

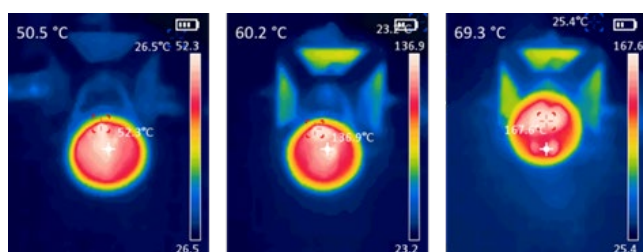
อุปกรณ์ทำความร้อนทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะการทำความร้อนที่เฉพาะและแตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิของอากาศขาเข้าใกล้เคียงกัน ที่อุณหภูมิอากาศร้อนเดียวกัน พบว่าการผลิตอากาศร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้าอุณหภูมิของอากาศจะสูงที่ตำแหน่งส่วนปลายของขดลวดความร้อนไฟฟ้า ส่วนการผลิตอากาศร้อนด้วยการ

ทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ อุณหภูมิของอากาศจะสูงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของกระบอกโลหะกลวงที่ถูกเหนี่ยวนำ เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กจะคล้อยผ่านภายในขดลวดช่วงที่พันรอบกระบอกโลหะมากที่สุด ซึ่งจะให้อัตราการแผ่ความร้อนในชิ้นงานมากที่สุด [5]

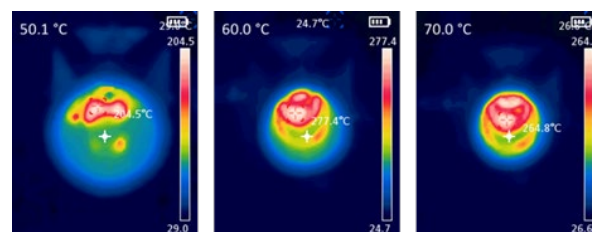


ภาพที่ 6 แสดงอุณหภูมิขาออกของชุดทำความร้อน

จากข้อมูลอุณหภูมิของอากาศในระหว่างการผลิตอากาศร้อนที่ต้องการ 50 60 และ 70 °C ด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า และการเหนี่ยวนำความร้อนภายในชุดทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 6 พบว่าการผลิตอากาศร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้าอุณหภูมิของอากาศขาออกจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอมากกว่า การทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ดังแสดงในภาพที่ 7 และ 8 อย่างไรก็ตาม การผลิตอากาศร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความร้อน อุณหภูมิของอากาศที่ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่วินาทีแรกจนถึงช่วงของอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ต้องการ ด้วยเหตุผลนี้เองที่ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิที่ได้ค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการทดสอบถึงช่วงเวลาที่ใช้ในการผลิตอากาศร้อนที่ต้องการเท่านั้น แต่ในการนำไปประยุกต์กับการอบแห้งจริงนั้น ช่วงเวลาที่ใช้นานขึ้นทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในห้องทำความร้อน อุณหภูมิของอากาศขาออกก็จะสม่ำเสมอเช่นเดียวกับการใช้ขดลวดความร้อนไฟฟ้า



ภาพที่ 7 ภาพถ่ายความร้อนของชุดทำความร้อนแบบขดลวดไฟฟ้าที่เรย์โนลด์ 6,000



ภาพที่ 8 ภาพถ่ายความร้อนของชุดทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่เรย์โนลด์ 6,000

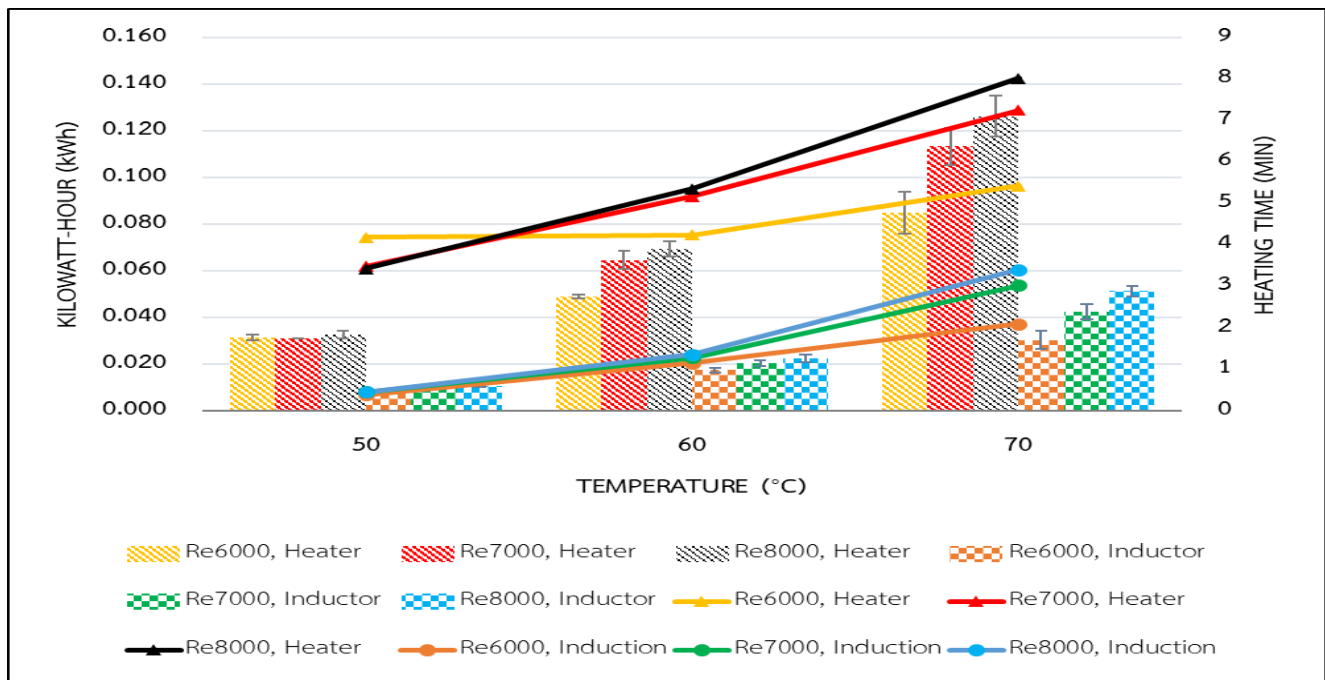
3.2 สมรรถนะการทำความร้อน

ระยะเวลาในการทำความร้อนเพื่อให้ได้อุณหภูมิของอากาศร้อน 50 60 และ 70 °C ในช่วงเรย์โนลด์ส 6,000 7,000 และ 8,000 พบว่าขดลวดความร้อนไฟฟ้าใช้เวลาเฉลี่ย 3.43-4.19 นาที, 4.24-5.36 นาที และ 5.42-8.02 นาที ตามลำดับ ส่วนการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้เวลาเฉลี่ย 0.39-0.46 นาที, 1.15-1.36 นาที และ 2.10-3.40 นาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบเวลาในการทำความร้อนเพื่อให้ได้อุณหภูมิของอากาศร้อน 50 60 และ 70 °C การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้เวลาน้อยกว่า การทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า 79.55-84.96%, 71.30-72.24% และ 54.46-62.03% ตามลำดับ โดยการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการเหนี่ยวนำซึ่งต่างจากการทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้าที่อุณหภูมิค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ

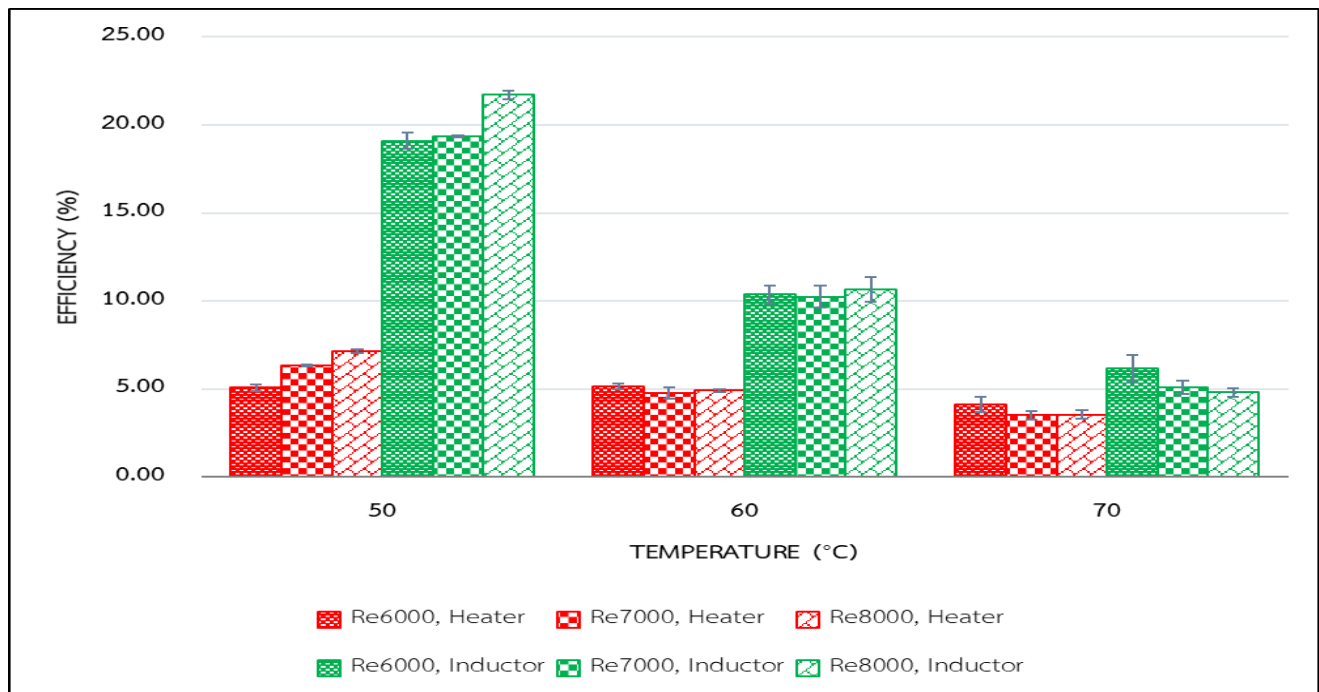
ส่วนการใช้กำลังไฟฟ้าในการทำความร้อนสอดคล้องกับระยะเวลาในการทำความร้อน โดยที่อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ต้องการ 50 60 และ 70 °C ในช่วงเรย์โนลด์ส 6,000 7,000 และ 8,000 ขดลวดความร้อนไฟฟ้าใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.031-0.033 kWh, 0.049-0.069 kWh และ 0.085-0.126 kWh ตามลำดับ การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.009-

0.011 kWh, 0.017-0.022 kWh และ 0.030-0.051 kWh ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำความร้อนภายใต้ อุณหภูมิที่ต้องการดังกล่าวการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้ กำลังไฟฟ้าน้อยกว่าการทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า

66.13-70.96%, 64.44-67.58% และ 59.43-64.31% ตามลำดับ ดังแสดงใน ภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงเวลา และการใช้กำลังไฟฟ้าของชุดทำความร้อน



ภาพที่ 10 แสดงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของชุดทำความร้อน

ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการทำความร้อนเพื่อให้ ได้อุณหภูมิของอากาศร้อน 50 60 และ 70 °C ในช่วงเรย์โนลด์ส์

6,000 7,000 และ 8,000 พบว่าขดลวดความร้อนไฟฟ้ามี ประสิทธิภาพ 5.07-7.14%, 4.76-5.14% และ 3.51-4.13%

ตามลำดับ ส่วนการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพ 19.09-21.71%, 10.24-10.67% และ 4.80-6.17% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 10 และเมื่อเปรียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานภายใต้อุณหภูมิที่ต้องการดังกล่าวการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพมากกว่าขดลวดความร้อนไฟฟ้า 67.11-73.43%, 50.42-53.77% และ 26.02-32.99% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 10

เวลา การใช้กำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพในการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำกับการใช้ขดลวดความร้อนไฟฟ้ามีความแตกต่างกันมาก เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขของการทดสอบเดียวกัน คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ต้องการและช่วงเรย์โนลด์ส์เดียวกัน พบว่าทุกเงื่อนไขของการทดสอบ การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้ระยะเวลา และกำลังไฟฟ้าในการทำความร้อนน้อยกว่าขดลวดความร้อนไฟฟ้าเกิน 50% ในทุกกรณี จะมีความแตกต่างกันมากในช่วงเริ่มต้นของการทำความร้อน สอดคล้องกับผลการศึกษาค่าสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งใบมะกรูด พบว่าการใช้ขดลวดความร้อนไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูงที่สุด [15] และนอกจากนี้การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่าขดลวดความร้อนไฟฟ้าในทุกเงื่อนไขของการทดสอบเช่นกัน โดยมีประสิทธิภาพสูงขึ้นตามอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ต้องการลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำใช้เวลาและกำลังไฟฟ้าน้อยก็ได้อุณหภูมิของอากาศที่ต้องการ ส่วนที่อุณหภูมิสูงขึ้นต้องใช้เวลามากขึ้นแต่อุณหภูมิกลับค่อยเพิ่มอย่างช้า ๆ อีกทั้งการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำยังเกิดการสูญเสียพลังงานจากการนำความร้อนจากผิวภาระเหนี่ยวนำสู่ความลึกจากผิว และจากบริเวณที่ภาระเหนี่ยวนำถูกเหนี่ยวนำโดยตรงด้วยอิทธิพลของกระแสไหลวน และความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ในวงของขดลวดเหนี่ยวนำ ไปยังบริเวณด้านข้างของภาระเหนี่ยวนำที่ไม่ได้อยู่ในวงของขดลวดเหนี่ยวนำ อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดสอบส่งผลในเชิงบวกต่อการผลิตอากาศร้อนด้วยการทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ แสดงให้เห็นถึงข้อดีทั้งในด้านของการประหยัดพลังงาน ทำความร้อนได้รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขดลวดความร้อนไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมและเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการหาแหล่งพลังงานความร้อนที่ประหยัดพลังงานงานเพื่อนำไปใช้ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรหลังจากการเก็บเกี่ยวต่อไป โดยในอนาคตผู้ศึกษามีแนวทางในการปรับปรุงชุดทดสอบเพื่อให้สามารถศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วของลมป้อนเข้าที่ส่งผลต่อพฤติกรรมและความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้อย่างถูกต้องและเที่ยงตรงมากขึ้น เนื่องจากในปัจจุบันชุดทดลองที่ใช้นั้นมีห้องทำความร้อนขนาดใหญ่เกินไปเมื่อเทียบกับขนาดของขดลวดและภาระเหนี่ยวนำ จึงมีความเป็นไปได้ที่อากาศป้อนเข้านั้นไม่ได้ผ่านขดลวดหรือภาระเหนี่ยวนำทั้งหมด เพิ่มสมรรถนะของการทำความร้อนด้วยการลดการสูญเสียพลังงาน โดยการเพิ่มจำนวนของขดลวดให้มีความยาวเทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับความยาวของภาระเหนี่ยวนำลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำให้มีระยะห่างจาก

ภาระเหนี่ยวนำน้อยที่สุด เพื่อให้ผิวข้างของภาระเหนี่ยวนำอยู่ในบริเวณที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กสูง [16-17] ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ รูปแบบหรือรูปทรงของภาระเหนี่ยวนำอื่น ๆ ที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่ากระบอกโลหะผิวเรียบกลวง ทั้งยังสามารถสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบ หรือใช้ Machine Learning ทำนายช่วงของการทดสอบอื่น ๆ การจัดการข้อมูล การเก็บข้อมูล และการจัดตารางงาน เป็นต้น

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและเปรียบเทียบการผลิตลมร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า และการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ พบว่าการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้เวลา และกำลังไฟฟ้าในการทำความร้อนน้อยกว่าขดลวดความร้อนไฟฟ้า และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่าขดลวดความร้อนไฟฟ้า ซึ่งตอบปัญหาในประเด็นที่ต้องการจัดหาแหล่งพลังงานต้นทุนต่ำมาใช้ในกระบวนการผลิตลมร้อนเพื่ออบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากต้นทุนหลักในการอบแห้งนั้นมาจากแหล่งพลังงานความร้อนที่ใช้ในระบบ หากการใช้ระบบเหนี่ยวนำความร้อนเป็นการลดต้นทุนดังกล่าวก็จะเกิดแนวทางในการนำระบบเหนี่ยวนำไปประยุกต์ใช้จริงให้เกิดผลประโยชน์เป็นที่ประจักษ์ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUT) ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Zinn S, Semiatin SL. Elements of Induction Heating: Design Control and Applications. n.p.: ASM International; 1988.
- [2] จีระพงศ์ ศรีวิชัย, คมกฤษณ์ ศรีสุวรรณ. กรณีศึกษาการอบแห้งลมร้อนด้วยวิธีความร้อนเหนี่ยวนำ. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. 2558;24:16-26.
- [3] นพฤทธิ์ พรหมลิ่ง. การควบคุมอุณหภูมิในตู้อบสับปะรดปัตตาเวียด้วยการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต]. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2565.
- [4] Vázquez Ruiz, E. Analysis and Application of Maxwell's Equation for Induction Heating. Mechanical Engineering. 2013.
- [5] Jang, J.Y, Y.W Chiu. Numerical and experimental thermal analysis for a metallic hollow cylinder subjected to step-wise electro-magnetic induction heating. Applied thermal engineering. 2007;27:1883-1894.
- [6] Han Y, Wen H, Yu E. Study on electromagnetic heating process of heavy-duty sprockets with

- circular coils and profile coils. *Applied Thermal Engineering*. 2016;24:861-868.
- [7] Tharmapalan, E., Sivalingam, S., Seyyaf, et al. Performance Improvement of Industrial Induction Mould Heating Oven. In: 2020 Engineering Research Conference (MERCon): IEEE; 2020. P. 602-607.
- [8] Song K, Guan J, Li K, et al. Experimental and numerical study of the effect of coil structure on induction nitriding temperature field. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020;12:1-14.
- [9] Shih SY, Nian SC, Huang MS. Comparison between single-and multiple-zone induction heating of largely curved mold surfaces. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016;75:24-35.
- [10] Fujita H, Uchida N, Ozaki K. Zone controlled induction heating (ZCIH) A new concept in induction heating. In: 2007 Power Conversion Conference-Nagoya: IEEE; 2007. P. 1498-1504.
- [11] พิตตินันท์ สอนขาวไร่เงิน, ขวัญจิต วงษ์ขารี, สมิต์ เอี่ยมสะอาด และคณะ. การถ่ายเทความร้อนและความดันสูญเสียในท่อกลมด้วยแผ่นบิดสั้นหลายช่องการไหล. ใน: ทะนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, บรรณาธิการ. งานประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 21; 10-11 มีนาคม 2565; โรงแรมวินทรี ซิตี้ รีสอร์ท. เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2565. หน้า. 196-200.
- [12] Man C, Lv X, Hu J, et al. Experimental study on effect of heat transfer enhancement for single-phase forced convective flow with twisted tape inserts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;106:877-883.
- [13] เกษรา ศรีขำนิ, พิชิต แก้วโกสม, อาณัติ พิลลา. การประเมินสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนชนิดแผ่นกั้นเอียงรูปตัวดัดเบิ้ลยู. ใน: ทะนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, บรรณาธิการ. งานประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 21; 10-11 มีนาคม 2565; โรงแรมวินทรี ซิตี้ รีสอร์ท. เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2565. หน้า. 180-187.
- [14] อนุสรณ์ สุขเกษม. การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบทรงทรงกระบอก [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. นครนายก: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2550.
- [15] ปุณยาพร แสนแปง. ผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์และผสมผสาน ต่อคุณภาพของใบมะกรูดและความสิ้นเปลืองพลังงาน [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้; 2564.
- [16] Shuang, W. Design and Optimization of Electromagnetic Induction Device based on Finite Element Analysis. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023;2546:012005.
- [17] Al-Jrew, Aws H., Jawad R., et al. Analysis and design of the induction heating load using finite element method. *AIP Conference Proceedings*. 2024;(1):3229

การทดสอบประสิทธิภาพของชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการ

Performance testing of the electric tow truck for wheelchairs

อำพล พิชัยเชิด¹, ทักษณัย สุภารส¹, พนัสชัย ศรีบำรุง², วิโรจน์ เลิศธีระชาญชัย², สุระศักดิ์ ศรีปาน³, เกียรติศักดิ์ ใจโต^{3*}
Aumpol Pichaicherd¹, Takdanai Suparos¹, Panuschai Sribumrung², Wirote Lerttheerachanchai², Surasak Sripan³,
Kiattisak Jaito^{3*},

¹สาขาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

²สาขาวิชาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

³สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

¹Department of Mechanical Technology Faculty of Technical Education Rajamangala University of
Technology Krungthep Bangkok Thailand

²Department of Modern Automotive Technology Faculty of Technical Education Rajamangala University of
Technology Krungthep Bangkok Thailand

³Department of Mechanical Engineering Faculty of Technical Education Rajamangala University of
Technology Krungthep Bangkok Thailand

*Corresponding author. Email: kiattisak.j@mail.rmuk.ac.th

Received: 27-10-2024 Revised: 25-05-2024 Accepted: 30-06-2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการที่พัฒนาขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วยรถเข็นคนพิการ ระบบขับเคลื่อนชุดหัวลากไฟฟ้ามอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 350 วัตต์ ชุดแบตเตอรี่ 48 โวลต์ 30 แอมแปร์-ชั่วโมง ทดสอบประสิทธิภาพของชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการโดยทดสอบความเร็วการเคลื่อนที่ 3 ระดับ ทดสอบระยะเบรก ทดสอบการใช้งานของพลังงานต่อการชาร์จแบตเตอรี่ และสำรวจการใช้งานจริงของผู้พิการ ผลการทดสอบพบว่า ชุดหัวลากไฟฟ้าสามารถลากน้ำหนักบรรทุกได้ไม่เกิน 100 กิโลกรัม มีความเร็วที่ 4.96 5.40 และ 6.04 เมตรต่อวินาที ระยะเบรก 2.1 เมตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของระยะเบรก สามารถเคลื่อนที่ได้ระยะทางเฉลี่ยที่ 64.11 กิโลเมตร ใช้เวลาในการเคลื่อนที่เฉลี่ยอยู่ที่ 310 นาที ความเร็วเฉลี่ยของการใช้งานต่อเนื่องอยู่ที่ 3.49 เมตรต่อวินาที ผลสำรวจการใช้งานชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการของผู้พิการความเร็วใช้งานอยู่ที่ 1-4 เมตรต่อวินาที ผลสำรวจความพึงพอใจของผู้พิการจำนวน 3 ท่าน ผลประเมินอยู่ในเกณฑ์ดี ความพอใจโดยรวมเป็นที่น่าพอใจ ผู้พิการสามารถนำชุดหัวลากไฟฟ้าไปใช้ในชีวิตรประจำวันได้ เป็นอุปกรณ์ช่วยอำนวยความสะดวกให้ผู้พิการและเพิ่มประสิทธิภาพการเดินทางได้มากขึ้น ช่วยประหยัดเวลาเพิ่มระยะทางในการเดินทางและลดการใช้แรงหรือคนเข็นรถเข็นได้

คำสำคัญ : ชุดหัวลากไฟฟ้า, การทดสอบประสิทธิภาพ

ABSTRACT

This research aims to evaluate the performance of a newly developed electric tow truck for wheelchairs. The wheelchair consists of a manual wheelchair, an electric tow truck with a 350 watt motor, and a 48 volt 30 ampere-hour battery. Performance tests were conducted, including speed tests at three different levels, braking distance tests, battery life tests, and a user survey. Results The electric tow truck for wheelchairs can carry a load of up to 100 kg and achieve speeds of 4.96, 5.40 and 6.04 m/s. The braking distance of 2.1 meters meets the standard requirements. The electric tow truck for wheelchairs can travel an average distance of 64.11 kilometers with an average speed of 3.49 meters per second and an average usage time of 310 minutes. A user survey of three individuals revealed a preferred speed range of 1-4 meters per second and a high level of satisfaction with the device. Conclusion the electric tow truck for wheelchairs has proven to be an effective tool for individuals with disabilities. It offers increased mobility, speed, and range, while reducing the need for physical exertion. The device can significantly improve the quality of life for wheelchair users.

Keywords: Electric tow truck, performance testi

1. บทนำ

ปัญหาความพิการทางร่างกายเป็นประเด็นสำคัญที่สังคมไทยให้ความสนใจ โดยเฉพาะผู้พิการทางการเคลื่อนไหวซึ่งมีจำนวนมากและต้องการอุปกรณ์อำนวยความสะดวกในการดำเนินชีวิตประจำวัน รถเข็นผู้พิการจึงเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นอย่างยิ่งในการช่วยให้ผู้พิการกลุ่มนี้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและเข้าถึงโอกาสต่าง ๆ ในสังคมได้มากขึ้น จากข้อมูลของกรมส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ สถิติข้อมูลคนพิการที่มีบัตรประจำตัวคนพิการ ณ วันที่ 31 มกราคม 2567 พบว่ามีผู้พิการทางการเคลื่อนไหวหรือทางร่างกายสูงถึง 1,178,148 คน คิดเป็น 51.81% ของผู้พิการทั้งหมด [1] ดังนั้น รถเข็นคนพิการสำหรับผู้พิการทางการเคลื่อนไหวจึงได้รับความสนใจในการนำมาใช้อำนวยความสะดวกให้แก่ผู้พิการ อย่างแพร่หลาย นอกจากนี้ ผู้สูงอายุก็เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่มีความต้องการใช้รถเข็นผู้พิการ เช่นเดียวกัน เนื่องจากข้อจำกัดทางร่างกายที่มากขึ้นตามอายุ ทำให้การเคลื่อนไหวเป็นไปอย่างยากลำบาก รถเข็นซึ่งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานทางการแพทย์ที่ใช้กันทั่วไป จึงมีบทบาทสำคัญในการช่วยเสริมสร้างความสามารถในการเดินทางและดำเนินกิจกรรมในชีวิตประจำวัน ของทั้งผู้สูงอายุและผู้พิการ [2] จากข้อมูลกรมกิจการผู้สูงอายุ ข้อมูล ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2566 พบว่ามีผู้สูงอายุคิดเป็นร้อยละ 20.08 ของประชากร จำนวน 13,064,929 คน [3] ดังนั้นรถเข็นผู้พิการจึงมีความมีความต้องการในการใช้ประโยชน์ที่หลากหลายของผู้ใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นผู้พิการที่มีความบกพร่องทางร่างกาย หรือผู้สูงอายุที่มีความแข็งแรงไม่เท่ากัน รถเข็นผู้พิการแบบเดิมมักมีข้อจำกัดในการใช้งาน เช่น ต้องอาศัยกำลังแขนในการขับเคลื่อน ซึ่งอาจทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกเมื่อยล้า หรือไม่สามารถใช้งานได้ในกรณีที่ผู้ใช้งานมีปัญหาที่กล้ามเนื้อแขน การพัฒนารถเข็นผู้พิการให้มีประสิทธิภาพและใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อช่วยให้ผู้พิการและผู้สูงอายุสามารถใช้ชีวิตได้อย่างมีคุณภาพและมีความสุขมากขึ้น รถเข็นที่ได้รับการออกแบบมาเป็นอย่างดีควรมีน้ำหนักเบา พับเก็บได้ง่าย และสามารถใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานที่แตกต่างกัน [4] ปัจจุบันมีผู้ใช้รถเข็นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง รถเข็นคนพิการจึงถูกเรียกตามกลุ่มผู้ใช้งาน เช่น รถเข็นคนพิการ รถเข็นผู้สูงอายุ รถเข็นผู้ป่วย หรือจำแนกตามลักษณะภายนอกและวัตถุประสงค์การใช้งาน เช่น เก้าอี้รถเข็น รถเข็นเดินทาง รถนั่งอาบน้ำ เป็นต้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความหลากหลายของความต้องการในการใช้งานอุปกรณ์ประเภทนี้ การออกแบบและพัฒนากระแสสำหรับรถวีลแชร์ จึงมีความสำคัญในการตอบสนองต่อรูปแบบการใช้งานที่แตกต่างกันของผู้พิการทางการเคลื่อนไหว โดยผลการประเมินพบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในระดับมากถึงมากที่สุด [5] นอกจากนี้ การใช้รถเข็นยังได้รับการอำนวยความสะดวกผ่านสัญลักษณ์รถนั่งคนพิการตามสถานที่ต่าง ๆ เช่น ห้างสรรพสินค้า สถานที่ท่องเที่ยว บิมน้ำมัน ขนส่งมวลชน และอื่น ๆ รถเข็นซึ่งมีลักษณะเป็นเก้าอี้ล้อ เป็นอุปกรณ์เคลื่อนย้ายที่ได้รับความนิยมลำดับต้น ๆ ของผู้พิการและกลุ่มผู้สูงอายุที่มีข้อจำกัดทางการ

เคลื่อนไหว กล่าวได้ว่า มีบุคคลทั่วไป เด็ก ผู้ใหญ่ และผู้สูงอายุ ที่มีข้อจำกัดในการเดินทางและได้รับประโยชน์จากการใช้งานรถนั่งคนพิการ ซึ่งมีกลุ่มผู้ใช้งานหลากหลาย ทั้งนี้ การใช้งานรถเข็นยังคงต้องอาศัยกำลังจากแขนทั้งสองข้าง หรือการช่วยเหลือจากบุคคลอื่นในการขับเคลื่อนการช่วยเข็นเพื่อเคลื่อนที่ ซึ่งส่งผลให้เกิดความเมื่อยล้าและปวดแขน และยังเป็นข้อจำกัดของผู้พิการหรือผู้ป่วยที่มีปัญหาลำตัวส่วนบนไม่แข็งแรง จึงไม่สามารถใช้งานรถเข็นแบบใช้กำลังแขนทั้งสองข้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดความไม่สะดวกต่อการทำกิจกรรมต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีการพัฒนารถสามล้อไฟฟ้าสำหรับผู้พิการทางขา โดยจากการทดสอบวิ่งต่อการประจวบเตอรืหนึ่งครั้งบนถนนลาดยางพบว่าสามารถวิ่งได้ระยะทางเฉลี่ย 20.05 กิโลเมตร ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่ารถต้นแบบดังกล่าวมีศักยภาพในการตอบสนองต่อการใช้งานในชีวิตประจำวันได้อย่างเหมาะสม [6] ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดพัฒนารถเข็นผู้พิการที่มีการใช้งานสะดวกสบายมากขึ้น สามารถถอดประกอบชิ้นส่วนที่ขับเคลื่อนได้ และใช้งานได้หลากหลายโอกาส หลายกลุ่มผู้ใช้งาน รถเข็นผู้พิการเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการช่วยให้ผู้พิการและผู้สูงอายุสามารถดำเนินชีวิตได้อย่างอิสระและมีคุณภาพ การพัฒนารถเข็นให้มีประสิทธิภาพและใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อสร้างสังคมที่เอื้อต่อการอยู่อาศัยของทุกคน

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

ในงานวิจัยนี้ใช้รถเข็น (Wheelchair) (ภาพที่ 1) เป็นรถเข็นยี่ห้อ SOMA รุ่น 105 น้ำหนักตัวรถเข็น 14.5 กิโลกรัม สามารถบรรทุกน้ำหนัก 100 กิโลกรัม วัสดุทำจากอลูมิเนียมสามารถพับได้



ภาพที่ 1 รถเข็น (Wheelchair)

หาต้นกำลังของมอเตอร์สำหรับรถเข็นไฟฟ้าเพื่อคนพิการทางการเดินทางจากสมการ [7]

$$P = T \times \omega \quad (1)$$

โดยที่ P คือกำลังไฟฟ้า วัตต์ (W)

T คือแรงบิด นิวตัน เมตร (N-m)

ω คืออัตราเร็วเชิงมุม เรเดียนต่อวินาที (rad/s)

จากการหาขนาดกำลังของมอเตอร์ในการขับเคลื่อนที่น้ำหนักรวม 120 กิโลกรัม ได้กำลังของมอเตอร์ 267.62 วัตต์ นำไปเลือกขนาดฮับมอเตอร์เพื่อเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อน โดยเลือกใช้ขนาดฮับมอเตอร์ 350 วัตต์ 48 โวลต์ จากนั้นนำไปเลือกขนาดของแบตเตอรี่ โดยคำนวณจากสมการ

$$E = Pt \quad (2)$$

$$P = IV$$

$$\text{ดังนั้น } E = IVt \quad (3)$$

โดยที่ E คือพลังงานไฟฟ้า วัตต์-ชั่วโมง (Wh)

P คือกำลังไฟฟ้า วัตต์ (W)

I คือกระแสไฟฟ้า แอมแปร์ (A)

V คือแรงดันไฟฟ้า โวลต์ (V)

t คือระยะเวลา ชั่วโมง (h)

มอเตอร์ ขนาด 350 วัตต์ ออกแบบให้ใช้งานต่อเนื่องได้ 4 ชั่วโมง

$$E = 350 \times 4$$

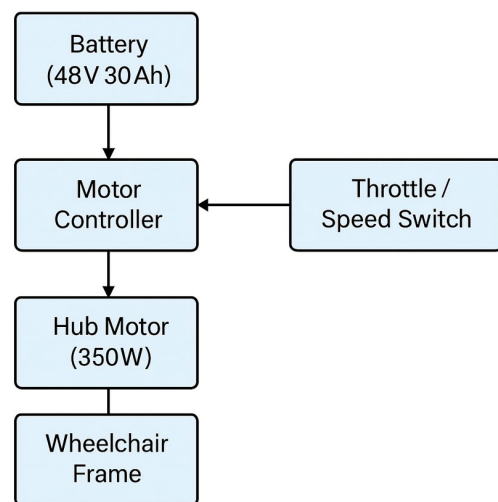
พลังงานที่ได้ 1400 วัตต์-ชั่วโมง เลือกแบตเตอรี่ 48 โวลต์

$$I = \frac{1400}{48} = 29.16 \text{ แอมแปร์}$$

ดังนั้นเลือกใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขนาด 48 โวลต์ 30 แอมแปร์-ชั่วโมง [8] พร้อมเครื่องประจุและตัวควบคุมความเร็ว สามารถปรับความเร็วได้ 3 ระดับ พร้อมฟังก์ชันถอยหลัง ระบบช่วงล่างและเบรกติดตั้งใช้คอปู่เพื่อลดแรงสั่นสะเทือนขณะใช้งาน ระบบเบรกดิสก์เดี่ยวเพื่อความปลอดภัยในการหยุดรถ ระบบไฟส่องสว่างติดตั้งไฟหน้าและไฟท้ายเพื่อเพิ่มทัศนวิสัยในการใช้งาน ในเวลากลางคืน การออกแบบเน้นความสะดวกในการใช้งานและบำรุงรักษา โดยสามารถถอดประกอบชุดหัวลากออกจากรถเข็นได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงส่วนประกอบชุดหัวลากไฟฟ้า



ภาพที่ 3 แสดงแผนผังโครงสร้างการทำงานโดยรวมของระบบชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการ

กระบวนการทำงานเริ่มต้นจากแบตเตอรี่ซึ่งทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังชุดควบคุมมอเตอร์ โดยชุดควบคุมมอเตอร์จะทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายพลังงานไปยังฮับมอเตอร์ที่ติดตั้งอยู่กับล้อของชุดหัวลาก ระบบควบคุมความเร็วสามารถปรับได้จำนวน 3 ระดับผ่านทางสวิตช์ควบคุม และสามารถเพิ่มความเร็วของชุดหัวลากได้โดยการกดคันเร่ง เพื่อให้ชุดหัวลากรถเข็นสามารถเคลื่อนที่ได้ตามต้องการ

2.2 ทดสอบและประเมินประสิทธิภาพชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับคนพิการ

ทดสอบเพื่อวัดหาความเร็วเฉลี่ยของชุดหัวลากไฟฟ้าในแต่ละระดับความเร็วภายใต้สภาวะการใช้งานจริงโดยพิจารณาจากน้ำหนักของผู้ขับขี่ที่แตกต่างกันทดสอบที่ระยะทาง 100 เมตร โดยผู้ทดสอบจำนวน 3 คน น้ำหนัก 55, 70 และ 85 กิโลกรัม เลือกระดับความเร็วชุดหัวลากไฟฟ้าไปที่ระดับความเร็วที่ต้องการสามารถปรับความเร็วได้ 3 ระดับทำการทดสอบ ซ้ำ 3 ครั้งบันทึกเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่แต่ละครั้งนำข้อมูลเวลาที่ได้จากการทดสอบทั้งหมดมาคำนวณหาความเร็วเฉลี่ย

ทดสอบประเมินความเร็วใช้งานของผู้พิการทางการเคลื่อนไหวจำนวน 3 ท่านที่ใช้ในชีวิตประจำวัน บันทึกผล

ทดสอบระยะเบรกของชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการโดยที่ปรับระดับความเร็วทั้ง 3 ระดับทำการเบรกและวัดระยะที่รถหยุดของแต่ละระดับความเร็ว

ทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานต่อการประจุแบตเตอรี่หนึ่งครั้งของชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการ เพื่อวัดระยะทางสูงสุดที่ชุดหัวลากไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ต่อการชาร์จหนึ่งครั้ง ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง โดยพิจารณาจากน้ำหนักของผู้ขับซึ่ง 85 กิโลกรัม และความเร็วในการเคลื่อนที่ระดับ 1 2 และ 3 เริ่มต้นโดยการประจุแบตเตอรี่ของชุดหัวลากไฟฟ้าให้เต็ม 100% จากนั้นทำการปรับระดับความเร็วของชุดหัวลากไฟฟ้าไปที่ระดับ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ผู้ทดสอบขับเคลื่อนชุดหัวลากไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ในระหว่างการทดสอบได้มีการบันทึกแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยโวลต์มิเตอร์ และบันทึกกระแสไฟฟ้าที่ใช้งานของแบตเตอรี่ด้วยแอมป์มิเตอร์ อย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งแบตเตอรี่หมดและชุดหัวลากไฟฟ้าหยุดทำงาน โดยได้ทำการบันทึกระยะทางทั้งหมดที่ชุดหัวลากไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ในการชาร์จหนึ่งครั้งการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ได้ดำเนินการให้ผู้พิการจำนวน 3 ท่านทดสอบใช้งานชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการในการใช้งานจริง จากนั้นจึงทำแบบสอบถามเพื่อประเมินความพึงพอใจในด้านต่าง ๆ ได้แก่ ด้านความคล่องตัวและขั้นตอนการใช้งาน โดยประเมินความสะดวกในการติดตั้ง ถอดประกอบ และการควบคุมขณะใช้งาน ด้านการออกแบบและรูปลักษณ์ โดยพิจารณาจากความสวยงาม ความทันสมัย ความแข็งแรงของวัสดุ และความเหมาะสมต่อกลุ่มผู้ใช้งาน

ด้านความเหมาะสมของราคาเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพ ซึ่งรวมถึงความคิดเห็นเกี่ยวกับความคุ้มค่า และต้นทุนสำหรับการใช้งานชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการ

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการที่ออกแบบและพัฒนา มีโครงสร้างและส่วนประกอบหลัก แสดงดังภาพที่ 4 ดังนี้ หมายเลข 1 ชุดมอเตอร์ไฟฟ้า 350 วัตต์ ติดตั้งอยู่ที่ส่วนล้อของชุดหัวลาก ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนให้รถเข็นเคลื่อนที่ได้ หมายเลข 2 แบตเตอรี่ 48 โวลต์ 30 แอมป์ชั่วโมง เป็นแหล่งพลังงานที่จ่ายไฟให้มอเตอร์ ทำให้ชุดหัวลากสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง หมายเลข 3 จุดเชื่อมต่อเป็นจุดที่เชื่อมต่อระหว่างชุดหัวลากไฟฟ้ากับรถเข็นคนพิการ ออกแบบให้สามารถถอดประกอบได้อย่างง่าย เพียงแค่โยกคันโยกไปข้างหน้า ทำให้ผู้ใช้งานสามารถติดตั้งและถอดชุดหัวลากได้ด้วยตนเอง หมายเลข 4 รถเข็นคนพิการเป็นรถเข็นมาตรฐานที่สามารถนำมาติดตั้งชุดหัวลากไฟฟ้าเพื่อเพิ่มความสะดวกในการเคลื่อนที่ แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดงส่วนประกอบชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการ

ผลการทดสอบชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการ โดยทำการวัดความเร็วในการเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 100 เมตร ภายใต้สภาวะน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกัน พบว่าความเร็วเฉลี่ยของชุดหัวลากไฟฟ้า ระดับที่ 1 ความเร็ว 4.96 เมตรต่อวินาที ระดับที่ 2 ความเร็ว 5.40 เมตรต่อวินาที และที่ระดับที่ 3 ความเร็ว 6.04 เมตรต่อวินาที ผลกระทบของน้ำหนักบรรทุก จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 1 พบว่า การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักบรรทุกที่ไม่เกิน 100 กิโลกรัม ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ต่อความเร็วของชุดหัวลากไฟฟ้า

ตารางที่ 1 แสดงความเร็วของชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการกับน้ำหนักบรรทุก

Weight (kg)	Speed (m/s)		
55	4.97 ^a	5.41 ^a	6.05 ^a
70	4.98 ^a	5.41 ^a	6.04 ^a
85	4.95 ^a	5.40 ^a	6.05 ^a
เฉลี่ย	4.96	5.40	6.04

^a อักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ผลจากการสำรวจพฤติกรรมการใช้งานชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการของผู้ใช้งานจริงจำนวน 3 ท่าน ในสถานที่ต่าง ๆ เช่น ห้างสรรพสินค้า โรงพยาบาล และสวนสาธารณะ พบว่าความเร็วในการใช้งานเฉลี่ยอยู่ที่ 1-4 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในชีวิตประจำวัน ดังนั้นชุดหัวลากไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมีความเร็วระดับที่ 1 ที่ความเร็วเฉลี่ย 4.96 เมตรต่อวินาทีเพียงพอต่อการใช้งานชุดหัวลากไฟฟ้า ทำให้ผู้ใช้งานสามารถปรับความเร็วได้ตามต้องการ และมีความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและกิจกรรมที่ทำได้ อย่างสะดวกสบาย

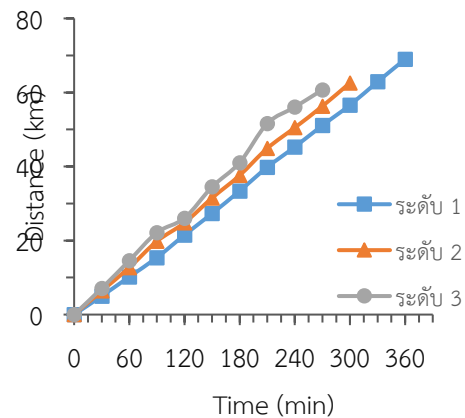
ผลการทดสอบระยะเบรกของชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการที่ระดับความเร็วเฉลี่ย 4.96 เมตรต่อวินาที ระยะ

เบรกอยู่ที่ 1.4 เมตร ที่ระดับความเร็วเฉลี่ย 5.40 เมตรต่อวินาที ระยะเบรกอยู่ที่ 1.7 เมตร และที่ระดับความเร็วเฉลี่ย 6.04 เมตรต่อวินาที ระยะเบรกอยู่ที่ 2.1 เมตร จากผลการทดสอบระยะเบรกของชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการอยู่ในระยะไม่เกิน 4 เมตร ซึ่งอยู่ในระยะช่วงเบรกตามมาตรฐานของระยะเบรกของรถที่ความเร็วไม่เกิน 5.56 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้จากข้อมูลเอกสารอ้างอิงของมาตรฐานการออกแบบทางหลวงโดยกรมทางหลวง (Design Manual by Department of Highways, Thailand) ระบุว่า สำหรับถนนที่มีความเร็วออกแบบ (Design Speed) เท่ากับ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะมี ระยะเบรก (Braking Distance) เท่ากับ 4.6 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการที่สามารถหยุดได้ภายในระยะ 1.4–2.1 เมตร แม้จะวิ่งด้วยความเร็วสูงสุด 6.04 เมตรต่อวินาที (≈ 21.7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ยังอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยตามมาตรฐานดังกล่าว จึงแสดงให้เห็นว่าระบบเบรกที่ออกแบบมีความปลอดภัยเพียงพอสำหรับการใช้งานในพื้นที่ชุมชนหรือบริเวณที่จำกัดความเร็ว [9-10]

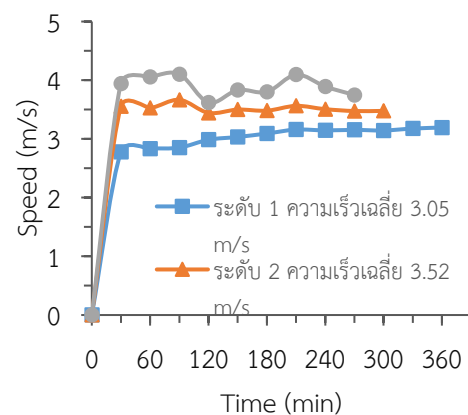
ผลการทดสอบการประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้งสามารถใช้งานชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการต่อเนื่อง แสดงดังภาพที่ 5 และภาพที่ 6 ที่ระดับ 1 ความเร็วเฉลี่ย 3.05 เมตรต่อวินาที สามารถเคลื่อนที่ได้ระยะทางสะสมที่ 69 กิโลเมตร ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ 360 นาที คิดเป็น 6 ชั่วโมง ที่ระดับ 2 ความเร็วเฉลี่ย 3.52 เมตรต่อวินาที สามารถเคลื่อนที่ได้ระยะทางสะสมที่ 62.6 กิโลเมตร ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ 300 นาที คิดเป็น 5 ชั่วโมง และที่ระดับ 3 ความเร็วเฉลี่ย 3.90 เมตรต่อวินาที สามารถเคลื่อนที่ได้ระยะทางสะสมที่ 60.72 กิโลเมตร ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ 270 นาที คิดเป็น 4 ชั่วโมง 30 นาทีจากการออกแบบให้ใช้งานได้ 4 ชั่วโมง สามารถใช้งานได้ยาวนานกว่า ทั้งนี้ในขั้นตอนการออกแบบคิดจากพลังงานมอเตอร์ที่ 350 วัตต์ แต่จากการใช้งานจริงทำการวัดกระแสไฟฟ้าและโวลต์นำมาคำนวณกำลังเฉลี่ยมีค่า 227 วัตต์ ของแบตเตอรี่พบว่าขณะใช้งาน

$$t = \frac{48 \times 30}{227} = 6.34 \quad \text{ชั่วโมง}$$

การคำนวณพบว่าสามารถใช้งานชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับคนพิการได้ 394 นาที ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบที่สามารถเคลื่อนที่ได้เวลาเฉลี่ย 310 นาที [11] จากภาพที่ 5 พบว่าระยะทางเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรง และจากภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ชุดหัวลากเคลื่อนที่พบว่าความเร็วที่ใช้ทดสอบมีความสม่ำเสมอ นอกจากนี้ เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ เจนศักดิ์ได้พัฒนารถสามล้อสำหรับคนพิการแบบถอดประกอบได้ วิ่งด้วยความเร็ว 3.19 เมตรต่อวินาที ระยะทางสะสม 20 กิโลเมตร ใช้เวลา 1.15 ชั่วโมง [12] ทั้งนี้ระยะทางและเวลาขึ้นอยู่กับแหล่งพลังงานของรถแบตเตอรี่ แหล่งพลังงานสูงราคาและขนาดจะสูงตามไปด้วย ควรออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะของการใช้งานแต่ละประเภท



ภาพที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่



ภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่

ผลการประเมินความพึงพอใจและประสิทธิภาพการใช้งานชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการทั้ง 3 ท่าน พบว่า ผลประเมินอยู่ที่ 4.6 อยู่ในเกณฑ์ดี เนื่องจากผู้ใช้งานสามารถถอดประกอบได้แม้จะมีอุปสรรคทางด้านร่างกาย และขั้นตอนการใช้งานบำรุงรักษาไม่ยุ่งยาก ด้านการรูปลักษณ์สวยงาม ทำจากวัสดุที่เหมาะสมแข็งแรงทนทาน ผู้พิการเองประเมินราคาของชุดหัวลากไฟฟ้าสำหรับรถเข็นคนพิการราคายังสูง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับราคาของรถเข็นไฟฟ้า ราคาชุดหัวลากต่ำกว่าหลายเท่า ความพอใจโดยรวม เป็นที่น่าพอใจแต่รูปร่างของชุดหัวลากค่อนข้างยาว ควรปรับการออกแบบให้มีความกระชับรัดกุมมากขึ้นเพื่อลดพื้นที่ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ให้น้อยลง ลดการรบกวนผู้อื่นที่ใช้ชีวิตร่วมกัน

4. สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนชุดหัวลากไฟฟ้าและความปลอดภัยในการใช้งานสำหรับรถเข็นคนพิการ พบว่ารถเข็นสามารถเคลื่อนที่ได้ระยะทางสะสมเฉลี่ย 64.11 กิโลเมตร เวลาในการเคลื่อนที่เฉลี่ย 310 นาที ต่อการชาร์จแบตเตอรี่ 1 ครั้งที่มีความเร็วเคลื่อนที่เฉลี่ย 3.49 เมตร

ต่อวินาที เกณฑ์การประเมินจากผู้พิการอยู่ในเกณฑ์ดี ชุดหัวลากที่สร้างขึ้นผู้พิการสามารถนำไปใช้งานในชีวิตประจำวันได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ให้สถานที่ในการทดสอบ และผู้พิการทางการเคลื่อนไหว 3 ท่าน เป็นผู้ทดสอบสมรรถนะชุดหัวลากไฟฟ้า

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ, 2567. สถิติข้อมูลคนพิการที่มีบัตรประจำตัวคนพิการจำแนกตามภูมิภาคและเพศ. กระทรวงการพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์
- [2] Cui, J., Huang, Z., Li, X., Cui, L., Shang, Y., & Tong, L., 2023. Research on intelligent wheelchair attitude-based adjustment method based on action intention recognition. *Micromachines*, 14(6), 1265.
- [3] กรมกิจการผู้สูงอายุ, 2567. ข้อมูลผู้สูงอายุทั่วไป. กระทรวงการพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์
- [4] ศัชชญาส ดวงจันทร์, ภูริพจน์ แก้วย่อง, 2561. เทคโนโลยีสนับสนุนการใช้งานของผู้ใช้วีลแชร์. *วารสารวิทยาลัยราชสุดา*, ปีที่ 14 หน้า 104-117
- [5] ชาติรส การะเวก, นัฏศรา เข้มแน่นหมัด, ปรียานุช วิลาวรรณ, 2564. การพัฒนากระเป๋าเสริมรถนั่งคนพิการ. *วารสารวิจัยรำไพพรรณี* ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 หน้า 1-5
- [6] วิโรจน์ บัวงาม, ธาณิล ม่วงพูล, 2562. การพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมรถวีลแชร์อัตโนมัติด้วยสัญญาณสมองและการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์. *วารสารโครงการงานวิชาการ*
- [7] วีรยุทธ เดิมสวัสดิ์, จักรกฤษณ์ จันทศิริ, 2562. การพัฒนารถสามล้อไฟฟ้าเพื่อคนพิการทางขา. *รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม*
- [8] วรวิศ กอปรสิริพัฒน์, 2558. สารพันความรู้ด้านพลังงาน. *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*, ฉบับที่ 77 หน้า 51-57
- [9] Abdulhafedh, A., 2020. Highway stopping sight distance, decision sight distance, and passing sight distance based on AASHTO models. *Open Access Library Journal*, 7(3), 1-24.
- [10] Srisurin, P., and Amprayn, C., 2024. Evaluation of the Highway Capacity Manual (HCM) and Thailand's Department of Highways' approaches to estimating the capacity of a multilane highway segment via the empirical method. *Engineering and Applied Science Research*, 51(6), 747-755.
- [11] กองถ่ายทอดและเผยแพร่เทคโนโลยี กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2562. การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์. กระทรวงพลังงาน
- [12] เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์, 2558. รถสามล้อไฟฟ้าสำหรับคนพิการแบบถอดประกอบได้. *รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์*

การเปรียบเทียบวิธีการหาคำตอบสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ Comparison of Methods for Optimal Solutions to Vehicle Routing Problems

จักรินทร์ กลั่นเงิน¹, เทียนจู์ เด่นเวสสะเพชร์², นิภาพรณ กลั่นเงิน³, ประภาพรณ เกษราพงศ์^{4*}
Jakkarin Klunngien¹, Thianju Denwessaphet², Nipapan Klunngien³, Prapapan Ketsarapong^{4*}

^{1,4}หน่วยปฏิบัติการวิจัยการจัดการการผลิตและอุตสาหกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

^{1,4}Industrial and Production Management Research Unit, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University

³National Science and Technology Development Agency

* Corresponding author. Email: Prapapan@eng.src.ku.ac.th

Received: 13-02-2025 Revised: 2-12-2024 Accepted: 30-06-2025

บทคัดย่อ

ต้นทุนหลักของระบบการขนส่งโลจิสติกส์คือต้นทุนในการขนส่ง บริษัทที่มีการบริหารจัดการขนส่งที่ไม่ดีจะส่งผลให้ต้นทุนการขนส่งสูงขึ้น ปัจจัยหลักของต้นทุนการขนส่งที่สูงเกิดจากการเดินทางของพนักงานที่เลือกเส้นทางในการเดินทางที่ไม่มีประสิทธิภาพทำให้เกิดระยะทางรวมมาก ซึ่งในบางครั้งอาจทำให้การส่งสินค้าเกิดความล่าช้า ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาการจัดการเส้นทางขนส่งยานพาหนะในกรณีที่ทราบความต้องการของลูกค้าแน่นอน สำหรับบริษัทจำหน่ายและจัดส่งสินค้าเกษตรชนิดหนึ่งซึ่งมียานพาหนะ 1 คัน กำหนดความสามารถในการบรรทุกสูงสุดไม่เกิน 5,000 กิโลกรัม วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อเปรียบเทียบวิธีการในการหาคำตอบที่เหมาะสม 3 วิธีคือ วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) วิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) และวิธีอัลกอริทึมปีนเขา (Hill-climbing Algorithm) ผลที่ได้พบว่า เมื่อลูกค้ามีจำนวน 400 รายวิธี SA สามารถแก้ปัญหาได้ ในขณะที่วิธี HCA และวิธี GA สามารถแก้ปัญหาเมื่อมีจำนวนลูกค้าสูงสุดเพียง 350 และ 200 รายตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า วิธี SA สามารถแก้ปัญหาในกรณีที่ปัญหามีขนาดใหญ่ที่สุดได้ ในขณะที่วิธี HCA และ วิธี GA เป็นวิธีที่รองลงมาตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบคำตอบในการจัดเส้นทางพบว่า วิธี GA เป็นวิธีที่ให้ระยะทางและเวลาในการเดินทางที่น้อยที่สุดจากทั้ง 3 วิธีเมื่อมีจำนวนลูกค้าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 200 ราย

คำสำคัญ : วิธีเชิงพันธุกรรม วิธีการอบอ่อนจำลอง วิธีอัลกอริทึมปีนเขา ปัญหาการขนส่งยานพาหนะ

ABSTRACT

The primary cost of logistics systems is transportation cost. Companies with poor transportation management result in higher transportation costs. The main factor of high transportation costs is employees choosing inefficient routes that result in a high total distance. In addition, as a result, delivery is also too late. Therefore, this research studies vehicle transportation routing in cases of certainty demand. A case study of distributor and delivery agriculture products that have one vehicle, and maximum loading capacity not exceeding 5,000 kg. The purpose of this research is to compare methods for finding the optimal solution with three methods; Genetic Algorithm (GA), Simulated Annealing (SA), and Hill-climbing Algorithm (HCA). The result shows that SA can solve the problem when the number of customers is 400, while HCA and GA can solve the problem when the number of customers is 350 and 200, respectively. Consequently, SA is the most effective method. Next are HCA and GA, respectively. GA is the method that gets the least distance and transportation time of the three methods when the number of customers is less than or equal to 200.

Keyword: Genetic Algorithm Simulated Annealing Hill Climbing Vehicle Routing Problem

1. บทนำ

ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง เป็นปัญหาด้านโลจิสติกส์รูปแบบหนึ่งที่ได้มีการศึกษาค้นคว้าอย่างแพร่หลาย โดยมีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไข และข้อจำกัดต่างๆ ตามรูปแบบปัญหาที่สนใจ ซึ่งมีทั้งแบบสนใจเพียงระยะทางอย่างเดียว หรือที่เรียกว่า ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travel Salesman Problem; TSP) แบบสนใจระยะทางและน้ำหนักในการบรรทุก หรือที่เรียกว่า ปัญหาการกำหนดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem; VRP) อย่างไรก็ตามปัญหาทั้ง 2 เป็น NP-hard ซึ่งแก้ไขได้ยาก และมีความซับซ้อนของเวลาเมื่อขนาดของปัญหาใหญ่ขึ้นก็จะทำให้เวลาในการแก้ปัญหาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปัญหาการขนส่งมีความสำคัญกับธุรกิจหลายๆ ธุรกิจในปัจจุบันเป็นอย่างมาก เนื่องจากเกี่ยวข้องกับต้นทุนการขนส่งโดยตรง [1] ซึ่งเป็นต้นทุนที่สูงสุดในต้นทุนโลจิสติกส์ รองลงมาคือต้นทุนในการเก็บรักษาสินค้าคงคลัง และต้นทุนการบริหารจัดการ ตามลำดับ หากสามารถลดต้นทุนส่วนนี้ลงได้ก็จะส่งผลให้ผลประกอบการของบริษัทดีขึ้นได้ สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาผู้วิจัยได้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วน ในงานวิจัยนี้เป็นส่วนแรกของงานวิจัยหลักซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการในการหาคำตอบที่เหมาะสม 3 วิธีคือ วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) วิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) และวิธีอัลกอริทึมปีนเขา (Hill-climbing Algorithm: HCA) เพื่อนำวิธีที่ได้คำตอบที่ดีที่สุดไปใช้ในส่วนของ 2 ทำให้บริษัทสามารถลดระยะทางในการขนส่ง ส่งผลให้ต้นทุนที่ลดลง เหตุผลที่ผู้วิจัยเลือกอัลกอริทึมทั้ง 3 เนื่องจากเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและได้รับการพัฒนาปรับปรุงวิธีการให้ดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง บริษัทกรณีศึกษาเป็นบริษัทจำหน่ายและจัดส่งสินค้าการเกษตรชนิดหนึ่ง ซึ่งจะจัดส่งสินค้าตามความต้องการของลูกค้าในแต่ละวัน โดยร้านกรณีศึกษามียานพาหนะ 1 คัน มีความสามารถในการบรรทุกไม่เกิน 5,000 กิโลกรัม ปัญหาดังกล่าวจึงเป็นปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะแบบทราบค่าความต้องการของลูกค้าแน่นอน (Deterministic Demand) ซึ่ง [2] ศึกษาการจัดเส้นทางขนส่งขึ้นส่วนรถยนต์ กรณีศึกษาบริษัทขนส่งขึ้นส่วนรถยนต์เปรียบเทียบต้นทุนรวมในการขนส่งก่อนและหลังปรับปรุง พบว่าต้นทุนรวมลดลงร้อยละ 23.33 และระยะทางขนส่งลดลงร้อยละ 17.37 [3] ทำการเปรียบเทียบการจัดเส้นทางยานพาหนะสำหรับกระจายสินค้าแบบรวมสินค้า (Vehicle Routing Problem with Shipment Consolidation; VRPC) และแบบแยกส่วน (Vehicle Routing Problem with Split Deliveries; VRPSD) ผลที่ได้พบว่าการจัดเส้นทางยานพาหนะแบบ VRPC ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าถึงร้อยละ 10 [4] ศึกษาการขนส่งแบบหลายคลังสินค้าของเพลตฟอรั่มอเมริกาเพื่อลดต้นทุนในการจัดส่งโดยใช้แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed-Integer

Programming Model) และได้เสนออัลกอริทึมทางพันธุกรรมสองชั้นเพื่อแก้ปัญหา ซึ่งได้จำกัดไว้ 100 รุ่น ผลที่ได้พบว่าวิธีการนี้สามารถลดเวลาในการคำนวณได้ดี เพียงแต่อัลกอริทึมไม่เสถียร [5] พัฒนาวิธีการจัดส่งสินค้าเพื่อลดต้นทุนในการส่งสินค้าโดยใช้แบบจำลองการจัดเส้นทางยานพาหนะแบบมีกรอบเวลาและการแบ่งแยกสินค้า (Vehicle Routing Problem with Time Windows and Split Demand Delivery) โดยใช้รถสำหรับบรรทุกสินค้า 4 ชนิดแตกต่างกัน และใช้วิธีการทางฮิวริสติกส์วิธีแบบแทรกไปข้างหน้าแบบแทรกใกล้สุด และทำการปรับปรุงคำตอบด้วยการค้นหาเฉพาะที่ (Local Search) และการย้ายลำดับลูกค้า 1 ราย [6] นำเสนอรูปแบบการให้บริการขนส่งสำหรับผู้สูงอายุในอำเภอหาดใหญ่จากบ้านไปโรงพยาบาล (Home to Hospital Transport Planning; HHTP) แบบมีกรอบเวลา และใช้โปรแกรม ArcGIS 10.2 พบว่าสามารถลดระยะทางการขนส่งลงร้อยละ 65.64 [7] นำเสนอการแก้ไขปัญหการจัดเส้นทางยานพาหนะแบบมีกรอบเวลาด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) เปรียบเทียบกับการค้นหาแบบทาบ (Tabu Search) พบว่าวิธี GA ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า [8] แก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะแบบพลวัตที่สามารถเปลี่ยนแปลงรายละเอียดต่างๆ ของลูกค้าได้เมื่อเวลาเปลี่ยนไป โดยใช้วิธีการอบอ่อนจำลองเพื่อให้ต้นทุนรวมน้อย [9] ทำการเปรียบเทียบการจัดเส้นทางขนส่งและระยะเวลาในการขนส่งด้วยวิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing : SA) วิธีปีนเขา (Hill Climbing Algorithm: HCA) โดยแบ่งกลุ่มลูกค้าแบบค่าเฉลี่ยของเค (K-Means Clustering) และวิธีเดิมก่อนการจัดเส้นทาง พบว่าวิธีการอบอ่อนจำลองให้ระยะทางลดลง 216 กิโลเมตร และต้นทุนในการขนส่งลดลงร้อยละ 5.10 ต่อปี [10] ศึกษาการจัดเส้นทางขนส่งสินค้า 3 กลุ่มโดยแบ่งตามช่วงเวลาในการจัดส่งที่แตกต่างกัน และใช้วิธีการอบอ่อนจำลอง ด้วยอัลกอริทึมภาษา ไพธอน พบว่า เมื่อนำระยะทาง น้ำหนัก และจำนวนรถมาหาจุดคุ้มทุน จะสามารถคุ้มทุนได้ภายใน 4.02 ปีและให้ผลกำไร 1,379.10 บาทต่อวัน [11] ทำการเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีการอบอ่อนจำลองกับขั้นตอนการปีนเขาในการจัดเส้นทางขนส่งในคลังสินค้า ผลที่ได้พบว่า ขั้นตอนวิธีการอบอ่อนจำลองได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า และควรใช้ค่าอัตราการลดลงของ $T(\alpha)$ สูงหรือใกล้เคียง 1 [12] ศึกษาวิธีออกแบบเส้นทางขนส่งที่สามารถขยายพื้นที่ครอบคลุมเครือข่ายมากที่สุด ในขณะที่ยังสามารถรักษาข้อจำกัดของงบประมาณไว้ โดยใช้วิธี HCA ผลลัพธ์ที่ได้จากเครือข่ายกริดขนาด 6×10 สำหรับ งบประมาณ 3 ระดับคือ ต่ำ ปานกลาง และสูง พบว่า เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะน้อยกว่าการใช้วิธีหาคำตอบที่ดีที่สุด และคำตอบที่ได้จะแตกต่างจากคำตอบที่ดีที่สุดร้อยละ 0.12, ร้อยละ 4.16 และร้อยละ 2.22 ตามลำดับของงบประมาณ

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ อุปกรณ์

บทความนี้ใช้ตัวอย่างปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ ซึ่งเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจและเป็นที่รู้จักกันดี เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการหาคำตอบของวิธี GA SA และ HCA โดยผู้วิจัย จะทำการขยายขนาดของปัญหาให้ใหญ่ขึ้นจนวิธีการทั้ง 3 ไม่สามารถหาคำตอบได้ภายใต้ระยะเวลาที่กำหนดไว้ 1 ชั่วโมง ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ AMD Ryzen7 7735HS หน่วยความจำขนาด 16 GB.DDR5 (4800MHz)(8x2) Max 32GB. ส่วนระบบปฏิบัติการและซอฟต์แวร์ที่ใช้คือ Windows 11 Home และ Excel VBA ตามลำดับ

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 วิธี GA [13,14] เป็นกระบวนการที่เลียนแบบ การคัดเลือกทางธรรมชาติในการหาคำตอบที่ดีที่สุด ขั้นตอนวิธี GA มีดังนี้

- 1) การสร้างประชากรของคำตอบเริ่มต้น (Initialization) โดย กำหนดเส้นทางการขนส่งสำหรับ VRP เริ่มจากจุดกระจายสินค้า ไปยังจุดต่างๆ แล้วกลับมายังจุดเริ่มต้น
- 2) การคำนวณค่าฟิตเนส (Fitness Evaluation) ซึ่งจะคำนวณจากระยะทางรวมทั้งหมดที่ยานพาหนะเดินทาง และจะถูกนำมาใช้ในการคัดเลือกผู้ที่ได้รับการผสมพันธุ์และคัดเลือกในรอบถัดไป
- 3) การเลือก (Selection) เป็นการเลือกตัวแทนจากประชากรที่จะนำมาใช้ในการผสมพันธุ์ (Crossover) เพื่อสร้างประชากรลูกหลาน
- 4) การผสมพันธุ์ (Crossover) คือการผสมพันธุ์ระหว่าง 2 ตัวแทนเพื่อสร้างประชากรลูกหลาน ซึ่งก็คือคำตอบใหม่ ในที่นี้เลือกใช้วิธีการแลกเปลี่ยนอยู่ที่จุดเดียวในโครโมโซม (One-Point Crossover)
- 5) การกลายพันธุ์ (Mutation) เป็นการเปลี่ยนแปลงบางส่วน ของตัวแทนในประชากรลูกหลาน เพื่อเพิ่มความหลากหลาย และช่วยเลี่ยงเหตุการณ์ที่คำตอบติดอยู่ที่ค่าต่ำสุดเฉพาะที่ (Local Optima) สามารถทำได้โดยการสลับตำแหน่งของเส้นทางการขนส่งในโครโมโซมเพื่อสร้างความแตกต่างในแต่ละรุ่น
- 6) การทดแทน (Replacement) จะดำเนินการหลังจากได้ทำการผสมพันธุ์และกลายพันธุ์ของประชากรลูกหลานแล้วจะเพิ่มเข้าไปในประชากรและทำการแทนที่ตัวแทนบางตัวจากประชากรเดิม
- 7) การหยุด (Termination) จะดำเนินการทำซ้ำจนกว่าจะได้คำตอบที่เหมาะสม หรือจำนวนรอบการทำซ้ำ 1,000 รอบ

2.2.2 วิธี SA [15,16] เป็นเทคนิคที่เลียนแบบพฤติกรรม การอบอ่อนหรือการทำให้เย็นลงช้าๆ การนำมาใช้หาคำต่ำสุดหรือ

สูงสุดสามารถทำได้โดยการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อหาค่าต่ำสุดในพื้นที่ของพารามิเตอร์ โดยไม่จำกัดพื้นที่คำตอบเฉพาะจุดที่ใกล้เคียงสุด แต่จะมีการกระโดดไปยังจุดอื่น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาความผิดปกติของฟังก์ชัน (Local Minima) มีขั้นตอนดังนี้

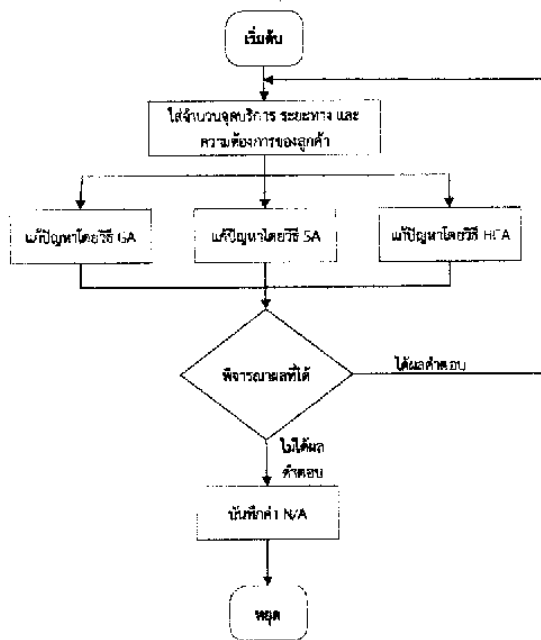
- 1) กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น (Initial Parameters) เป็นการสร้างคำตอบแรกจากการสุ่มพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้ เพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบคำตอบ
- 2) สร้างการเปลี่ยนแปลง (Generate New Solution) เป็นการสร้างคำตอบใหม่ จากการเลือกตำแหน่งโดยการกระโดดหรือการเบี่ยงเบน (Perturbation) ของสถานะปัจจุบันไปยังสถานะใหม่ ในที่นี้เลือกวิธีการสลับตำแหน่ง
- 3) คำนวณค่าฟังก์ชันระยะทางของตำแหน่งใหม่ที่ได้จากการกระโดด ซึ่งจะคำนวณค่าต่ำสุดที่ต้องการหาจากการเปลี่ยนแปลง
- 4) ยอมรับหรือไม่ยอมรับตำแหน่งใหม่ (Acceptance Criteria) จะตรวจสอบจากตำแหน่งใหม่ที่ได้เปรียบเทียบกับตำแหน่งเดิม หากตำแหน่งใหม่ดีกว่าจะยอมรับตำแหน่งใหม่
- 5) ปรับลดอุณหภูมิ (Cooling the Temperature) อุณหภูมิจะลดลงตามที่กำหนดเพื่อให้กระบวนการเข้าสู่ภาวะเสถียร มีการกำหนดอุณหภูมิเท่ากับ 1 เอกสารอ้างอิงจาก [8]
- 6) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด (Stopping Criteria) เมื่อจำนวนขั้นตอนถึงขีดจำกัดที่กำหนด การทำงานของ SA จะหยุดลง ซึ่งได้ตั้งจำนวนรอบทำซ้ำเท่ากับ 1,000 รอบ และเวลาในการหาคำตอบไม่เกิน 1 ชั่วโมง
- 7) ผลลัพธ์สุดท้าย (Final Solution) จะเป็นตำแหน่งที่ให้ฟังก์ชันต่ำสุด

2.2.3 วิธี HCA เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมแบบฮิวริสติก การแก้ปัญหาจะมองผ่านมุมมองระดับท้องถิ่น (Local) [17] ขั้นตอนมีดังนี้

- 1) กำหนดสถานะเริ่มต้น (Initial Solution) เป็นการสร้างคำตอบเริ่มต้นโดยเรียงตามลำดับของลูกค้าที่ใช้บริการ
- 2) การสร้างสถานะใหม่ เป็นการสร้างคำตอบใหม่จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์
- 3) การตรวจสอบสถานะ เป็นการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงเส้นทางแบบเดิมและใหม่ หากเส้นทางใหม่ดีกว่าก็นำมาแทนที่เป็นเส้นทางปัจจุบัน
- 4) ตรวจสอบสถานะเป้าหมาย ตามเงื่อนไขของคำตอบที่เป็นไปได้
- 5) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2-4 จนได้คำตอบตรงตามวัตถุประสงค์หรือเงื่อนไขของการหยุดคำตอบ ซึ่งได้

ตั้งจำนวนรอบทำซ้ำเท่ากับ 1,000 รอบ และเวลาในการหาคำตอบไม่เกิน 1 ชั่วโมง

วิธีการทดลองสามารถสรุปดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 วิธีทำการทดลอง

จากภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนและวิธีการสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ โดยเริ่มต้นจะใส่ค่าต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับปัญหา VRP หลังจากนั้นจะแก้ปัญหาเปรียบเทียบการหาคำตอบของทั้ง 3 วิธี คือ วิธี GA วิธี SA และวิธี HCA และทำการบันทึกผลที่ได้เป็นระยะทางและเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของแต่ละวิธี หากมีวิธีใดที่ไม่สามารถหาคำตอบได้ภายในเวลาที่กำหนดเช่น จำนวนรอบทำซ้ำ 1,000 รอบ หรือเวลาในการแก้ปัญหา 1 ชั่วโมง ก็จะทำให้การหยุดการหาคำตอบของวิธีนั้นๆ และบันทึกค่า “ไม่ปรากฏ” หรือ “N/A” (Not Available) ลงไป แต่หากสามารถหาคำตอบได้ก็จะขยายปัญหาให้ใหญ่ขึ้นโดยเพิ่มขนาดของจุดบริการ และข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับปัญหา VRP

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ตัวอย่างผลการทดลอง

ตัวอย่างการทดลองในกรณีที่มีลูกค้า 9 ราย ซึ่งมีข้อมูลระยะทางและเวลาในการจัดส่ง ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ รวมถึงปริมาณความต้องการของลูกค้าในแต่ละจุด ดังตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 1 ระยะทางในการขนส่งจากบริษัทจัดจำหน่ายไปยังลูกค้า (หน่วย: กิโลเมตร)

เริ่มต้น	สิ้นสุด									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	17	9	17	6	9	12	12	16	11
2	17	0	19	9	9	11	9	19	13	12
3	5	9	0	10	8	9	13	15	6	7
4	15	6	8	0	15	8	8	17	5	5
5	8	17	10	17	0	8	5	5	14	6
6	17	5	8	18	8	0	14	10	5	5
7	12	16	20	7	9	17	0	14	16	20
8	16	6	19	8	18	11	7	0	12	5
9	12	7	16	15	12	9	11	17	0	19
10	7	12	5	8	17	19	11	19	20	0

ตารางที่ 2 ระยะเวลาในการขนส่งจากบริษัทจัดจำหน่ายไปยังลูกค้า (หน่วย: ชั่วโมง)

เริ่มต้น	สิ้นสุด									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
		34	18	34	12	18	24	24	32	22
2	0.	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	34		38	18	18	22	18	38	26	24
3	0.	0.	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	1	18		2	16	18	26	3	12	14
4	0.	0.	0.	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	3	12	16		3	16	16	34	1	1
5	0.	0.	0.	0.	0	0.	0.	0.	0.	0.
	16	34	2	34		16	1	1	28	12
6	0.	0.	0.	0.	0.	0	0.	0.	0.	0.
	34	1	16	36	16		28	2	1	1
7	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0	0.	0.	0.
	24	32	4	14	18	34		28	32	4
8	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0	0.	0.
	32	12	38	16	36	22	14		24	1
9	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0	0.
	24	14	32	3	24	18	22	34		38
10	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0
	14	24	1	16	34	38	22	38	4	

จากตารางที่ 1 กำหนดระยะทางไปกลับในแต่ละร้านไม่เท่ากัน ในตารางที่ 2 คำนวณเวลาในการเดินทางจากความเร็วของรถที่ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และในตารางที่ 3 มีปริมาณความต้องการของลูกค้ารวมทั้ง 9 รายเท่ากับ 150 กิโลกรัม

ทำการเปรียบเทียบผลจากการจัดเส้นทางตามตัวอย่างโดยใช้วิธี GA, SA และ HCA ได้ผลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ปริมาณความต้องการลูกค้าแต่ละจุด (หน่วย: กิโลกรัม)

ลูกค้า	ปริมาณความต้องการ		ลูกค้า	ปริมาณความต้องการ
1	บริษัท		6	10
2	15		7	30
3	25		8	10
4	15		9	10
5	20		10	15

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบระยะทางและเวลาการขนส่งแต่ละวิธี

วิธีการ	เส้นทาง	ระยะทาง (กิโลเมตร)	เวลา (ชั่วโมง)
GA	1-5-7-4-9-2-6-8-10-3-1	66	1.32
SA	1-3-2-4-9-6-8-7-5-10-1	80	1.6
HCA	1-3-4-9-2-7-5-8-6-10-1	77	1.54

จากผลการทดลองพบว่าวิธี GA ให้ระยะทางในการจัดส่งที่น้อยกว่าอีก 2 วิธี คือ HCA และ SA และค่าที่ได้จากวิธี GA ให้ค่าใกล้เคียงกับวิธีแม่นยำคือใช้ระยะทาง 62 กิโลเมตรภายใต้เส้นทาง 1-5-8-2-7-4-9-6-10-3-1 อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้เพิ่มขนาดของปัญหาให้ใหญ่ขึ้นเพื่อเปรียบเทียบความสามารถและขอบเขตในการหาคำตอบของแต่ละวิธี ซึ่งจะแสดงในหัวข้อ 3.2

3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาคำตอบของทั้ง 3 วิธี

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาคำตอบของทั้ง 3 วิธี ในด้านระยะทางและเวลาที่ใช้ในการจัดส่งสินค้าไปยังลูกค้าแต่ละราย รวมถึงเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของแต่ละวิธี สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5 ระยะทางรวมในการส่งสินค้าแต่ละจุด (หน่วย: กิโลเมตร)

วิธีการ	จำนวนลูกค้า							
	50	100	150	200	250	300	350	400
GA	312	674	1037	1398	N/A	N/A	N/A	N/A
SA	350	734	1199	1616	2020	2525	2966	3498
HCA	352	734	1154	2270	2504	2560	2970	N/A

ตารางที่ 6 เวลาในการส่งสินค้าแต่ละจุด (หน่วย: ชั่วโมง)

วิธีการ	จำนวนลูกค้า							
	50	100	150	200	250	300	350	400
GA	6.24	13.48	20.74	27.96	NA	NA	NA	NA
SA	7	14.68	23.98	32.32	40.4	50.5	59.32	69.96
HCA	7.04	14.68	23.08	45.4	50.08	51.2	59.4	NA

ตารางที่ 7 เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ (หน่วย: นาที)

วิธีการ	จำนวนลูกค้า							
	50	100	150	200	250	300	350	400
GA	10.14	20.25	30.14	59.25	NA	NA	NA	NA
SA	5	5.3	5.5	5.8	7.46	10.24	12.44	14.52
HCA	4.7	4.8	5.2	20.52	25.32	30.14	40.41	NA

3.3 อภิปรายผล

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาคำตอบของวิธีการทั้ง 3 วิธี พบว่า เมื่อขนาดของปัญหาใหญ่ขึ้นจนถึง 400 จุด วิธี SA ยังคงสามารถแก้ปัญหาได้ ในขณะที่วิธี HCA และวิธี GA ไม่สามารถแก้ปัญหาได้ โดยวิธี HCA แก้ปัญหาได้ที่ 350 จุด และวิธี GA แก้ปัญหาได้ที่ 200 จุด ซึ่งผลที่ได้จะสอดคล้อง [18] ที่วิธีการ SA มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบได้ดี

4. สรุปผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาจากขนาดของปัญหา พบว่าวิธี SA สามารถหาคำตอบในกรณีที่ปัญหามีขนาดใหญ่ได้ดีที่สุด รองลงมาคือวิธี HCA และ วิธี GA แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบที่ระยะทางและเวลาที่ได้ในการขนส่งพบว่า วิธี GA ให้ระยะทางและเวลาในการขนส่งต่ำกว่าวิธี SA และวิธี HCA ในกรณีที่จำนวนลูกค้าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 200 ราย ซึ่งมีความสอดคล้องกับเงื่อนไขของบริษัทกรณีศึกษาที่มีจำนวนลูกค้าน้อยกว่า 200 ราย ดังนั้น นักวิจัยจึงได้เลือกวิธี GA ไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมในขั้นถัดไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา รหัสโครงการวิจัย KUSRCPF68-001

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กองโลจิสติกส์, การคำนวณต้นทุนโลจิสติกส์ในภาคอุตสาหกรรม. 2021. เข้าถึงเมื่อ 4 มิถุนายน 2024. เข้าถึงจาก <https://dol.dip.go.th/th/category/2019-02-08-08-57-30/2021-08-26-17-33-32>
- [2] รวีโรจน์ ห่องทรัพย์, การจัดเส้นทางขนส่งชิ้นส่วนรถยนต์ กรณีศึกษาบริษัทขนส่งชิ้นส่วนรถยนต์ [วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. ชลบุรี: บุรพา; 2564.
- [3] Juan David Cortes and Yoshinori Suzuki. Vehicle Routing with Shipment Consolidation. *International Journal of Production Economics* 227. 2020; 107622.
- [4] Chien-Ming Chen, Shi Lv, Jirsen Ning and Jimmy Ming-Tai Wu. A Genetic Algorithm for the Waitable Time-Varying Multi-Depot Green Vehicle Routing Problem. *Symmetry*. 2023. 15(1).
- [5] โรสนานี แวหะยี่. ขั้นตอนวิธีสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถขนส่งแบบมีกรอบเวลาและการแบ่งสินค้า กรณีศึกษา: โรงงานผลิตเครื่องดื่มน้ำผลไม้ [วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. สงขลา: สงขลานครินทร์; 2557.
- [6] อาลาวี ลาเต๊ะ, เสกสรร สุธรรมานนท์, นิกร ศิริ วงศ์ไพศาล และ มุhammad เต๊ะยอ. ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบมีกรอบเวลาสำหรับใช้ในการวางแผนการให้บริการขนส่งสำหรับผู้สูงอายุ:กรณีศึกษาอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา. *วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์*. 2562 ; 11(2):117-131.
- [7] Yaw Chang and Lin Chen. Solve the Vehicle Routing Problem with Time Windows via a Genetic Algorithm. *Discrete and Continuous Dynamical Systems Supplement*. 2007. 240-249.
- [8] จันทิมา ทิมเถื่อน และเบญญา เหลือศรีจันทร์. การแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งแบบพลวัตโดยใช้วิธีฮิวริสติก [ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. พิษณุโลก: นเรศวร; 2557.
- [9] ชลรยา ทายศ, กัลยรัตน์ เมื่อบศรี ,คณศ พันธุ์สวัสดิ์ และ กวินธร สัยเจริญ. การแบ่งกลุ่มลูกค้าด้วยค่าเฉลี่ยเคมิน และการจัดเส้นทางขนส่งด้วยวิธีปีนเขาบนไม่โครซอฟต์เอ็กเซลด้วยภาษาวีบีเอ. *วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน*. 2023. 11(2): 32-40.
- [10] รูปนกุล หูเต็ม, กันตพงศ์ สมตน, วิชชา เหลืองสุวรรณ และ ประภัสสร ดันติพันธุ์วดี. การใช้อัลกอริทึมวิธีการเลียนแบบการอบอ่อนสำหรับออกแบบเส้นทางเดินรถขนส่งสินค้าเกษตร. *วารสารข่าวงานวิศวกรรมอุตสาหการไทย*. 2564. 7(1): 93-106.
- [11] จิราพร สกุลวรารักษ์. การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการปีนเขาและขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวสำหรับปัญหาพนักงานขาย ในคลังสินค้าบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครปฐม: ศิลปการ. 2562.
- [12] Amirali Zarrinmehr and Hanie Moloukzede. Application of a Hill-Climbing Algorithm to Public Transportation Routes Design in Grid Networks. *International Journal of Transportation Engineering*. 2021. 9(2): 597- 612.
- [13] คมกฤต เล็กสกุล. การหาค่าที่เหมาะสมและการประยุกต์. เชียงใหม่: ศูนย์บริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2560.
- [14] Paolo Toth and Daniele Vigo. *The Vehicle Routing Problem*. Italy: University degli Studi di Bologna; 2002.
- [15] Van Laarhoven, P. J. M., & Aarts, E. H. L.. *Simulated Annealing: Theory and Applications*. Kluwer Academic Publishers. 1987.
- [16] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press. 2007.
- [17] ชลรยา ทายศ, กัลยรัตน์ เมื่อบศรี, คณศ พันธุ์สวัสดิ์ และ กวินธร สัยเจริญ. การแบ่งกลุ่มลูกค้าด้วยค่าเฉลี่ยเคมิน และการจัดเส้นทางขนส่งด้วยวิธีปีนเขาบนไม่โครซอฟต์เอ็กเซลด้วยภาษาวีบีเอ. *Thai Journal of Operations Research: TJOR*. 2023. 11(2): 32-40.
- [18] สุกัญญา โทนทอง และสุปราณี อุดมสุข. การแก้ปัญหาการจัดเส้นทางสำหรับยานพาหนะแบบมีกรอบเวลาโดยใช้วิธีการอบอ่อนจำลอง[วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. พิษณุโลก: นเรศวร. 2555.

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการขึ้นรูปแผ่นรองแก้วจากวัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นพอลิเมอร์เสริมแรง ด้วยเส้นใยเปลือกทุเรียน

Factors Affecting Forming Coaster from Polymer Matrix Composite Material Reinforced with Durian Peel Fiber

จักรินทร์ กลั่นเงิน¹ ประภาพรรณ เกษราพงศ์^{1*} นิชากานต์ แวงวรรณ² และ ปณิธา เปื้องชนะ²
Jakkarin Klunngien¹ Prapapan Ketsarapong^{2*} Nichakan Waengwan³ and Panita Prueangchana⁴

¹หน่วยปฏิบัติการวิจัยการจัดการการผลิตและอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

¹Industrial and Production Management Research Unit, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha,
Kasetsart University

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University

*Corresponding author Email: prapapan@eng.src.ku.ac.th

Received: 03-03-2025 Revised: 15-04-2025 Accepted: 30-06-2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แผ่นรองแก้ววัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยของเปลือกทุเรียน ด้วยการประยุกต์ใช้แนวคิดการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Experiment) โดยสมมติฐานงานวิจัยนี้ คือ ปริมาณน้ำยางพารา ปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียน และปริมาณสาร DPG (Diphenyl Guanidine) มีผลกระทบต่อร้อยละการดูดซึมน้ำของแผ่นรองแก้ว จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล พบว่า ผลกระทบร่วม ปริมาณน้ำยางพาราและปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียนมีอันตรกิริยาร่วมกัน โดยไม่ทำการพิจารณาผลกระทบหลัก จึงกำหนดค่าของปัจจัย ดังนี้ ปริมาณน้ำยางพารา คือ 167 กรัม ปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียน คือ 2 กรัม สำหรับปริมาณสาร DPG ไม่มีผลกระทบต่อร้อยละการดูดซึมน้ำจึงไม่กำหนดค่าของปัจจัย ผลการกำหนดค่าของปัจจัยสามารถประมาณร้อยละการดูดซึมน้ำ คือ ร้อยละ 6.95 และประมาณช่วงความเชื่อมั่นร้อยละการดูดซึมน้ำที่ระดับความเชื่อมั่น 0.95 คือ 0.98 ถึง 12.93 จากนั้น จึงทำการยืนยันผลการทดลองโดยการขึ้นรูปแผ่นรองแก้วตามค่าของปัจจัยที่ได้จากการออกแบบการทดลอง พบว่า ร้อยละการดูดซึมน้ำยืนยันผลมีค่าน้อยกว่าร้อยละการดูดซึมน้ำที่ได้ผลจากการทดลอง ด้วยระดับความเชื่อมั่น 0.95 ผลจากการศึกษานี้มีประโยชน์ต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้วยวัสดุชีวภาพและช่วยลดปริมาณขยะชีวภาพได้อีกทางหนึ่ง

คำสำคัญ การออกแบบการทดลอง การทดลองเชิงแฟคทอเรียล วัสดุเชิงประกอบ เส้นใยของเปลือกทุเรียน

Abstract

This research aims to study the appropriate parameters for the forming of coaster products made from polymer matrix composite reinforced with fiber of durian shell. Design of experiment with Factorial design is applied to find the appropriate parameters. The hypothesis of this research is that the amount of rubber latex, the amount of durian peel fiber and the amount of DPG (Diphenyl Guanidine) have an effect on the percentage of water absorption of the coaster. According to the factorial experimental design, interaction effects of the amount of rubber latex and the amount of durian peel fiber which are observed without considering the main effects. The parameters are identified as follows: the amount of rubber latex is 167 grams, and the amount of durian peel fiber is 2 grams. The amount of DPG does not affect the percentage of water absorption; therefore, the factor value is not specified. The results of the factor determination can estimate the percentage of water absorption as 6.95 percent and the confidence interval of the percentage of water absorption at the confidence level of 0.95 is 0.98 to 12.93. The experimental results are then confirmed by forming coasters according to the factor levels obtained from the experimental design. The results show that the percentage of water absorption is less than the percentage

of water absorption in the experiment with a confidence level of 0.95. The results of this study are useful for developing products using biomaterials and helping to reduce the amount of biowaste.

Keywords: Design of Experiment, Factorial Design, Composite Materials, Fiber of Durian Shell

1. บทนำ

ทุเรียนถูกขนานนามว่าเป็น “ราชาผลไม้ (King of Fruits)” เป็นผลไม้ที่มีกลิ่นเป็นเอกลักษณ์ มีรสชาติดหวานมัน โดยถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มผลไม้ในเขตร้อนชื้น (Tropical Fruits) โดยทุเรียนมีแหล่งปลูกแพร่หลายในพื้นที่ประเทศของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ นั่นคือ ไทย มาเลเซีย อินโดนีเซีย และฟิลิปปินส์ [1, 2] โดยที่ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตทุเรียนที่สำคัญประเทศหนึ่งของโลก [3] อย่างไรก็ตาม ทุเรียนหนึ่งลูกประกอบด้วย เนื้อทุเรียนร้อยละ 28.51 และเปลือกทุเรียน ร้อยละ 71.49 ส่งผลให้มีปริมาณเปลือกทุเรียนเหลือทิ้งจากการบริโภค ตั้งแต่ปี 2554-2565 เฉลี่ย 567,184 ตันต่อปี [4] ซึ่งในปัจจุบันการกำจัดเปลือกทุเรียนเหลือทิ้งจากการบริโภคโดยส่วนมากถูกดำเนินการใน 2 ลักษณะ คือ กองรวมกันเพื่อผลิตเป็นปุ๋ย และฝังกลบโดยหน่วยงานของรัฐบาล อย่างไรก็ตาม การเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกทุเรียนเหลือทิ้งตามวิธีโดยทั่วไปนั้นยังมีมูลค่าไม่สูงนัก งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำเปลือกทุเรียนเหลือทิ้งมาเป็นส่วนประกอบสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกทุเรียนเหลือทิ้ง

ยางพาราเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศชนิดหนึ่ง ซึ่งประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกยางพาราและผลิตภัณฑ์จากยางพารารายใหญ่ของโลกตามรายงานของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ [5] โดยในปี พ.ศ. 2552 ประเทศไทยมีการผลิตยางพารา จำนวน 3.16 ล้านตัน มีการส่งออก จำนวน 2.73 ล้านตัน ผลิตเพื่อใช้ในประเทศ จำนวน 399,415 ตัน ซึ่งสามารถทำรายได้เข้าประเทศได้ปีละกว่า 4,000,000 ล้านบาท แต่การส่งออกยางพาราส่วนใหญ่อยู่ในรูปวัตถุดิบแปรรูปขั้นต้น ซึ่งมีมูลค่าเพิ่มต่ำ เช่น ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง และน้ำยางข้น ทำให้มีผลต่อการสร้างรายได้เข้าสู่ประเทศและการยกระดับรายได้ของเกษตรกรได้ไม่มาก ดังนั้น การศึกษาและพัฒนากระบวนการแปรรูปยางพาราในรูปแบบของอุตสาหกรรมจะทำให้รายได้เข้าสู่ประเทศเพิ่มสูงมากขึ้น ซึ่งในปัจจุบัน การแปรรูปยางพาราเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ยางยานพาหนะ ถังมือยางทางการแพทย์ รองเท้าและอุปกรณ์ทางการกีฬา ผลิตภัณฑ์ฟองน้ำ หมอนยางพารา ที่นอนยางพารา ฯลฯ ถือว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับยางพาราได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์จากยางพาราที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน สามารถกักหรือปิดได้โดยไม่เสียรูปทรงถาวร หรือที่เรียกว่า ยางฟองน้ำ (Latex Foam Rubber) ซึ่งนิยมผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อรองรับน้ำหนัก จากเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แผ่นรองก้นจากยางพารา

อย่างไรก็ตาม การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แผ่นรองก้นจากยางพาราเพียงอย่างเดียวนั้น ส่งผลต่อการรักษารูปร่าง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แผ่นรองก้นจากวัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) เนื้อพื้นยางพาราซึ่งถือว่าเป็นพอลิเมอร์ (Polymer) ธรรมชาติชนิดหนึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยจากเปลือกทุเรียน ด้วยสมมติฐานงานวิจัยนี้คือ ปริมาณน้ำยางพารา ปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียน และปริมาณสาร DPG มีผลกระทบต่อร้อยละการดูดซึมน้ำของแผ่นรองก้น ทั้งนี้ การออกแบบการทดลองถูกประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แผ่นรองก้นวัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยของเปลือกทุเรียน [6, 7]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นพอลิเมอร์

วัสดุเชิงประกอบ (Composite Material) คือ การนำวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปประกอบเข้าด้วยกันโดยวัสดุที่ผสมเข้าด้วยกันจะต้องไม่ละลายซึ่งกันและกัน วัสดุที่มีปริมาณมากกว่าจะเรียกว่าเป็นวัสดุหลักหรือสารเนื้อพื้น (Matrix) และวัสดุอีกชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดที่กระจายหรือแทรกตัวอยู่ในเนื้อวัสดุหลักเรียกว่า วัสดุเสริมแรง (Reinforcement Material) วัสดุเชิงประกอบสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composite: PMC) วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal Matrix Composite: MMC) และวัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic Matrix Composite: CMC) นอกจากนี้ วัสดุเชิงประกอบอาจแบ่งได้ตามลักษณะของตัวเสริมแรง ได้เป็น วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fibrous Composites) วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particulate Composites) วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงเป็นชั้นหรือชนิดซ้อนแผ่น (Laminar or Layered Composites) [8]

2.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Experiment) เป็นกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีทางสถิติหรืออาจกล่าวได้ว่า การทดลองเชิงแฟคทอเรียล คือ การทดลองที่มีวัตถุประสงค์หลักในการศึกษาถึงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยหรืออันตรกิริยา (Interactions) [9] โดยที่ ค่าสังเกต (Observations) ของการทดลองเชิงแฟคทอเรียลสองปัจจัยถูกสุ่มอย่างสมบูรณ์ สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) ดังสมการที่ 1 [10]

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

เมื่อ μ คือ ผลกระทบเฉลี่ยโดยรวม, τ_i คือ ผลกระทบของระดับ i ของปัจจัย A, β_j คือ ผลกระทบของระดับ j ของปัจจัย B, $(\tau\beta)_{ij}$ คือ ผลกระทบร่วมของระดับ ij ของปัจจัย A และ B, ε_{ijk} คือ ข้อผิดพลาดแบบสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติโดยมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และความแปรปรวน σ^2

2.3 การทดสอบสมมติฐานการทดลอง

การทดสอบสมมติฐานการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ เริ่มต้นจากการพิจารณาผลกระทบร่วมของปัจจัยการทดลอง โดยที่หากผลกระทบร่วมมีนัยสำคัญ ($p\text{-Value} < \alpha$) มีความหมายว่า ผลกระทบร่วมของปัจจัยนั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม และไม่จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลักที่ทำการพิจารณาปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบร่วมการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบสมมติฐานทางสถิติในการทดลองที่มีปัจจัยที่สนใจศึกษา 2 ปัจจัย คือ A และ B ดังรายละเอียดข้างล่าง [11, 12]

1. การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลกระทบหลักของปัจจัย A คือ

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

2. การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลกระทบหลักของปัจจัย B คือ

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

3. การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัย คือ

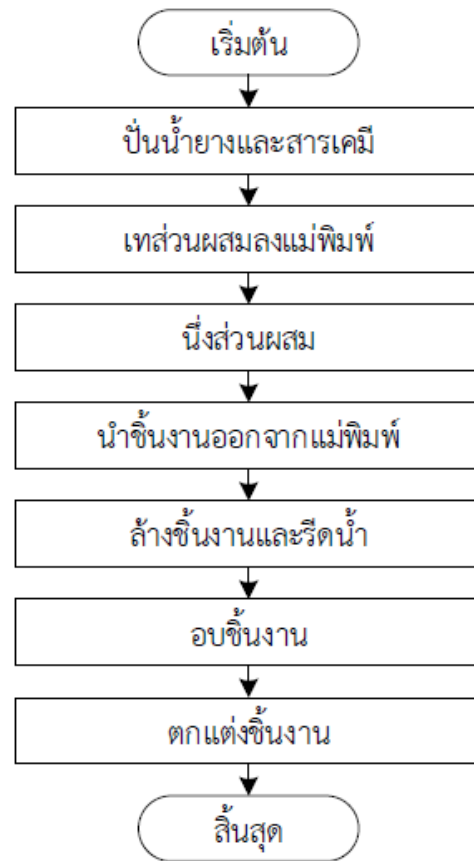
$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 ; \forall i, j$$

$$H_1: (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากยางพารา

ผลิตภัณฑ์จากยางพารามีสมบัติเป็นรูพรุน สามารถกดหรือบิดได้โดยไม่เสียรูปอย่างถาวร หรือที่เรียกว่า ยางฟองน้ำ (Latex Foam Rubber) นิยมผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อรองรับน้ำหนัก เช่น เบาะเก้าอี้ หมอนหนุน ที่นอน ฯลฯ กระบวนการโดยทั่วไปสำหรับการเตรียมยางฟองน้ำ คือ กระบวนการทาลเลย์ (Talalay Process) และกระบวนการดันลอป (Dunlop Process) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ การทำให้น้ำยางเกิดเป็นฟองอากาศ การทำให้น้ำยางที่เป็นฟองอากาศเกิดเป็นเจลในโมล และการวัลคาไนซ์ฟองยางที่ได้ [5] สำหรับองค์ประกอบการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางพารา ประกอบด้วย วัตถุดิบหลักและสารเคมี ดังตารางที่ 1 ทั้งนี้ กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางพารามีขั้นตอนโดยสังเขป ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางพารา [5]

3.2 การกำหนดปัจจัยสำหรับการศึกษา

งานวิจัยนี้ มุ่งเน้นไปที่การหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จานรองแก้วจากวัสดุเชิงประกอบเนื้อฟองยางพาราเสริมแรงด้วยเส้นใยจากเปลือกทุเรียน เพื่อให้สามารถรักษารูปร่างและการดูดซับน้ำที่ต่ำ การกำหนดปัจจัยสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ พิจารณาเฉพาะส่วนผสมสำหรับขึ้นรูปเท่านั้น ซึ่งปัจจัยในการศึกษา คือ ปริมาณเนื้อฟอง (น้ำยางพารา) ปริมาณส่วนผสมเสริมแรง (เส้นใยจากเปลือกทุเรียน) ดังภาพที่ 2 และปริมาณสารเสริมให้เกิดเจล (DPG) ปัจจัยข้างต้นถือว่าเป็นปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) สำหรับส่วนผสมอื่นถูกกำหนดเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) สำหรับการศึกษา การกำหนดระดับปัจจัยดังตารางที่ 2 การกำหนดค่าของระดับปัจจัยสำหรับปริมาณน้ำยางพารา และปริมาณสารเสริมให้เกิดเจลเป็นตามสัดส่วนของสูตรยางสังเคราะห์ชนิดไนไตรล์ [13]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบพื้นฐานในการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางพารา

องค์ประกอบ	ประเภท	รายละเอียด
วัตถุดิบหลัก	น้ำยางพารา	น้ำยางพาราชั้น 60%
สารเคมี	สารทำให้ยางคงรูป	กำมะถัน (Sulphur)
	สารตัวเร่ง	ZDEC (Zinc Diethyl Dithiocarbamate)
	สารเสริมให้เกิดเจล	DPG (Dipropylene Glycol)
	สารกระตุ้น	ZnO (Zinc Oxide)
	สารทำให้เกิดเจล	SSF (Sodium Silicofluoride)

ตารางที่ 2 การกำหนดปัจจัย (Factor) และระดับปัจจัย (Level) สำหรับการทดลอง

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับปัจจัย		หน่วย
		สูง	ต่ำ	
ปริมาณน้ำยางพารา	A	83	167	กรัม
ปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียน	B	2	4	กรัม
ปริมาณสาร DPG	C	0.50	1	กรัม
กำมะถัน	-	2		กรัม
ZDEC	-	1		กรัม
ZnO	-	5		กรัม
SSF	-	1		กรัม



ภาพที่ 2 ลักษณะเส้นใยจากเปลือกทุเรียน

เทคนิคการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) ด้วยโปรแกรม Minitab ถูกประยุกต์ใช้สำหรับการวิจัยนี้ ซึ่งเป็นการทดลองที่ตัวแปรตอบสนองมีค่าผันแปรขึ้นอยู่ กับผลกระทบจากปัจจัยมากกว่าหนึ่งปัจจัย โดยกำหนดระดับ ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยกำหนดการ ทำซ้ำ 4 รอบ ดังนั้น จำนวนการทดลองทั้งสิ้นเป็นไปตามสมการที่

2

จำนวนการทดลอง=ผลคูณของระดับปัจจัยทุกปัจจัย

$$\times \text{จำนวนครั้งที่ทำซ้ำ} \quad (2)$$

$$\text{จำนวนการทดลอง} = 2^3 \times 4 = 32 \text{ การทดลอง}$$

4.ผลการดำเนินงานวิจัย

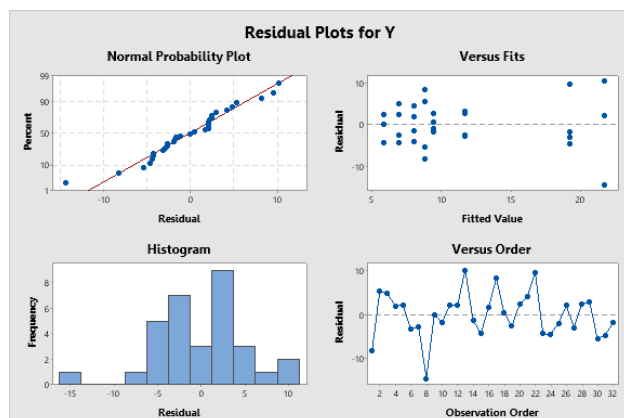
การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) ถูกประยุกต์ใช้สำหรับกำหนดระดับของปัจจัย ที่เหมาะสมต่อการทดลองดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2 โดยงานวิจัย นี้กำหนดตัวแปรต้น (Independent Variables) คือ ปริมาณน้ำ ยางพารา ปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียน และปริมาณสาร DPG ดังตารางที่ 2 ตัวแปรตาม (Dependent Variable) คือ ร้อยละ การดูดซึมน้ำ ดังสมการที่ 3 โดยกำหนดให้จานรองแก้วต้องมีร้อยละการดูดซึมน้ำที่ต่ำ ทั้งนี้ การทดลองและตรวจสอบสถานะของ การปฏิบัติงานต้องเป็นไปตามลำดับของการทดลอง (Run Order) ซึ่งประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด 32 การทดลอง ($2^3 \times 4$) ด้วยระดับความเชื่อมั่น 0.95

ร้อยละการดูดซึมน้ำ=(น้ำหนักหลังแช่น้ำ-น้ำหนักก่อน แช่น้ำ)/ น้ำหนักก่อนแช่น้ำ (3)

4.1 การทดสอบข้อมูล

การวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลองนี้สามารถ วิเคราะห์ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ดังภาพที่ 3 สามารถสรุป ได้ดังนี้

1. เส้นกราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่า ข้อมูลจากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) ของ ค่าความผิดพลาด (Residuals)
2. การกระจายตัวของข้อมูลแบบสุ่มจากค่าศูนย์ แสดงว่า ข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน
3. รูปแบบของฮิสโตแกรม (Histogram) มีการกระจายตัว จากค่าเฉลี่ยเกือบจะสมมาตร ถือได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัว แบบปกติ
4. ลักษณะของข้อมูลเป็นรูปแบบไม่มีแนวโน้ม รวมถึงมี การกระจายตัวรอบค่าศูนย์ แสดงว่า ข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 3 การทดสอบข้อมูล

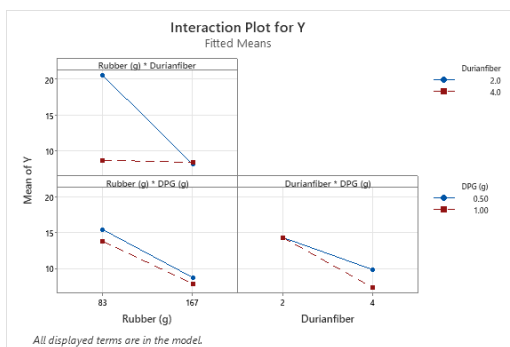
4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์และสรุปผลโดยการประยุกต์ใช้โปรแกรม สำเร็จรูปทางสถิติ โดยพิจารณาผลกระทบของปัจจัยหลักและ

ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าตอบสนองที่ระดับความเชื่อมั่น 0.95 ($\alpha = 0.05$) พบว่า ปัจจัยร่วม Rubber * Durian Fiber มีค่า p-value น้อยกว่าค่า α หมายถึง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำยางพารา และปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียนมีผลกระทบต่อร้อยละการดูดซึมน้ำ จากนั้น ทำการพิจารณาปัจจัยเดี่ยว พบว่า ปริมาณน้ำยางพาราและปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียนมีค่า p-value น้อยกว่าค่า α หมายถึง ปริมาณน้ำยางพารา และปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียนมีผลกระทบต่อร้อยละการดูดซึมน้ำ สำหรับปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมอื่นไม่มีผลกระทบต่อร้อยละการดูดซึมน้ำ ดังตารางที่ 3

4.3 การวิเคราะห์ระดับปัจจัย

จากตารางที่ 3 พบว่า ผลกระทบร่วมของปริมาณน้ำยางพาราและปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียนมีอันตรกิริยาร่วมกัน ค่า P-Value ของผลกระทบร่วมมีค่าน้อยกว่า α ดังนั้น จึงไม่ทำการพิจารณาผลกระทบหลัก การกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมจึงกำหนดโดยการพิจารณาจากพล็อตอันตรกิริยา ดังภาพที่ 4 จึงควรกำหนดค่าของปัจจัย ดังนี้ ปริมาณน้ำยางพารา คือ 167 กรัม ปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียน คือ 2 กรัม



ภาพที่ 4 พล็อตอันตรกิริยา

ฟังก์ชัน Response Optimization ถูกใช้สำหรับคาดการณ์ร้อยละการดูดซึมน้ำจากค่าของปัจจัยที่ถูกกำหนด ดังภาพที่ 5 พบว่า ค่าคาดการณ์ร้อยละการดูดซึมน้ำ คือ ร้อยละ 6.95 และที่

ช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval) ร้อยละ 95 ค่าคาดการณ์ร้อยละการดูดซึมน้ำ คือ 0.98 ถึง 12.93

Multiple Response Prediction

Variable	Setting
Rubber (g)	167
Durianfiber (g)	2
DPG (g)	1

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Y	6.95	2.90	(0.98, 12.93)	(-6.41, 20.32)

ภาพที่ 5 การทำนายการตอบสนองหลายรายการ

4.4 การยืนยันผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ขึ้นรูปแผ่นรองแก้วตามระดับของปัจจัยที่เหมาะสม ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ จำนวน 10 ชิ้น ดังภาพที่ 6 เพื่อยืนยันผลการทดลอง ด้วยการทดสอบสมมติฐานการทดลอง ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.95 นั่นคือ

H_0 : ร้อยละการดูดซึมน้ำยืนยันผลไม่แตกต่างจากการทดลอง

H_1 : ร้อยละการดูดซึมน้ำยืนยันผลมากกว่าร้อยละการดูดซึมน้ำจากการทดลอง

ผลจากการทดสอบสมมติฐาน พบว่า P-Value=0.000 ซึ่งมีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ ดังภาพที่ 7 นั่นคือ ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก หรือร้อยละการดูดซึมน้ำยืนยันผลมีค่าน้อยกว่าร้อยละการดูดซึมน้ำที่ได้ผลจากการทดลอง



ภาพที่ 6 แผ่นรองแก้วยางพาราเสริมแรงด้วยเส้นใย

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยเดี่ยวและปัจจัยร่วม

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	959.72	137.102	4.09	0.004
Linear	3	592.93	197.645	5.90	0.004
Rubber (g)	1	318.14	318.143	9.49	0.005
Durianfiber (g)	1	262.25	262.252	7.82	0.010
DPG (g)	1	12.54	12.540	0.37	0.547
2-Way Interactions	3	299.96	99.985	2.98	0.051
Rubber (g)*Durianfiber (g)	1	286.26	286.262	8.54	0.007
Rubber (g)*DPG (g)	1	1.17	1.166	0.03	0.854
Durianfiber (g)*DPG (g)	1	12.53	12.528	0.37	0.547
3-Way Interactions	1	66.83	66.826	1.99	0.171
Rubber (g)*Durianfiber (g)*DPG (g)	1	66.83	66.826	1.99	0.171
Error	24	804.58	33.524		
Total	31	1764.30			

Test

Null hypothesis	$H_0: \mu = 6.95$
Alternative hypothesis	$H_1: \mu < 6.95$
T-Value	P-Value
-196.96	0.000

ภาพที่ 7 การทดสอบสมมติฐานเพื่อยืนยันผล

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แผ่นรองแก้ววัสดุเชิงประกอบเนื้อฟีนอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยจากเปลือกทุเรียน ด้วยการประยุกต์ใช้แนวคิดการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Experiment) โดยกำหนดระดับของแต่ละพารามิเตอร์เป็น 2 ระดับ ซึ่งสมมติฐานงานวิจัยนี้ คือ ปริมาณน้ำยางพารา ปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียน และปริมาณสาร DPG มีผลกระทบต่อร้อยละการดูดซึมน้ำของแผ่นรองแก้ว จึงกำหนดให้ปริมาณน้ำยางพารา ปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียน และปริมาณสาร DPG เป็นพารามิเตอร์ในการศึกษา

จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล พบว่า ผลกระทบร่วมของปริมาณน้ำยางพาราและปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียนมีอันตรกิริยาร่วมกัน ดังนั้น ปริมาณน้ำยางพารา คือ 167 กรัม ปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียน คือ 2 กรัม จึงถูกกำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยไม่พิจารณาผลกระทบหลักจากปัจจัยปริมาณสาร DPG ซึ่งค่าคาดการณ์ร้อยละการดูดซึมน้ำจากผลการทดลอง คือ ร้อยละ 6.95 และที่ช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval) ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.95 ค่าคาดการณ์ร้อยละการดูดซึมน้ำ คือ 0.98 ถึง 12.93 จากนั้น ทำการยืนยันผลการทดลองโดยการขึ้นรูปแผ่นรองแก้วตามระดับปัจจัยที่ได้จากการออกแบบการทดลอง พบว่า ร้อยละการดูดซึมน้ำยืนยันผลมีค่าน้อยกว่าร้อยละการดูดซึมน้ำที่ได้ผลจากการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 0.95

อย่างไรก็ตาม การศึกษาในอนาคตจะพิจารณาความแตกต่างของส่วนเสริมแรง นั่นคือ ส่วนเสริมแรงจากเปลือกทุเรียนในลักษณะอื่น เช่น การเสริมแรงแบบอนุภาค การเสริมแรงด้วยเส้นใยยาว ฯลฯ นอกจากนี้ ผลการทดลองในงานวิจัยนี้เหมาะสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ตัวอย่างเท่านั้น หากพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อื่นควรพิจารณาถึงผลกระทบของปัจจัยอีกครั้ง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ตามรหัสโครงการวิจัย เลขที่ KUSRCBR67-2014

7. เอกสารเอกสารอ้างอิง

- [1] Ho LH, Bhat R. Exploring the potential nutraceutical values of durian (*Durio zibethinus* L.) - an exotic tropical fruit. *Food Chem.* 2015;168:80-9.
- [2] Thiyajai P, Charoenkiatkul S, Kulpradit K, et al. Nutritional composition of indigenous durian varieties. *Malaysian Journal of Nutrition.* 2020;26(1):93-99.
- [3] Mustaffa MR, Xin Yi N, Abdullah LN, et al. Durian Recognition Based on Multiple Features and Linear Discriminant Analysis. *Malaysian Journal of Computer Science.* 2018;Special Issue:57-72.
- [4] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ผลพยากรณ์ผลผลิต ทุเรียน ปี 2567. [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ:กระทรวงเกษตรและสหกรณ์;2567 [เข้าถึงเมื่อ 27 เมษายน 2567]. จาก: <https://www.oae.go.th/>.
- [5] ประภาพรณ เกษราพงศ์, จักรินทร์ กลั่นเงิน,จักรพันธ์ จันภิรม, และคณะ. การพัฒนาต้นแบบเครื่องขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางพารา. การประชุมวิชาการราชชมคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 7; 6-8 กรกฎาคม 2565; นครราชสีมา; 2565. น.870-876.
- [6] Toapanta QG, Paredes J, Meneses M, Salinas G. Validation of DOE Factorial/Taguchi/Surface Response Models of Mechanical Properties of Synthetic and Natural Fiber Reinforced Epoxy Matrix Hybrid Material. *Polymers (Basel).* 2024;16(14):1-21.
- [7] Miyahara RY, Melquiades FL, Ligowski E, et al. Preparation and characterization of composites from plastic waste and sugar cane fiber. *Polimeros.* 2018;28(2):147-154.
- [8] Callister WD. *Materials science and engineering an introduction.* 6th ed. John Wiley & Sons (Asia) Pte. Ltd.; 2003.
- [9] Montgomery DC. *Design and analysis of experiments.* 10th ed. USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2019.
- [10] Montgomery DC, Runger GC. *Applied statistics and probability for engineers.* 3rd ed. USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2002.
- [11] จักรินทร์ กลั่นเงิน, อนุเชษฐ์ พลเยี่ยม. การควบคุมคุณภาพกระบวนการผลิตเนื้อสุป้เหลวดด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต.* 2558;5(1):1-12.
- [12] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด; 2551.

- [13] พลวัน เจริญธรรมชัย. เทคโนโลยียางและผลิตภัณฑ์โฟมยางธรรมชาติ. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา; 2566

การเปรียบเทียบสมรรถนะของเตาจรรูปรูท L และรูปทรงแจก V และการเพิ่มสมรรถนะโดย การปรับปรุงห้องเผาไหม้และช่องป้อนเชื้อเพลิง

Comparison of Performance of L-shaped and V-shaped Rocket Stoves and Performance Enhancement by Improving Combustion Chamber and Fuel Inlet

พลชัย ขาวนวล¹ สุณารี บดีพงษ์^{2*} สมบูรณ์ ประสงค์จันทร์¹ และ โกสินทร์ ทีปักษ์พันธุ์¹
Palachai Khaonuan¹ Sunaree Bordeepong^{2*} Somboon Prasongchan¹ and Kosin Teeparuksapun¹

¹สาขาศึกษาทั่วไป คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹Department of General Education, Faculty of Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Srivijaya

²สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดปัตตานี

²Department of Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani

*Corresponding author Email: sunaree.b@psu.ac.th

Received: 23-02-2025 Revised: 26-06-2025 Accepted: 30-06-2025

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะเตาจรรูปรูท L และรูปทรงแจก V จากนั้นนำไปพัฒนาเสริมห้องเผาไหม้และขยายช่องป้อนเชื้อเพลิงให้มีสมรรถนะที่สูงขึ้น และสามารถใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น สำหรับวิธีการวิจัยนั้นดำเนินการสร้างเตาจรรูปรูท L และรูปทรงแจก V จากนั้นทดสอบสมรรถนะด้วยวิธีการต้มน้ำเดือด เมื่อได้เตาจรรูปรูทที่มีสมรรถนะที่ดีกว่าแล้วนำเตาจรรูปรูทดังกล่าวไปพัฒนาให้มีสมรรถนะและใช้งานได้ดียิ่งขึ้นและทำการทดสอบเตาด้วยวิธีการต้มน้ำเดือดเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเตาจรรูทดั้งเดิมและแบบที่พัฒนาแล้ว ผลการวิจัยพบว่าเตาจรรูปรูท L มีสมรรถนะที่ดีกว่าเตาจรรูปรูท V จากนั้นนำเตาจรรูปรูท L ไปพัฒนาโดยการเปิดและขยายช่องป้อนเชื้อเพลิง และสวมห้องเผาไหม้สำหรับเสริมการเผาไหม้ครั้งที่ 2 ที่บริเวณปากเตา จากผลการทดสอบพบว่า การเปิดช่องป้อนเชื้อเพลิงทำให้ใช้งานเตาจรรูทได้สะดวกขึ้น และการพัฒนาเตาจรรูท L (L-shaped (version 2) rocket stove) โดยการเปิดและขยายช่องป้อนเชื้อเพลิงรวมถึงเสริมช่องอุ่นอากาศเพื่อการเผาไหม้ครั้งที่ 2 และลดขนาดห้องเผาไหม้ทำให้มีค่าสมรรถนะที่ดีกว่าเตาจรรูท L แบบดั้งเดิม และเตาจรรูท V โดยเตาจรรูท L ที่พัฒนามีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเตาจรรูท V 40.36% และสูงกว่าเตาจรรูท L แบบดั้งเดิม 5.73% ในส่วนของเวลาต้มน้ำเดือดนั้นโดยเตาจรรูท L ที่พัฒนาใช้เวลาน้อยกว่าเตาจรรูท V 33.61% และใช้เวลาน้อยกว่าเตาจรรูท L แบบดั้งเดิม 24.44% เนื่องจากการสวมห้องเผาไหม้สำหรับเสริมการเผาไหม้ครั้งที่ 2 ที่บริเวณปากเตาและการขยายช่องป้อนเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มให้อากาศเข้าไปช่วยในการเผาไหม้ที่มากขึ้น เตาจรรูท L ที่ทำการพัฒนาขึ้นมาเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความร้อนสูงและรวดเร็ว

คำสำคัญ : เตาจรรูท, ชีวมวล, การทดสอบด้วยวิธีต้มน้ำเดือด, พลังงานหมุนเวียน

ABSTRACT

This research aims to study the performance of L-shaped and V-shaped rocket stoves and then modifying the combustion chamber and fuel inlet to achieve higher performance and more convenient use. For the research method, L-shaped and V-shaped rocket stoves were built and their performance was tested using the water boiling test method (WBT). When the rocket shape with better performance was obtained, the rocket stove shape was further developed by modifying the combustion chamber and fuel inlet. The rocket stove was tested using the water boiling test method to compare the performance between the original and the developed rocket stove shapes. The results showed that the L-shaped rocket stove had better performance than the V-shaped rocket stove. The L-shaped rocket stove (L-shaped (version 2) rocket stove) was then developed by opening and enlarging the biomass fuel inlet and installing a combustion chamber for the secondary combustion at the top of L-shaped rocket stove. The test results show that opening the fuel inlet makes the L-shaped (version 2) rocket stove more convenient to use. The development of the L-shaped (version 2) rocket stove by opening and expanding the fuel inlet, adding an air preheating channel for secondary combustion and reducing the size of the combustion chamber results in a better performance than the L-

shaped (traditional) rocket stove and V-shaped rocket stoves. The L-shaped (version 2) rocket stove has a thermal efficiency value that is 40.36% higher than the V-shaped rocket stove and 5.73% higher than the L-shaped (traditional) rocket stove. In terms of boiling time, the L-shaped (version 2) rocket stove takes 33.61% less time than the V-shaped rocket stove and 24.44% less time than the conventional L-shaped (traditional) rocket stove due to the installation of a combustion chamber for the secondary combustion at the top of the stove and the expansion of the fuel inlet to increase air to combustion chamber. The L-shaped (version 2) rocket stove is suitable for applications that require high and fast heat.

Keyword: rocket stove, biomass, water boiling test, renewable energy

1. บทนำ

พลังงานหมุนเวียน (renewable energy) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของพลังงานทดแทน เป็นพลังงานที่ใช้แล้วไม่หมดไป สามารถนำกลับมาใช้ใหม่และสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ แหล่งพลังงานหมุนเวียนได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานคลื่น พลังงานชีวมวล พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง พลังงานความร้อนจากมหาสมุทร เป็นต้น [1] ชีวมวล (biomass) เป็นสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานได้ สารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่าง ๆ เช่น เศษไม้ ขยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร [2] พลังงานชีวมวลเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพในประเทศไทย โดยเชื้อเพลิงจากพลังงานชีวมวลเป็นแหล่งให้ความร้อนและแสงสว่างที่สำคัญของมนุษย์สำหรับใช้ในชีวิตประจำวัน ปัจจุบันแหล่งพลังงานชีวมวลมีความสำคัญเป็นลำดับต้น ๆ ของประเทศเกษตรกรรมและประเทศกำลังพัฒนา ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่มาจากแหล่งที่ไม่มีวันหมดไป โดยเฉพาะวงจรการผลิตชีวมวล คือ วงจรของพืชที่มีระยะเวลานาน โดยข้อดีของการนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงาน คือ การไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก เนื่องจากการเป็นหมุนเวียนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ชีวมวล และต้นไม้จะดึงเอาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมาใช้ในการเจริญเติบโตต่อไป [3] สำหรับสถานการณ์ด้านพลังงานทดแทนในประเทศไทย พลังงานชีวมวลเป็นพลังงานทดแทนอันดับ 1 ของประเทศ ถือเป็นพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูงมาก เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ประชาชนมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม นอกจากจะได้ผลผลิตทางการเกษตรแล้วยังได้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต่าง ๆ เช่น แกลบ ฟางข้าว กิ่งไม้ เป็นต้น ซึ่งสามารถนำสิ่งเหล่านี้มาแปรรูปเป็นพลังงานทดแทนได้ ซึ่งเป็นการส่งเสริมและพัฒนาพลังงานทดแทน โดยนโยบายของกระทรวงพลังงานได้กำหนดยุทธศาสตร์ชาติเพื่อส่งเสริมการพัฒนาพลังงานทดแทนในปี 2558 – 2579 ยุทธศาสตร์ที่ 2 การเพิ่มศักยภาพการผลิต การใช้ และตลาดพลังงานทดแทน มีเป้าประสงค์ผลักดันความสามารถในการผลิตและความต้องการพลังงานทดแทน กลยุทธ์ 2.1 สนับสนุน

ครัวเรือนและชุมชนให้มีส่วนร่วมในการผลิตการใช้พลังงานทดแทน โดยในการผลิตความร้อน เป็นการส่งเสริมการใช้วัสดุ อุปกรณ์ ผลิตความร้อนประสิทธิภาพสูงในครัวเรือน เช่น เตาถ่าน เตาแก๊ส หุงต้มประสิทธิภาพสูง เตาวิสาหกิจชุมชน เป็นต้น เตาชีวมวล (biomass stove) คือ เตาที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ กระบวนการเผาไหม้ของเตาชีวมวลเป็นแก๊สชีวมวลเป็นการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบอ็อกซิเจน ขั้นตอนการผลิตแก๊สชีวมวล ประกอบด้วย ปฏิกิริยาการเผาไหม้ ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ไพโรไลซิส (pyrolysis) และการอบแห้ง (drying) เป็นต้น โดยเตาชีวมวลสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท ได้แก่ 1) เตาจรวด (rocket stove) เป็นเตาชีวมวลที่สามารถใช้แท่งชีวมวลขนาดยาวและสามารถป้อนแท่งชีวมวลได้อย่างต่อเนื่อง ช่องป้อนเชื้อเพลิงอยู่ด้านข้างเตาใกล้กับตำแหน่งตะแกรงเตา เมื่อป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาจรวด ปลายด้านหนึ่งของแท่งชีวมวลจะอยู่บนตะแกรงในห้องเผาไหม้ 2) เตาชีวมวล top-lit up-draft (TLUD) เป็นเตาชีวมวลที่ใช้เชื้อเพลิงขนาดเล็ก โดยมีการเผาไหม้ 2 ครั้ง ได้แก่การเผาไหม้ในห้องเผาไหม้และการเผาไหม้บริเวณปากเตาซึ่งเป็นการเผาไหม้ครั้งที่ 2 ทำให้มีการเผาไหม้ที่ดียิ่งขึ้น 3) เตาถ่าน (charcoal stove) เป็นเตาชีวมวลที่ใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ และ 4) เตาที่ใช้แรงลม (force-draft/fan stove) เป็นเตาชีวมวลที่ใช้แรงลมจากพัดลมส่งเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อเสริมการเผาไหม้เชื้อเพลิง เป็นต้น

สำหรับการใช้พลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในห้องเผาไหม้ของเตาชีวมวลนั้นไม่สามารถนำมาใช้งานได้ทั้งหมด เนื่องจากการสูญเสียให้กับสิ่งต่าง ๆ ตามแนวคิดของการสมดุลพลังงาน (energy balance) ของเตาชีวมวลพบว่าพลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลภายในห้องเผาไหม้ชีวมวลนั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ส่วนหนึ่ง และมีการสูญเสียที่เกิดจากกลไกต่าง ๆ ได้แก่ ความร้อนที่สูญเสียไปกับแก๊สไอเสีย ความร้อนที่มีการถ่ายเทไปยังผนังเตา ความร้อนจากคาร์บอนที่ยังเผาไหม้ไม่หมด ความร้อนที่ใช้ในการไล่ความชื้นในเชื้อเพลิงชีวมวล ความร้อนที่สูญเสียในรูปแบบอื่น ๆ เช่น การแผ่รังสีความร้อน การพาความร้อน เป็นต้น [4]

ปัจจุบันการใช้เตาชีวมวลกันอย่างแพร่หลาย เช่น การใช้เตาประหยัดพลังงานสำหรับแปรรูปสมุนไพร ณ วิสาหกิจชุมชนสมุนไพรคุณธรรมวัดคูเต่า จังหวัดสงขลา โดยใช้สำหรับสกัดและเคี้ยวสมุนไพร ทำให้มีกำลังการผลิตยาหม่องเป็น 5,400 ขวดต่อเดือน [5] การใช้เตาชีวมวลประหยัดพลังงานสำหรับการแปรรูปขนมซึ่งน้ำค้างของชุมชนตำบลบางเหรียง อำเภอควนเนียง จังหวัดสงขลา โดยสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลจากเดิมได้ร้อยละ 50 และลดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงได้ถึง 1,000-1,500 บาท/เตา/เดือน [6] การใช้เตาชีวมวลที่ทำจากถัง 200 ลิตร ในการย้อมสีเตยหนามด้วยขมิ้นชัน ซึ่งจากการย้อมสีด้วยเตาชีวมวลพบว่าสามารถย้อมสีเตยหนามได้โดยไม่เป็นการลดสมบัติเชิงกลของเตยหนาม และสามารถนำมาสานขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้อย่างดี [7] การใช้เตาชีวมวลในการอบขนมปังพื้นถิ่นของเอธิโอเปีย โดยพบว่าคุณภาพขนมปังอยู่ในระดับที่ดี มีลักษณะเนื้อสัมผัสและรสชาติที่เหมาะสม [8] เป็นต้น

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาเตาจรวด (rocket stove) เป็นเตาชีวมวลที่ถูกออกแบบมาสำหรับใช้งานทั่วไปโดยใช้ชีวมวลขนาดยาวเป็นเชื้อเพลิง เตาจรวดสามารถสร้างจากอิฐ เหล็กรีไซเคิล กระเบื้องหรือโลหะแผ่นเหล็กที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไป [9] เตาจรวด ประกอบด้วย ปล่องไฟ ห้องเผาไหม้ ช่องป้อนเชื้อเพลิง และที่วางภาชนะ โดยมีหลักการทำงานคือ เมื่อทำการจุดเตาแล้ว ไฟในห้องเผาไหม้จะได้รับอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของของเตา พลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลถูกส่งผ่านปล่องไฟและออกทางปลายด้านบนเพื่อนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ [10] เตาชนิดนี้มีจุดเด่นคือ สามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีขนาดยาวและการเตรียมเชื้อเพลิงได้ง่ายกว่าเตาชีวมวลประเภทอื่น เช่น เตา TLUD มาตรฐาน เตา TLUD ดั้งเดิม เตาปากยื่น และเตากลั่น เป็นต้น ดังนั้นผู้วิจัยมีความสนใจในการศึกษา ออกแบบและพัฒนาเตาจรวด 2 รูปแบบ โดยจำแนกจากการทำมุมของช่องป้อนเชื้อเพลิง ได้แก่ รูปทรง L (L shaped) และรูปทรง V (V shaped) โดยทั้ง 2 รูปทรงนี้ช่องป้อนเชื้อเพลิงทำมุมกับแนวระนาบ 0° และ 45° ตามลำดับ ซึ่งเตาจรวดทั้ง 2 รูปทรงนี้อาจจะมีสมรรถนะที่แตกต่างกันไป ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมาในข้างต้นนี้ ในการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะของเตาจรวดรูปทรง L และรูปทรง V ได้แก่ ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะ อัตราการเผาไหม้ กำลังไฟ และเวลาดำเนินการต้มน้ำเดือด จากนั้นนำเตาจรวดรูปทรงที่มีสมรรถนะดีที่สุดมาพัฒนาโดยการเสริมห้องเผาไหม้และขยายช่องป้อนเชื้อเพลิงให้มีสมรรถนะที่สูงขึ้น และสามารถใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยเรื่องการเพิ่มสมรรถนะเตาจรวดด้วยการเสริมห้องเผาไหม้และขยายช่องป้อนเชื้อเพลิง มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

2.1 การเตรียมชีวมวลสำหรับเตาจรวด

ชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง คือ กิ่งไม้ยางพาราซึ่งมีค่าความร้อนต่ำ (lower heating value; LHV) เท่ากับ 15,472 kJ/kg ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 cm ยาว 45 cm ทำการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Binder : Germany) ที่อุณหภูมิ 108 – 110 °C เป็นเวลา 16 h เพื่อไล่ความชื้นที่แทรกซึมในเนื้อชีวมวลให้หายไป เนื่องจากชีวมวลที่มีความชื้นจะส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของค่าสมรรถนะเตาได้ [11] จากนั้นนำกิ่งไม้ยางพาราที่ได้เก็บในภาชนะปิด และทำการปิดให้สนิทเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นในอากาศเข้าไปได้

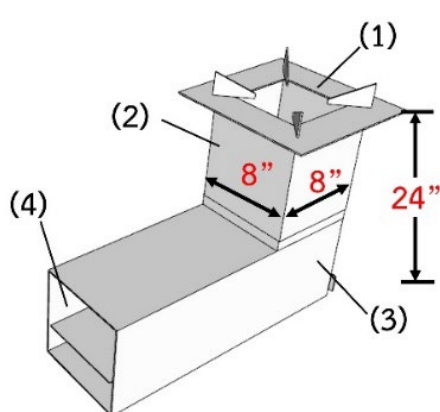
2.2 การศึกษาและออกแบบเตาจรวดต้นแบบ

การออกแบบเตาจรวดต้นแบบจะทำการออกแบบเป็น 2 รูปทรง ดังภาพที่ 1 ได้แก่ รูปทรง L (L-shaped) และ V (V-shaped) โดยเตาจรวดทั้ง 2 รูปทรงทำจากแผ่นเหล็กหนา 1.2 mm เตาจรวดรูปทรง L มีลักษณะทิศทางการป้อนอากาศเข้าภายในเตาและช่องป้อนเชื้อเพลิงทำมุม 0° กับแนวระดับ ส่วนเตาจรวดรูปทรง V มีลักษณะทิศทางการป้อนอากาศเข้าภายในเตาและช่องป้อนเชื้อเพลิงเอียงทำมุม 45° กับแนวระดับ ดังภาพที่ 1 (ก) และภาพที่ 1 (ข) ตามลำดับ โดยเตาจรวดต้นแบบทั้ง 2 รูปทรงประกอบด้วย (1) ที่วางภาชนะขนาดกว้าง 12" ยาว 12" (2) ปล่องไฟขนาดกว้าง 8" ยาว 8" สูง 24" (3) ห้องเผาไหม้กว้าง 8" ยาว 8" (4) ช่องป้อนเชื้อเพลิงขนาดกว้าง 8" ยาว 16" สูง 5"

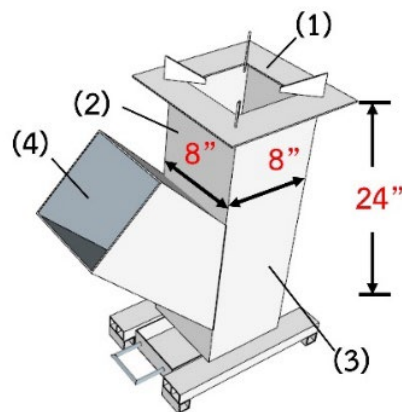
2.3 การทดสอบสมรรถนะเตาจรวด

ทดสอบสมรรถนะเตาจรวด ใช้วิธีทดสอบการเดือดของน้ำ (water boiling test; WBT) โดยใช้ น้ำ 5 kg เชื้อเพลิงเป็นกิ่งไม้ยางพาราที่เตรียมไว้แล้วในขั้นตอน 2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของเตาจรวด ได้แก่ ดิจิทัลเทอร์โมมิเตอร์ (Fluke 54-2B) และโพรบชนิด k Fluke 80pk-22 ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิในช่วง 40 - 1,090 °C มาใช้ในการวัดอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการต้มเพื่อใช้ในการคำนวณค่า

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยการวางปลายโพรบวัดอุณหภูมิในภาชนะต้มที่เป็นอะลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 cm ณ ตำแหน่งตรงกลางก้นภาชนะ และสูงจากก้นภาชนะเป็นระยะ 3 cm สำหรับการคำนวณมวลเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ และมวลของน้ำก่อนและหลังการทดสอบ โดยใช้เครื่องชั่งดิจิทัล (DRC-15) สามารถชั่งได้สูงสุด 15 kg ความละเอียด 0.5 g ผลการทดสอบจะ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1 ภาพวาดเตาจรวด (ก) รูปทรง L (ข) รูปทรง V

ถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะ อัตราการเผาไหม้ และกำลังไฟ

ในการทดสอบสมรรถนะของเตาจรวดนั้น ทำการทดสอบภายใต้บริเวณที่มีกำบังลมเพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานความร้อนที่เกิดจากลมพัด ชั่งน้ำ 5 kg ใส่ลงในภาชนะอลูมิเนียม เส้นผ่านศูนย์กลาง 28 cm จากนั้นทำการใส่เชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านการอบแห้งแล้วในเตาจรวด จุดไฟและรอระยะเวลา 2 min เพื่อให้ไฟติดดี จากนั้นนำภาชนะที่บรรจุแล้วมาวางบนเตาจรวด โดยวางปลายโพรบสำหรับวัดอุณหภูมิที่ตรงกลางกันภาชนะ และสูงจากกันภาชนะ 3 cm และทำการบันทึกค่าด้วย data logger ของเทอร์โมมิเตอร์ เมื่อน้ำเข้าสู่จุดเดือดให้ทำการตักน้ำต่อไปเป็นระยะ 45 min เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้วให้ยกภาชนะออกจากเตาจรวดทำการดับเตาโดยการดึงเชื้อเพลิงออก ซึ่งเชื้อเพลิงที่เหลือ และขี้เถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้เพื่อคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ เมื่อน้ำที่อยู่ในภาชนะเข้าสู่อุณหภูมิห้องให้ทำการชั่งเพื่อคำนวณปริมาณไอน้ำที่เกิดจากการทดสอบ

ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบสมรรถนะเตาจรวดทางสถิติ โดยใช้ independent t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ความเชื่อมั่น 95%) โดยค่าที่นำมาทดสอบ ได้แก่

2.3.1 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal efficiency; η) [12] คือความสามารถในการดึงพลังงานความร้อนมาใช้งานของเตาที่มาจากเผาไหม้เชื้อเพลิง คำนวณได้จากสมการ (1)

$$\eta = \left[\frac{4.186m_w(T_f - T_i) + 2260m_v}{f_d \times \text{LHV}} \right] \times 100 \quad (1)$$

โดย η คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน มีหน่วยเป็น % m_w คือ มวลของน้ำ มีหน่วยเป็น kg T_i คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ มีหน่วยเป็น °C T_f คือ อุณหภูมิสูงสุดของน้ำ มีหน่วยเป็น °C m_v คือ มวลของไอน้ำที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็น kg f_d คือ มวลของเชื้อเพลิง มีหน่วยเป็น กิโลกรัม kg LHV คือ พลังงานทางต่ำของเชื้อเพลิง มีหน่วยเป็น kJ/kg

2.3.2 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption; SEC) [13] คือ ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ชีวมวลที่ใช้ผลิตไอน้ำ 1 kg คำนวณได้จากสมการ (2)

$$\text{SEC} = \frac{E_v}{m_v} \quad (2)$$

โดย SEC คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ มีหน่วยเป็น MJ/kg E_v คือ พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ มีหน่วยเป็น MJ

2.3.3 ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะ (specific cost consumption; SCC) [13] คือ ค่าใช้จ่ายของพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ชีวมวลที่ใช้ในการทำให้น้ำ 1 kg กลายเป็นไอน้ำ คำนวณได้จากสมการ (3)

$$\text{SCC} = \frac{C}{m_v} \quad (3)$$

โดย SCC คือ ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะ มีหน่วยเป็น Baht/kg C คือ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน มีหน่วยเป็น Baht

2.3.4 อัตราการเผาไหม้ (burning rate; BR) [14] คือ อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลเทียบกับเวลา คำนวณโดยสมการ (4)

$$R_b = \frac{f_d}{\Delta t_m} \quad (4)$$

โดย R_b คือ อัตราการเผาไหม้ มีหน่วยเป็น g/min Δt_m คือ ช่วงเวลาของการเผาไหม้ในหน่วยนาที่ มีหน่วยเป็น min

2.3.5 กำลังไฟ (firepower; P) [11] เป็นอัตราการใช้พลังงานต่อเวลา คำนวณโดยสมการ (5)

$$P = \frac{E}{\Delta t_s} \quad (5)$$

โดย P คือ กำลังไฟของเตาชีวมวล มีหน่วยเป็น kW E คือ พลังงานที่ใช้ มีหน่วยเป็น kJ Δt_s คือ ช่วงเวลาของการเผาไหม้ในหน่วยวินาที มีหน่วยเป็น s

2.3.6 เวลาในการเดือดของน้ำ (boiling time; BT) เป็นเวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำปริมาตร 5 L เดือด มีหน่วยเป็น min

2.4 การพัฒนาของเตาจรด

นำเตาจรดรูปทรงที่มีค่าสมรรถนะสูงที่สุดมาพัฒนาและปรับปรุงสมรรถนะเชิงความร้อนและการป้อนเชื้อเพลิงด้วยการเสริมห้องเผาไหม้และขยายช่องป้อนเชื้อเพลิง จากนั้นนำไปทดสอบค่าสมรรถนะของเตาโดยวิธีต้มน้ำเดือด

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการดำเนินงานวิจัยการเพิ่มสมรรถนะเตาจรดด้วยการเสริมห้องเผาไหม้และขยายช่องป้อนเชื้อเพลิง สามารถแบ่งออกเป็นทดสอบเตาจรดทรง L และทรง V และการพัฒนาเตาจรดตามวัตถุประสงค์การวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 ผลการวิจัย

3.1.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของเตาจรดทรง L และทรง V

จากการทดสอบเตาจรดรูปทรง L และ V ทั้งสองรูปทรงจากภาพที่ 2 ซึ่งทำการทดสอบสมรรถนะของเตาจรดทั้งสองรูปทรงที่แตกต่างกันเชิงทิศทางการป้อนเชื้อเพลิง เพื่อนำข้อมูลที่ได้นำมาเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของเตาทั้งสองรูปทรง เมื่อประกอบเตาจรดทั้ง 2 รูปทรงเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ได้ดำเนินการทดสอบสมรรถนะของเตาจรดรูปทรง L และรูปทรง V ด้วยวิธีการทดสอบการเดือดของน้ำ ประกอบด้วย ประสิทธิภาพเชิงความร้อน อัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะ อัตราการเผาไหม้ กำลังไฟ และเวลาในการต้มน้ำเดือด



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2 ลักษณะและการทดสอบเตาจรด (ก) รูปทรง L (ข) รูปทรง V

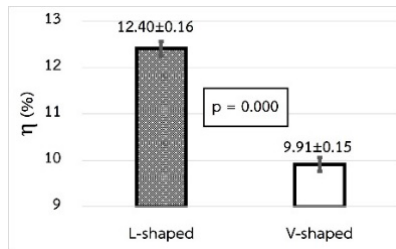
ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 3

- ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน เตาจรดรูปทรง L (12.40 ± 0.16 %) มีค่าที่สูงกว่าเตาจรดรูปทรง V (9.91 ± 0.15 %) ซึ่งผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติด้วยวิธี independent t-test พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาจรดรูปทรง L มีความสามารถในการแปรูปพลังงานชีวมวลเป็นพลังงานความร้อนได้สูงกว่าเตาจรดรูปทรง V

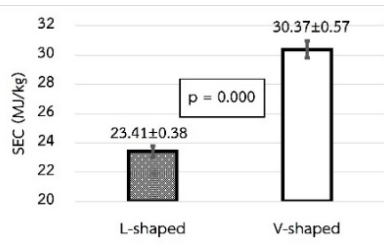
- ค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการใช้พลังงานสร้างไอน้ำ 1 kg โดยที่เตาจรดรูปทรง L (23.41 ± 0.38 MJ/kg) มีค่าต่ำกว่าเตาจรดรูปทรง V (30.37 ± 0.57 MJ/kg) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พบว่า อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเตาจรดรูปทรง L ใช้พลังงานในการสร้างไอน้ำ 1 kg ได้ต่ำกว่าเตาจรดรูปทรง V

- ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะ เตาจรดรูปทรง L มีแนวโน้มที่ดีกว่าเตาจรดรูปทรง V อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยที่เตาจรดรูปทรง L ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะเท่ากับ 1.21 ± 0.02 Baht/kg ในขณะที่เตาจรดรูปทรง V มีค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะเท่ากับ 1.57 ± 0.03 Baht/kg

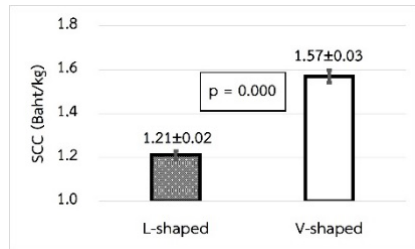
- ค่าอัตราการเผาไหม้ และกำลังไฟของเตาจรดทั้ง 2 รูปทรงมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยเตาเตาจรดทรง V ทำให้มีการสูญเสียพลังงานความร้อนที่น้อยกว่า



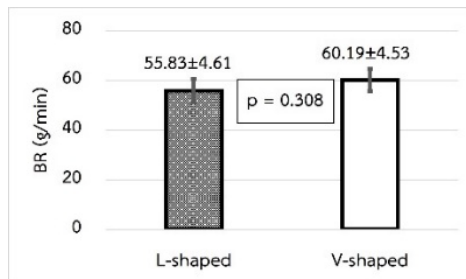
(ก)



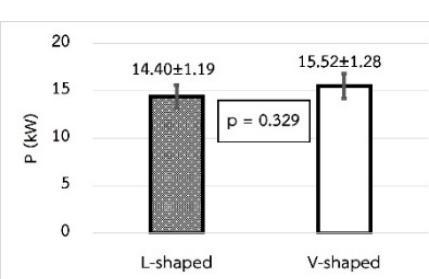
(ข)



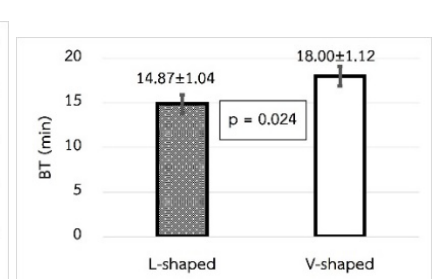
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพที่ 3 สมรรถนะของเตาจรวดทรง L (L-shaped) และทรง V (V-shaped)

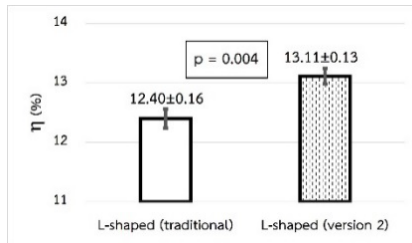
(ก) ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (ข) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (ค) ค่าใช้จ่ายพลังงานงานจำเพาะ (ง) อัตราการเผาไหม้

(จ) กำลังไฟ (ฉ) เวลาต้มน้ำเดือด 3.1.2 ผลการพัฒนาของเตาจรวด

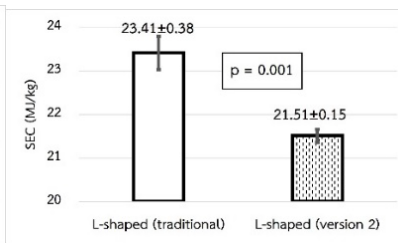
นำเตาจรวดทรง L แบบทั่วไป (L-shaped (traditional)) ดังภาพที่ 4 (ก) มาทำการปรับแต่งดังภาพที่ 4 (ข) โดยการเปิดด้านบนของช่องเชื้อเพลิงให้มีขนาด 12'' (8) เพื่อเพิ่มการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เพิ่มพื้นที่การไหลของอากาศและสะดวกต่อการป้อนเชื้อเพลิง ติดตั้งแผ่นเหล็กเพื่อเป็นช่องกันเปลวไฟเป็นระยะ 5'' (6) เพื่อป้องกันไม่ให้เปลวไฟออกมาจากห้องเผาไหม้ เพิ่มความสูงช่องป้อนเชื้อเพลิงจาก 5'' เป็น 7'' (7) เพื่อเพิ่มอัตราการเผาไหม้เนื่องจากอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทางช่องป้อนเชื้อเพลิง ดังนั้นการเปิดพื้นที่และขยายช่องป้อนเชื้อเพลิงจะเป็นการทำให้อากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ไปช่วยการเผาไหม้ชีวมวลได้มากขึ้น และสวมห้องเผาไหม้จากเดิม 1 ชั้น เป็น 2 ชั้น (5) เพื่อเสริมการเผาไหม้ครั้งที่ 2 ขนาด 6'' x 6'' และทำการทดสอบสมรรถนะเตาจรวดรูปทรง L ที่ทำการพัฒนา (L-shaped (version 2)) ดังภาพที่ 4 (ค)

ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติของผลการทดสอบสมรรถนะของเตาจรวดด้วยวิธี independent t-test โดยพบว่าค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาจรวด L-shaped (version 2) (13.11±0.13 %) มีค่าสูงกว่าเตาจรวด L-shaped (traditional) (12.40±0.16 %) อย่าง

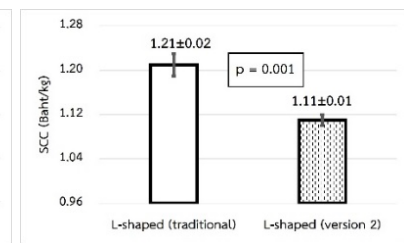
มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเตาจรวด L-shaped (version 2) (21.51±0.15 MJ/kg) มีค่าต่ำกว่าเตาจรวด L-shaped (traditional) (23.41±0.38 MJ/kg) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะของเตาจรวด L-shaped (version 2) (1.11±0.01 Baht/kg) มีค่าต่ำกว่าเตาจรวด L-shaped (traditional) (1.21±0.02 Baht/kg) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ค่าอัตราการเผาไหม้ของเตาจรวด L-shaped (version 2) (61.63±1.26 g/min) และเตาจรวด L-shaped (traditional) (55.83±4.61 g/min) มีค่าไม่ต่างกัน ค่ากำลังไฟของเตาจรวด L-shaped (version 2) (15.89±0.33 kW) และเตาจรวด L-shaped (traditional) (14.40±1.19 g/min) มีค่าไม่ต่างกัน เวลาต้มน้ำเดือดของเตาจรวดรูปทรง L version 2 (11.95±1.48 min) มีค่าต่ำกว่าเตาจรวดรูปทรง L ต้นแบบ (14.87±1.04 min) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



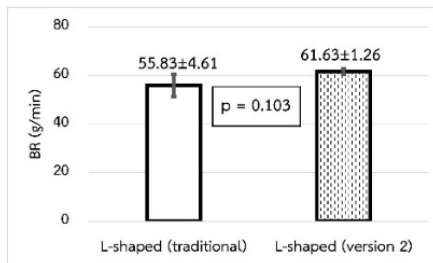
(ก)



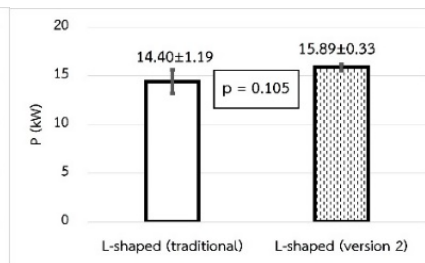
(ข)



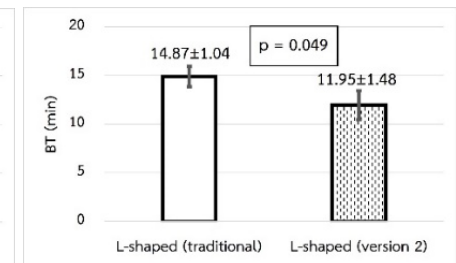
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพที่ 5 เปรียบเทียบสมรรถนะเตาจรวดทรง L-shaped (traditional) และ L-shaped (version 2) (ก) ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (ข) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (ค) ค่าใช้จ่ายพลังงานงานจำเพาะ (ง) อัตราการเผาไหม้ (จ) กำลังไฟ (ฉ) เวลาต้มน้ำเดือด

3.2 อภิปรายผล

3.2.1 สมรรถนะของเตาจรวดทรง L และทรง V

เมื่อนำสมรรถนะเตาจรวดทั้งสองรูปทรงนำมาเปรียบเทียบพบว่า เตาจรวดรูปทรง L มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน ค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะ และเวลาต้มน้ำเดือดดีกว่าเตาจรวดรูปทรง V เนื่องจากเตาจรวดรูปทรง L มีการออกแบบให้ช่องป้อนเชื้อเพลิงทำมุม 90° กับปล่องไฟ ทำให้เปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลในท้องเผาไหม้ไหลขึ้นไปตามปล่องไฟและถ่ายเทพลังงานความร้อนไปยังภาชนะซึ่งตำแหน่งด้านบนของปล่องไฟได้โดยตรง ในทางตรงกันข้ามเตาจรวดรูปทรง V มีการออกแบบให้ช่องป้อนเชื้อเพลิงเอียงทำมุม 45° กับปล่องไฟ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลของเปลวไฟ โดยเปลวไฟบางส่วนมีการไหลย้อนกลับไปทางช่องป้อนเชื้อเพลิงซึ่งไม่ใช่ตำแหน่งที่วางภาชนะ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนบางส่วน ส่งผลให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่าเตาจรวดรูปทรง V ส่วนค่าอัตราการเผาไหม้และกำลังไฟของเตาจรวดรูปทรง L และ V มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเตาทั้งสองมีขนาดท้องเผาไหม้และขนาดปล่องไฟเท่ากัน ทำให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ช่วงระยะเวลาหนึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน อากาศที่เข้าสู่ท้องเผาไหม้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุดังกล่าวส่งผลให้อัตราการเผาไหม้และกำลังไฟของเตาทั้งสองรูปทรงไม่แตกต่างกัน จากงานวิจัยที่ผ่านมา เตาจรวดทรงกระบอกที่ใช้ถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ย 14.51 % [15] เตาจรวดที่ใช้เชื้อเพลิงอัดแท่ง

เป็นเชื้อเพลิงมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน เท่ากับ 14.60 % [16]

จากนั้นเมื่อนำเตาจรวดรูปทรง L ไปเปรียบเทียบกับเตาชีวมวลชนิดอื่น ๆ ได้แก่ เตา TLUD มาตรฐาน เตา TLUD ดั้งเดิม และเตาปากยื่น [17] พบว่า เตาจรวดรูปทรง L มีจุดเด่นเมื่อเทียบกับเตาทั้ง 3 ชนิด ในส่วนของค่าอัตราการเผาไหม้ กำลังไฟ และเวลาต้มน้ำเดือดที่ดีกว่ารวมถึงรูปแบบการป้อนเชื้อเพลิง การเตรียมเชื้อเพลิงที่สะดวกกว่า เมื่อนำเตาจรวดทรง L มาเปรียบเทียบกับเตาขนมจีน [18] ซึ่งเป็นเตาชีวมวลชุมชนตำบลเฉลิมพระเกียรติ อำเภอยะใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่า เตาจรวดทรง L มีจุดเด่นในส่วนของอัตราการเคลื่อนย้ายเตาที่ทำได้สะดวกกว่า และใช้เวลาในการประกอบและติดตั้งเตาสั้นกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเตาแก๊สหุงต้มเชิงพาณิชย์ ได้แก่ เตาแก๊สหุงต้มหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำรุ่น KB-5 และเตาแก๊สหุงต้มประสิทธิภาพสูงรุ่น SG-5 auto ignition [10] พบว่า เตาจรวดรูปทรง L มีค่าเด่นกว่าด้านค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะที่ดีกว่าเตาแก๊สหุงต้มทั้ง 2 รุ่น

3.2.2 การพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาจรวด

จากผลการทดสอบ พบว่า เมื่อนำเตาจรวด L-shaped (traditional) ทำการพัฒนาและปรับปรุงเพิ่มเติม ทำให้สมรรถนะและประสิทธิภาพของเตาจรวด L-shaped (version 2) ได้แก่ ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน ค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะ และเวลาต้มน้ำเดือดดีกว่าเตาจรวด L-shaped (traditional)

เนื่องจากการปรับปรุงเตาจรดทรง L โดยการเพิ่มห้องเผาไหม้เดิม 1 ชั้นให้กลายเป็น 2 ชั้นซึ่งการเพิ่มช่องอุ่นอากาศและช่องอากาศหุติยภูมิทำให้เกิดการเผาไหม้ลำดับสองที่บริเวณปากเตาซึ่งได้ภาชนะที่บรรจุน้ำสำหรับทดสอบสมรรถนะ โดยการเผาไหม้ครั้งที่สองนี้เป็นการจุดแก๊สที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เป็นการเพิ่มการถ่ายเทพลังงานความร้อนไปยังภาชนะที่รับความร้อน ทำให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่พบว่าการจัดให้มีการเผาไหม้ลำดับสองที่บริเวณปากเตาช่วยเสริมการเผาไหม้จะส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น [19] การเปิดด้านบนของช่องป้อนเชื้อเพลิงและและขยายช่องป้อนเชื้อให้มีความกว้างขึ้นกว่าเดิมเป็นการเพิ่มปริมาณอากาศที่เข้าไปช่วยเสริมการเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ ดังนั้นการเพิ่มขนาดช่องป้อนเชื้อเพลิงและเสริมห้องเผาไหม้เป็น 2 ชั้น เพื่อให้มีการเผาไหม้ลำดับสองบริเวณปากเตา ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้มีความเหมาะสมกว่า จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น

3.3.3 การเปรียบเทียบเตาจรดรูปทรง L version 2 กับเตาชีวมวลประเภทอื่น ๆ

เมื่อนำเตาจรด L-shaped (version 2) กับเตาชีวมวลประเภทอื่น ๆ ได้แก่ เตา TLUD พัฒนา [17] medium rocket [20] และ improve cook stove (ICS) [21] ผลปรากฏดังตารางที่ 1 โดยพบว่า เตาจรดรูปทรง L version 2 มีจุดเด่นในเรื่องของความสะดวกต่อการเตรียมเชื้อเพลิง ความสะดวกต่อการป้อนเชื้อเพลิง ความสะดวกต่อการเคลื่อนย้าย กำลังไฟที่สูง และเวลาในการต้มน้ำให้เข้าสู่จุดเดือดได้เร็วกว่าเตาทั้ง 3 แบบ เนื่องด้วยเตาจรดรูปทรง L version 2 ขึ้นมานั้นสามารถใช้กับเชื้อเพลิงขนาดยาวได้ ทำให้ไม่ต้องตัดเชื้อเพลิงชีวมวลหลายครั้งเพื่อให้มีขนาดที่สั้นดังเช่น เตา TLUD พัฒนา และ improve cook stove (ICS) นอกจากนี้เตาจรดรูปทรง L version 2 ถูกออกแบบให้มีความสะดวกต่อการป้อนเชื้อเพลิง ทำให้มีการใช้งานที่ไม่ยุ่งยาก และเตาทำจากแผ่นโลหะ ทำให้สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบเตาจรดรูปทรง L แบบพัฒนา (L-shaped (version 2) กับเตาอื่น ๆ

Performance	เตาจรด L-shaped (version 2)	เตาจรด L-shaped (traditional)	เตา TLUD พัฒนา [17]	medium rocket [20]	improve cook stove (ICS) [21]
ความสะดวกต่อการเตรียม เชื้อเพลิง	✓	✓		✓	
ความสะดวกต่อการป้อน เชื้อเพลิง	✓			✓	
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)	13.11	12.40	25.78	45.4	34.6
ความสะดวกต่อการ เคลื่อนย้าย	✓	✓	✓	✓	✓
กำลังไฟ (kW)	✓ 15.89	14.40	7.19	4.5	5.5
เวลาในการต้มน้ำเดือด (mins)	✓ 11.95	14.87	12.86	17	13

4. สรุปผลการวิจัย

การเปรียบเทียบสมรรถนะเตาจรดรูปทรง L และเตาจรดรูปทรง V พบว่า เตาจรดรูปทรง L มีสมรรถนะที่สูงกว่าเตาจรดรูปทรง V โดย เตาจรดรูปทรง L มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะ เวลาในการต้มน้ำเดือดที่ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญซึ่งมีความแตกต่างเท่ากับ 25.13% 22.92% 22.93 และ 17.39% ตามลำดับ แต่ช่องเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้ยากกว่าเตาจรดรูปทรง V เมื่อนำเตาจรดรูปทรง L มาทำการพัฒนาโดยการเปิดด้านบนของช่องเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ติดตั้งแผ่นเหล็ก

เพื่อเป็นช่องกันเปลวไฟเป็นระยะ 5 นิ้ว เพื่อป้องกันไม่ให้เปลวไฟออกมาจากห้องเผาไหม้ เพิ่มความสูงช่องป้อนเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มอัตราการเผาไหม้ และสวมห้องเผาไหม้สำหรับเสริมการเผาไหม้ครั้งที่ 2 พบว่าเตาจรดรูปทรง L version 2 มีสมรรถนะที่ดีกว่าแบบดั้งเดิมโดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะ และเวลาในการต้มน้ำเดือดที่ดีกว่าเตาจรดรูปทรง L ต้นแบบ อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่าความแตกต่างอยู่ที่ 5.42% 8.12% 8.26% และ 19.64% ตามลำดับ โดยเตาจรดรูปทรง L version 2 ที่ทำการพัฒนานี้มีจุดเด่นในเรื่องของกำลังไฟ อัตราการเผาไหม้ ระยะเวลาในการ

ทำงาน ความสะอาดต่อการเตรียมเชื้อเพลิง ความสะอาดต่อการป้อนเชื้อเพลิง และความสะอาดต่อการเคลื่อนย้าย ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความร้อนสูงและรวดเร็ว เช่น งานอุตสาหกรรมครัวเรือน และผู้ประกอบการที่ต้องการใช้พลังงานความร้อนที่สูง ได้แก่ การฆ่าเชื้อวัสดุเพาะเห็ดด้วยไอน้ำ การต้มสมุนไพรสำหรับอบไอน้ำ การนึ่งข้าวปริมาณมาก การประกอบอาหารปริมาณมากที่ต้องใช้การต้ม การนึ่ง เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2563

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] วรณัฐ แจ้งสว่าง. พลังงานหมุนเวียน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2553.
- [2] โชคชัย เหมือนมาต และ นิรติศัย รักมาก. การปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกะลาปาล์มด้วยกระบวนการทอรีแฟคชันโดยใช้ปฏิกรณ์แบบสกรูลำเลียง. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 2567;29(1):245-265.
- [3] นคร ทิพย์วงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น); 2553.
- [4] Phusrimuang J and Wongwuttanasatian T. Improvements on thermal efficiency of a biomass stove for a steaming process in Thailand. Applied Thermal Engineering. 2016;98:196-202.
- [5] สมบูรณ์ ประสงค์จันทร์, พลชัย ขาวนวล และ นิชา ประสงค์จันทร์. เตาประหยัดพลังงานสำหรับการแปรรูปสมุนไพรวิสาหกิจชุมชนสมุนไพรคุณธรรมวัดคูเต่า จังหวัดสงขลา. วารสารวิจัยเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่. 2564;13(3):180-192.
- [6] สุปรานี วุ่นศรี, นพดล โพธิ์กาเหน็ด และ ภาณุณีย์ สามพิมพ์. การพัฒนาเตาชีวมวลประหยัดพลังงานสำหรับแปรรูปขนมซึ่งน้ำตาลของชุมชนตำบลบางเหริย อำเภอกวนเนียง จังหวัดสงขลา. วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้. 2563;12(1):66-76.
- [7] สุปรานี วุ่นศรี, พลชัย ขาวนวล, นพดล โพธิ์กาเหน็ด และ คณะ. การประยุกต์ใช้เตาชีวมวลชนิด Top-Lit Up-Draft (TLUD) ในการย้อมสีเตยหนามด้วยขมิ้นชัน (*Curcuma longa* L.). วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้. 2566;14(2):167-178.
- [8] Tesfay AH, Tsegay K, Kahsay MB, Hailu MH and Adaramola. Performance comparison of three prototype biomass stoves with traditional and Mirt Stoves for baking Injera. Energy, Sustainability and Society. 2024;14:1-14.
- [9] Khan S, Hossain T and Rahman MM. Development of portable rocket stove and performance evaluation. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2016;12(3):36-44.
- [10] Aljufri, Putra R, Rahman A and Mardian. Design of a portable solid-fuel rocket stove. Jurnal Teknologi. 2024;16(1):153-160
- [11] Huangfu Y, Li H, Chen X, et al. Effect of moisture content in fuel on thermal performance and emission of biomass semi-gasified cookstove. Energy for Sustainable Development. 2014;21:60-65.
- [12] Berrueta VM, Edwards RD and Masera OR. Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. Renewable Energy. 2008;33(5):859-870.
- [13] สมมาส แก้วล้วน, ดำรงค์ศักดิ์ จันทโศ, สุรัชย์ จันทศรี และ คณะ. การทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลขนาด 20 kW. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2556;8(1):24-33.
- [14] Oyelaran OA, Bolaji BO, Waheed MA, et al. Performance Evaluation of the Effect of Binder on Groundnut Shell Briquette. KMUTNB Int J Appl Sci Technol. 2015;8(1):11-19.
- [15] กันยาพร ไชยวงศ์, ณัฐพล วิชาญ, อาริยะ แสนทวีสุข และ คณะ. ผลของอากาศป้อนต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา. 2559;1(1):37-42.
- [16] ธนกร หอมจำปา, คมสันต์ ทองปัญญา, ณัฐพร ธรรมพระอินทร์ และคณะ. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลสำหรับครัวเรือน. วารสาร มทร. อีสาน. 2557;7(2):103-110.
- [17] พลชัย ขาวนวล, สมบูรณ์ ประสงค์จันทร์ และ สุณารี บดีพงศ์. การพัฒนาเตาชีวมวลชนิด TLUD ระดับครัวเรือน. วารสารวิจัยราชชมงคลกรุงเทพ. 2563;14(1):52-62.
- [18] สุปรานี วุ่นศรี, พวงทิพย์ แก้วทับทิม และ นุชลี ทิพย์มณฑา. การพัฒนาเตาประหยัดพลังงานสำหรับชุมชน. วารสารวิจัยราชชมงคลกรุงเทพ. 2561;12(2):8-16.

- [19] Setyawan DL, Pertiwi AP, Sutjahjono H and Iminnafik N. The effect of secondary hole variation on the performance of concentric cylinder top-lit up draft gasifier (TLUD) stove. *Technium*. 2024;22:71-86.
- [20] Bentson S, Evitt D, Lieberman D, et al. Retrofitting stoves with forced jets of primary air improves speed, missions, and efficiency: Evidence from six types of biomass cookstoves. *Energy for Sustainable Development*. 2022;71:104-117.
- [21] Rasoulkhani M, Ebrahimi-Nik M, Abbaspour-Fard MH, et al. Comparative evaluation of the performance of an improved biomass cook stove and the traditional stoves of Iran. *Sustainable Environment Research*. 2018;28:438-443.

การหาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องคัดแยกเมล็ดกาแฟโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล

Finding the optimum conditions for coffee bean sorting using Factorial experimental design

วรพงศ์ พงศ์ภักตวรวิ¹, ณภัทร อินทนันท์^{1*}, พงศธร เติมผล¹, สิริศักดิ์ หอมใส¹ และ อนูปงศ์ ปลั่งกลาง¹
Worapong Phongphattarawat¹, Naphatara Intanon^{1*}, Pongsathon Phadoemphon¹,
Sirisak Homsai¹ and Anupong Plangklang¹

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (วิทยาเขตขอนแก่น)
Department of Industrial Technology, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan (Khon Kaen campus)

*Corresponding author Email: naphatara.in@rmuti.ac.th

Received: 27-02-2025 Revised: 10-06-2025 Accepted: 30-06-2025

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการคัดแยกเมล็ดกาแฟดิบด้วยเครื่องคัดแยกชนิดตะแกรงโยก เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาได้แก่เครื่องคัดแยกเมล็ดกาแฟดิบที่สร้างขึ้น เป็นชนิดตะแกรง 3 ชั้น ขนาดรูตะแกรง 8, 6 และ 3 มิลลิเมตร เมล็ดกาแฟที่ใช้เป็นพันธุ์โรบัสต้า การออกแบบการทดลองเป็นแบบ 3^2 แฟคทอเรียล ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ความเร็วรอบของการโยก 50, 60 และ 70 รอบต่อนาที และระยะของการโยก 20, 30 และ 40 มิลลิเมตร ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Design Expert 365 ผลของการศึกษาพบว่า ความเร็วรอบสูงลดเวลาในการคัดแยก แต่เพิ่มการปนเปื้อนของเมล็ดกาแฟ โดยความเร็วรอบที่เหมาะสมเท่ากับ 70 รอบต่อนาที ระยะโยกเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพของเครื่องเท่ากับ 94.48 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: เมล็ดกาแฟดิบ ตะแกรงโยก การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ประสิทธิภาพการคัดแยก

Abstract

The objective of this research was to identify optimal conditions for separating green coffee bean by screening machine. The equipment utilized in the study was a custom-built coffee screening machine, featuring a 3-layer grid design with grid hole sizes measuring 8, 6, and 3 millimeters respectively. The green coffee bean under investigation is of the Robusta variety. The experimental design employed was 3^2 Factorial Design. The factors investigated in the study were the rotational speed as 50, 60 and 70 rpm., and the stoke range as 20, 30 and 40 millimeters. The findings revealed that high rotational speed reduces separation time. But it increases the contamination of coffee beans. The optimal speed was 70 rpm, with a stoke range of 20 millimeters, resulting in a separation efficiency of 94.48 percent.

Keywords: Green Coffee Bean, Screening machine, Factorial Design, Separated Efficiency

1. บทนำ

กาแฟเป็นพืชเศรษฐกิจตัวใหม่ ที่มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาพืชเศรษฐกิจของไทย [1],[2] ทั้งนี้เพราะปริมาณความต้องการกาแฟทั่วโลก มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปีการผลิต 2565/2566 ทั่วโลกมีความต้องการกาแฟ ประมาณ 10.08 ล้านตัน โดยเพิ่มจากปีการผลิต 2564/2565 คิดเป็น 0.64 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ประเทศที่มีการผลิตและส่งออกเมล็ดกาแฟและกาแฟสำเร็จรูปมากที่สุดได้แก่ประเทศบราซิล มีปริมาณการส่งออกในปีการผลิต 2565/2566 จำนวน 2.20 ล้านตัน ลดลงจากปีก่อน 2.56 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาได้แก่เวียดนาม มีการส่งออก 1.66 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปีก่อนประมาณ 0.12 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประเทศไทย ปริมาณการส่งออกนั้นอยู่ในระดับต่ำ เมื่อเทียบการส่งออกรวมของโลก โดยคิดเป็นร้อยละ 0.28 โดยส่งออกไปให้ประเทศเพื่อนบ้าน

เป็นส่วนใหญ่ได้แก่ ลาว กัมพูชา และพม่า ในขณะที่เดียวกันประเทศไทยมีการนำเข้าเมล็ดกาแฟ จากประเทศเพื่อนบ้านคือมาเลเซีย เวียดนาม และอินโดนีเซีย โดยปริมาณการนำเข้า สูงกว่าปริมาณการส่งออกประมาณ 3 เท่า ในประเทศไทย จะมีการปลูกกาแฟ 2 สายพันธุ์หลักได้แก่ สายพันธุ์อาราบิก้า (Arabica) นิยมปลูกในภาคเหนือ และสายพันธุ์โรบัสต้า (Robusta) นิยมปลูกในภาคใต้ ในปี พ.ศ. 2566 ประเทศไทยมีเนื้อที่ปลูกกาแฟทั้งสิ้นประมาณ 236,000 ไร่ โดย เป็นเนื้อที่ที่ให้ผลผลิตแล้ว 204,000 ไร่ ร้อยละ 54.4 จะเป็นพื้นที่ภาคเหนือ รองลงมาร้อยละ 39.5 เป็นพื้นที่ภาคใต้ และที่เหลือเป็นพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลาง โดยในภาคเหนือ จังหวัดที่มีพื้นที่ปลูกกาแฟมากที่สุดคือ จังหวัดเชียงราย มีพื้นที่ปลูกกาแฟที่ให้ผลผลิตแล้วประมาณ 43,000 ไร่ หรือคิดเป็นร้อยละ 21.08 ของพื้นที่ปลูกที่ให้ผลผลิต

แล้วทั้งหมด หรือร้อยละ 38.7 ของพื้นที่ปลูกกาแฟในภาคเหนือ [3] กระบวนการผลิตกาแฟออกจำหน่ายนั้นมีขั้นตอนที่สำคัญคือการเก็บเมล็ดกาแฟที่แก่ได้ที่ แล้วนำมาตากให้แห้ง เสร็จแล้วนำไปแกะเปลือกหุ้มออก ซึ่งหลังจากแกะเปลือกหุ้มเมล็ดออกแล้วเราจะได้เมล็ดกาแฟดิบ (Green coffee bean) หรือเรียกกันทั่วไปว่า “สารกาแฟ” เกษตรกรผู้ปลูกกาแฟส่วนใหญ่มักจะนำสารกาแฟออกจำหน่าย ให้กับบริษัทที่จะนำไปแปรรูปต่อไป ซึ่งก่อนการจำหน่ายนี้เกษตรกรก็จะคัดแยกสิ่งแปลกปลอมเช่น ก้อนหิน ดิน หรือเศษไม้ ออกไปก่อน เพราะการมีสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ปนอยู่จะถือว่าเป็นกาแฟคุณภาพต่ำ มีราคาถูกเมื่อเทียบกับกาแฟที่ไม่สิ่งแปลกปลอมปนอยู่ อย่างไรก็ตามการคัดแยกเมล็ดกาแฟของเกษตรกรนั้นส่วนใหญ่จะใช้แรงงานคนในการคัดแยก ปัญหาที่เกิดขึ้นคือใช้เวลานาน ต้นทุนสูง และไม่สามารถที่จะแยกขนาดของสารกาแฟได้อย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกษตรกรต้องขายในราคาที่ต่ำ เพราะผู้คั่วกาแฟ ต้องนำมาคัดแยกก่อนการคั่ว ทำให้ต้นทุนของกระบวนการคั่วสูงขึ้น หากเกษตรกรสามารถแยกขนาดของสารกาแฟได้ ก็จะสามารถขายในราคาที่สูงขึ้นได้ แต่ปัจจุบันเครื่องคัดแยกที่มีอยู่ในปัจจุบันที่ผู้คั่วกาแฟใช้นั้น เป็นเครื่องคัดแยกขนาดใหญ่ มีราคาแพง เกษตรกรผู้ปลูกไม่สามารถที่จะลงทุนซื้อได้

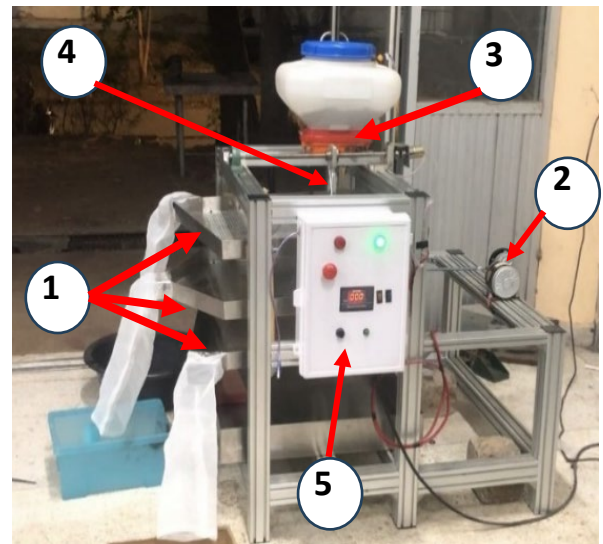
การศึกษาถึงอิทธิพล (effects) ของปัจจัย (Factors) ตั้งแต่ 2 ปัจจัย ขึ้นไป นิยมใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) โดย การทดลองแบบนี้ จะเป็นการจัดหน่วยทดลองเป็นแบบ แฟคทอเรียล เช่น การทดลองที่มี 2 ปัจจัย (A,B) แต่ละปัจจัย มี 3 ระดับ (1,2,3) หน่วยทดลอง ก็จะเป็นการรวมกัน ของปัจจัยแต่ละระดับ (Treatment combination) รวมทั้งสิ้น 6 หน่วยทดลอง ($A \times B$) คือ A1B1, A1B2, A1B3, A2B1, A2B2, A2B3 และประโยชน์ที่สำคัญอย่างหนึ่งของการทดลองแบบแฟคทอเรียลคือสามารถที่จะวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยแต่ละปัจจัย (Simple effect) อิทธิพลหลัก (Main effect) และอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) ไปพร้อม ๆ กันได้ อย่างไรก็ตาม ในการทดลองแต่ละครั้งนั้น หากผู้ทดลองต้องการหาจุดที่มีความเหมาะสมมากที่สุด ผู้ทดลองจำเป็นจะต้องหาค่าที่จะทำให้ผลตอบสนอง (Response) ตรงกับสิ่งที่ผู้ทดลองต้องการ โดยการปรับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัยจนกว่าจะได้ผลตอบสนองตรงตามความต้องการ หรือกำหนดระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัยไว้ แล้วทำการคำนวณหาค่าที่จะทำให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ ซึ่งค่าได้นี้เรียกว่าเป็นค่าพารามิเตอร์ จะเป็นค่าที่จะนำไปใช้งานต่อไป ดังนั้นการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในปรับตั้งเครื่องจักรต่าง ๆ หากปรับตั้งค่าได้เหมาะสม เครื่องจักรก็จะทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ หรือได้ผลลัพธ์ตรงตามความต้องการ จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้จัดทำเครื่องคัดแยกขนาดเมล็ดกาแฟ ที่มีขนาดเล็กเหมาะสมสำหรับเกษตรกรที่มีผลผลิตกาแฟประมาณ 500 – 1000 กิโลกรัมต่อปี เพื่อให้เกษตรกรนำไปใช้ในการแยกสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ ออกจากเมล็ดกาแฟ และเพื่อคัดขนาดของเมล็ดกาแฟ เพื่อให้เกษตรกรสามารถขายผลผลิตในราคาที่สูงขึ้นได้ และทำการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะทำให้การใช้งาน

เครื่องคัดแยกมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีรายละเอียด การดำเนินการดังต่อไปนี้

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 เครื่องคัดแยกเมล็ดกาแฟ

เครื่องคัดแยกเมล็ดกาแฟที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ เป็นเครื่องคัดแยกต้นแบบที่สร้างขึ้นเพื่อศึกษาการทำงานและหาสภาพที่เหมาะสมของการทำงาน โดยเครื่องคัดแยกที่สร้างขึ้นเป็นชนิดตะแกรงโยก มีลักษณะรูปร่างและคุณสมบัติดังต่อไปนี้



ภาพที่ 1 เครื่องคัดแยกเมล็ดกาแฟ

จากภาพที่ 1 เครื่องคัดแยกเมล็ดกาแฟที่สร้างขึ้นมีขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) เท่ากับ 80 x 70 x 92 ซม. โครงสร้างหลักของตัวเครื่องเป็นอลูมิเนียมโปรไฟล์ ขนาดหน้าตัดเท่ากับ 6 x 6 ซม. องค์ประกอบหลักของเครื่องประกอบด้วย

- 1) ตะแกรงคัดแยก วัสดุเป็นสแตนเลส เกรด 304 แต่ละชั้นมีขนาด (กว้าง x ยาว) 65 x 60 ซม. ขนาดของรูตะแกรง ขึ้นบนสุดจะมีขนาด 8 มม. ชั้นที่ 2 และ 3 จะมีขนาด 6 และ 3 มม. ตามลำดับ
- 2) มอเตอร์สำหรับโยกตะแกรง เป็นมอเตอร์ชนิดไฟกระแสตรง (DC Motor) ขนาด 12 โวลต์ 250 วัตต์ ความเร็วสูงสุด 310 รอบต่อนาที ปรับความเร็วโดยการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์
- 3) ชุดปิด - เปิดถังบรรจุเมล็ดสารกาแฟ เป็นระบบฝาปิด - เปิด ควบคุมด้วยแผงวงจร Arduino Uno R3
- 4) ชุดกวาดเมล็ดกาแฟ เป็นระบบบอลสกรู เคลื่อนที่ตามทิศทางของการโยก
- 5) กล่องควบคุมการทำงาน ภายในกล่องประกอบด้วยชุดจ่ายไฟ (Power Supply) เครื่องวัดความเร็วรอบ และนาฬิกาจับเวลา

2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองได้แก่ เมล็ดกาแฟสายพันธุ์โรบัสต้า (Robusta) โดยเป็นเมล็ดกาแฟที่ตากแห้งและผ่านกระบวนการกะเทาะเปลือกจนออกแล้ว ซึ่งมีชื่อเรียกทั่วไปว่า “สารกาแฟ” เมล็ดที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ เป็นเมล็ดที่คัดแยกสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ แล้ว และนำมาคัดแยกโดยการร่อนในตะแกรงขนาด 8, 6 และ 3 มิลลิเมตร เพื่อแยกขนาด โดยใช้แรงงานคน เสร็จแล้วชั่งน้ำหนักของแต่ละขนาดบันทึกไว้เป็นข้อมูลเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการแยกโดยใช้เครื่องคัดแยก ซึ่งเมื่อชั่งน้ำหนักเสร็จแล้วจะนำมาผสมให้คลุกกันก่อนนำไปทดลอง

2.3 การออกแบบการทดลอง

ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการคัดแยกของเครื่องคัดแยกชนิดตะแกรงโยกได้แก่ ระยะชัก ความเร็วรอบ และมุมเอียง [4-5] แต่จากการศึกษาพบว่า มุมเอียงที่มีความเหมาะสมจะอยู่ที่ประมาณ 7 องศา ดังนั้นในการทดลองศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ จึงมีการศึกษาเพียง 2 ปัจจัยคือ ระยะชักและความเร็วรอบ โดยออกแบบการทดลองเป็นแบบ 3^2 แฟคทอเรียล โดยมีปัจจัย 2 ปัจจัย คือ 1) ความเร็วรอบในการโยกตะแกรง มี 3 ระดับคือ 50, 60 และ 70 รอบต่อนาที 2) ระยะชัก มี 3 ระดับคือ 20, 30 และ 40 มิลลิเมตร สำหรับผลตอบสนอง (Response) คือ ประสิทธิภาพการคัดแยก และ อัตราเร็ว เมล็ดกาแฟที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นสารกาแฟ สายพันธุ์โรบัสต้า เป็นชนิดคละขนาด และนำมาคัดแยกสิ่งแปลกปลอม และแยกขนาด เพื่อกำหนดเป็นค่ามาตรฐานโดยใช้แรงงานคน การทดลองจะใช้สารกาแฟ จำนวน 2 กิโลกรัม หมุนเวียน จนการทดลองครบตามที่กำหนด แต่ละเงื่อนไข (Treatment combination) จะทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.4 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ปรับตั้งระยะชักและความเร็วรอบของเครื่องคัดแยกตามที่โปรแกรม design expert ได้กำหนดไว้ และชั่งน้ำหนักเมล็ดกาแฟ 2 กิโลกรัม ใส่ลงในถังบรรจุ
- 2) เปิดสวิตช์การทำงานของเครื่องคัดแยก รอเวลาประมาณ 30 วินาที เพื่อให้เครื่องทำงานคงที่
- 3) ปลอ่ยเมล็ดกาแฟลงสู่ตะแกรงพร้อมจับเวลาเมื่อเมล็ดกาแฟที่อยู่ในตะแกรงทั้ง 3 ตะแกรงหล่นลงสู่ที่เก็บหมด หยุดเครื่อง และบันทึกเวลาของการทดลอง
- 4) นำเมล็ดกาแฟในแต่ละช่องเก็บมาตรวจสอบขนาดและบันทึกผลการทดลอง

2.5 การคำนวณประสิทธิภาพการทำงาน

เครื่องคัดแยกทั่วไป จะวัดประสิทธิภาพจากการแยกสิ่งที่ต้องการออกจากสิ่งที่ไม่ต้องการ เช่นในกระบวนการสีข้าว [6] จะวัดความสามารถในการแยกโดยพิจารณาข้าวเปลือก (Paddy rice) ซึ่งเหลือจากกระบวนการกะเทาะเปลือก ออกจากข้าวกล้อง (Brown rice) ว่ามีการไหลลงไปกับข้าวกล้องมากน้อยเพียงใด โดยใช้น้ำหนักเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา หรือในกรณีการแยกสิ่งเจือปนออกจากผลผลิตทางการเกษตร [7] ก็วัดโดยการหาน้ำหนักของสิ่งเจือปนที่ผสมอยู่ต่อน้ำหนักของผลผลิตทั้งหมด ในการศึกษาครั้งนี้การหาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง จากผล

คูณระหว่างประสิทธิภาพการคัดแยก และความเร็วของการทำงาน ซึ่งทั้งสองเป็นปัจจัยที่แสดงถึงความสามารถของเครื่องจักร โดยทั่วไป โดยประสิทธิภาพการคัดแยกคำนวณ จากน้ำหนักเฉลี่ยของเมล็ดกาแฟที่ได้ในแต่ละขนาด เทียบกับน้ำหนักของเมล็ดกาแฟขนาดนั้น ๆ (สมการที่ 1) และความเร็วของการทำงานคำนวณจากเวลาที่ใช้เทียบกับเวลาที่กำหนดไว้ (สมการที่ 2) ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการคัดแยก} = \frac{\text{นน.ที่ได้}}{\text{นน.ที่มีจริง}} \quad \dots \quad (1)$$

$$\text{อัตราเร็ว} = \frac{\text{เวลาที่กำหนดไว้}}{\text{เวลาที่ใช้จริง}} \quad \dots \quad (2)$$

$$\text{ประสิทธิภาพรวม} = \text{ประสิทธิภาพการคัดแยก} \times \text{อัตราเร็ว} \quad \dots \quad (3)$$

3. ผลการทดลอง

3.1 ความสามารถในการคัดแยก

เมล็ดกาแฟที่นำมาทดลองในครั้งนี้ เป็นเมล็ดกาแฟที่มีขนาดใหญ่พิเศษ (XL) ซึ่งทางผู้ผลิตทำการคัดแยกโดยใช้คนคัดแยกมาแล้ว แต่ ขนาดของเมล็ดกาแฟก็ยังมีหลายขนาดผสมกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อการควบคุมคุณภาพการคั่ว เพราะเมล็ดที่มีขนาดต่างกันค่อนข้างมาก จะสุกไม่เท่ากัน



ภาพที่ 2 เมล็ดกาแฟก่อนการคัดแยก



ภาพที่ 3 เมล็ดกาแฟที่ผ่านการคัดแยกแล้ว ซ้ายมือขนาด 6-8 มม. ขวามือ ขนาดใหญ่กว่า 8 มม.

จากภาพที่ 3 พบว่าเมื่อคัดแยกแล้ว เมล็ดกาแฟแต่ละกลุ่มจะมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงความสามารถของ

เครื่องคัดแยกจะสามารถที่จะคัดแยกเมล็ดกาแฟได้ตามที่กำหนด อย่างไรก็ตามการพิจารณาในเชิงคุณภาพแต่เพียงอย่างเดียวไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพของเครื่องคัดแยกเมล็ดกาแฟได้ ดังนั้นต้องมีการพิจารณาในเชิงปริมาณด้วย เพื่อให้เห็นถึงระดับของประสิทธิภาพของเครื่อง

3.2 ประสิทธิภาพการคัดแยกของเครื่อง

ในการทดลองจะชั่งน้ำหนักของเมล็ดแต่ละขนาดที่เครื่องคัดแยกได้ และเทียบกับน้ำหนักจริง ในแต่ละขนาด และอัตราเร็วจะคำนวณจากเวลาที่ใช้ เทียบกับเวลาที่กำหนดไว้คือ 90 วินาที ผลการที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพและอัตราเร็วในการคัดแยก

run	Speed (rpm)	Stoke (mm)	ประสิทธิภาพการคัดแยก	อัตราเร็ว
1	50	20	0.94	0.64
2	50	20	0.95	0.64
3	50	20	0.95	0.63
4	50	30	0.86	0.71
5	50	30	0.87	0.71
6	50	30	0.90	0.71
7	50	40	0.86	1.03
8	50	40	0.86	1.03
9	50	40	0.88	1.02
10	60	20	0.97	1.11
11	60	20	0.97	1.13
12	60	20	0.96	1.13
13	60	30	0.89	1.15
14	60	30	0.91	1.14
15	60	30	0.91	1.15
16	60	40	0.90	1.20
17	60	40	0.91	1.22
18	60	40	0.90	1.20
19	70	20	0.95	1.25
20	70	20	0.96	1.23
21	70	20	0.96	1.25
22	70	30	0.90	1.25
23	70	30	0.89	1.23
24	70	30	0.90	1.27
25	70	40	0.84	1.30
26	70	40	0.86	1.29
27	70	40	0.84	1.30

จากตารางที่ 1 พบว่า ประสิทธิภาพ มีค่าระหว่าง 0.84 ถึง 0.97 หรือคิดเป็น 84 – 97 % เมื่อเทียบกับน้ำหนักของเมล็ดที่ใส่ลงไป และอัตราเร็วจะมีค่าระหว่าง 0.63 (เวลาที่ใช้นานกว่าเวลาที่กำหนดไว้) ถึง 1.30 (เวลาที่ใช้น้อยกว่าเวลาที่กำหนดไว้) เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติผลที่ได้เป็นดังนี้

3.3 อิทธิพลของแต่ละปัจจัย

ในการวิเคราะห์หาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลเป็นดังนี้

ตารางที่ 2 อิทธิพลของแต่ละปัจจัยต่อประสิทธิภาพการคัดแยก

Source	SS	df.	MS	F-value	p-value
Model	0.0418	8	0.0052	46.98	< 0.0001
A-Speed	0.0041	2	0.0021	18.63	< 0.0001
B-Stoke	0.0351	2	0.0175	157.73	< 0.0001
AB	0.0026	4	0.0006	5.78	0.0036
Error	0.0020	18	0.0001		
Total	0.0438	26			

จากตารางที่ 2 พบว่า ค่า F-value ของตัวแบบ (Model) มีค่าเท่ากับ 46.98 และ p-value < 0.0001 หมายความว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสมกับชุดข้อมูลสามารถแสดงความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ (Response) กับปัจจัยทั้งสองปัจจัยได้ ค่า F-value ของปัจจัย A (Speed) มีค่าเท่ากับ 18.63 และค่า P-value < 0.0001 ซึ่งต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ (0.05) หมายความว่า ความเร็วรอบ (Speed) ที่แตกต่างกัน ทำให้ค่าประสิทธิภาพการคัดแยกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 เช่นเดียวกันกับ ปัจจัย B (Stoke) ที่มีค่า p-value < 0.0001 ก็หมายความว่า การเปลี่ยนแปลงของระยะโยก มีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการคัดแยกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 สำหรับปัจจัยร่วม (AB) ค่า p-value < 0.0036 หมายความว่า ปัจจัยทั้งสองต่างก็มีอิทธิพลต่อค่าประสิทธิภาพของการคัดแยก และปัจจัยทั้งสองจะมีปฏิสัมพันธ์กัน (Interaction) ซึ่งการมีอิทธิพลต่อผลตอบสนองในทางตรงกันข้าม เมื่อปัจจัยหนึ่งให้ผลในทางบวก อีกปัจจัยหนึ่งให้ผลในทางลบ ซึ่งต้องมีการวิเคราะห์กราฟปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งสองอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 3 อิทธิพลของแต่ละปัจจัยต่ออัตราเร็ว

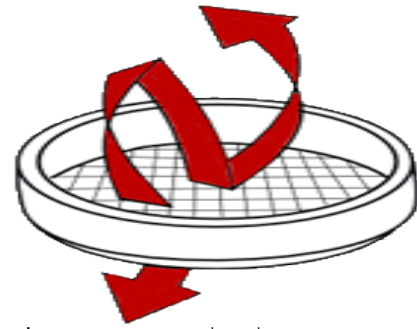
Source	SS	df.	MS	F-value	p-value
Model	1.38	8	0.1727	1665.08	< 0.0001
A-Speed	1.11	2	0.5537	5339.68	< 0.0001
B-Stoke	0.1558	2	0.0779	750.96	< 0.0001
AB	0.1182	4	0.0295	284.84	< 0.0001
Error	0.0019	18	0.0001		
Total	1.38	26			

จากตารางที่ 3 พบว่า ค่า F-value ของตัวแบบ (Model) มีค่าเท่ากับ 1665.08 และ p-value < 0.0001 หมายความว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสมกับชุดข้อมูลสามารถแสดงความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ (Response) กับปัจจัยทั้งสองปัจจัยได้ค่า p-value ของปัจจัย A (Speed) มีค่า < 0.0001 ซึ่งต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ (0.05) หมายความว่า ความเร็วรอบ ที่แตกต่างกัน ทำให้อัตราเร็วแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 เช่นเดียวกันกับ ปัจจัย B (Stoke) ค่า p-value < 0.0001 หมายความว่าระยะโยกที่แตกต่างกัน ทำให้อัตราเร็วแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และปัจจัยร่วม (AB) ค่า p-value < 0.0001 หมายความว่า ปัจจัยทั้งสอง มีปฏิสัมพันธ์กัน และมีผลกระทบต่ออัตราเร็วในการคัดแยกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4.อภิปรายผล

4.1 ผลกระทบของความเร็วยรอบต่อประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการคัดแยก

การทำงานของเครื่องคัดแยกเมล็ดกาแฟที่สร้างขึ้นนี้ มีลักษณะการสั่นเป็นแบบ 3 มิติ (ภาพที่ 4) เนื่องจากว่าตัวตะแกรงจะถูกแขวนไว้ด้วยสายพาน เมื่ออยู่ในจังหวะปกติ ระดับของตะแกรงชั้นบนสุดอยู่สูงจากพื้นประมาณ 81 ซม. และเมื่อมอเตอร์ดึงตะแกรงไปในจังหวะไกลสุด ตะแกรงจะถูกยกขึ้นและมีความสูงจากพื้นประมาณ 82 ซม. (ภาพที่ 5) ซึ่งการโยกหน้า-หลัง ทำให้ตะแกรงเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลงไปพร้อมกันด้วย เมื่อเพิ่มความเร็วรอบที่สูงจะทำให้เมล็ดกาแฟ กระดอนขึ้นลง และถ้าในจังหวะที่ตกลงมานั้นเป็นการตกในแนวตั้ง จะทำให้เมล็ดกาแฟผ่านรูตะแกรงได้ดีกว่า การตกลงในแนวนอน ซึ่งในระดับความเร็วรอบต่ำ การกระดอนขึ้นไป ไม่สูง เมล็ดกาแฟก็จะตกลงมาในแนวนอน จึงทำให้เมล็ดที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงหล่นลงไปชั้นถัดไปได้เร็วกว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบต่ำ ด้วย



ภาพที่ 4 ลักษณะการเคลื่อนที่แบบ 3 มิติ [5]



ภาพที่ 5 ระดับความสูงของตะแกรงต่ำสุดและสูงสุด ในรอบการทำงาน

อย่างไรก็ตามที่ความเร็วรอบสูงนั้นเมล็ดกาแฟเกิดการกระดอนแรงเกินไป ทำให้มีเมล็ดหลุดออกจากพื้นที่ตะแกรงและไปผสมกับเมล็ดขนาดอื่น ทำให้ค่าประสิทธิภาพการคัดแยกลดลง นอกจากนั้น จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำ จะเกิดการติดรูตะแกรง (ภาพที่ 6) เนื่องจากที่ความเร็วรอบต่ำ เมล็ดกาแฟไม่เกิดการกระดอนขึ้นลงและไม่มีแรงกด เมล็ดกาแฟจึงแทรกตัวผ่านรูตะแกรงได้ช้า และบางเมล็ดก็ไม่สามารถแทรกตัวผ่านรูตะแกรงได้ เมล็ดที่มีขนาดเล็กที่ยังไม่ผ่านรูตะแกรงก็จะไหลไปรวมตัวกับเมล็ดที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ประสิทธิภาพการคัดแยกลดลง

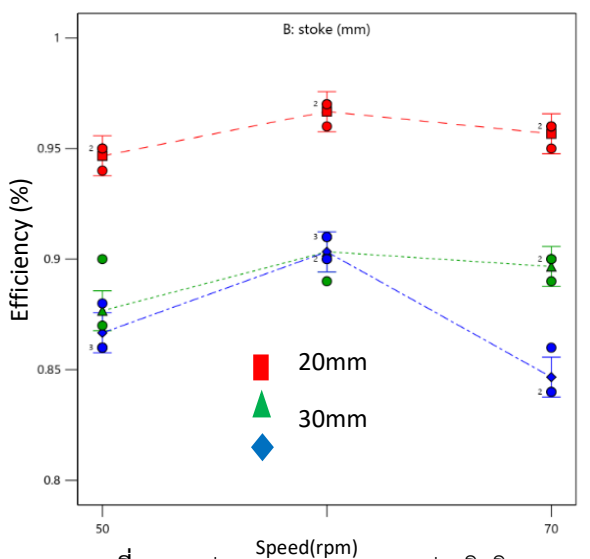


ภาพที่ 6 เมล็ดกาแฟติดรูตะแกรง

4.2 ผลกระทบของระยะโยกต่อประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการคัดแยก

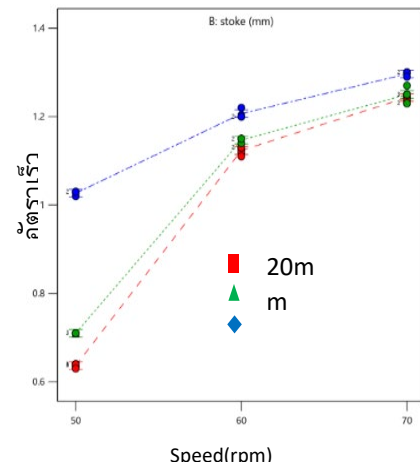
ระยะโยกตัวของตะแกรงจะทำให้เมล็ดกาแฟมีการกระจายตัวได้ดีกว่า โดยเฉพาะในกรณีที่ความเร็วรอบในการทำงานสูง การกระจายตัวของเมล็ดกาแฟจะกระจายได้เร็วเนื่องจากระยะโยกที่ต่างกันทำให้ การเปลี่ยนแปลงความสูงของตะแกรงแตกต่างกัน เป็นผลทำให้เมล็ดกาแฟกระดอนสูงแตกต่างกันด้วย และเมื่อระยะโยกเพิ่มมากขึ้นตำแหน่งที่ของการกระดอนขึ้นและตกลงมาก็จะมีความแตกต่างกันมากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลกระทบโดยตรงต่อการกระจายตัวของเมล็ดกาแฟ เมื่อเมล็ดกาแฟมีการกระจายตัวที่ดี อัตราเร็วของการคัดแยกจึงเร็วแตกต่างกัน

4.3 ปฏิสัมพันธ์ของความเร็วรอบและระยะโยกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการคัดแยก



ภาพที่ 7 กราฟประสิทธิภาพการคัดแยกกับความเร็วรอบและระยะโยก

เมื่อพิจารณาจากกราฟประสิทธิภาพการคัดแยก ที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างความเร็วรอบและระยะโยก (ภาพที่ 7) พบว่า ที่ระดับความเร็ว 60 ต่อนาที ระยะโยก 20 มิลลิเมตร จะให้ประสิทธิภาพการคัดแยกสูงที่สุด และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 70 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพของการคัดแยกจะลดลงเล็กน้อย แต่กรณีระยะโยก 40 มิลลิเมตรจะลดลงค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากราฟอัตราเร็ว ที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและระยะโยก (ภาพที่ 8) จะพบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นอัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ระยะโยก



ภาพที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับความเร็วรอบและระยะโยก

4.3 การหาค่าที่เหมาะสมในการใช้งาน

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการคัดแยก (ภาพที่ 7) และอัตราเร็ว (ภาพที่ 8) จะพบว่าความเร็วรอบและระยะโยกจะให้ผลที่แตกต่างกัน โดยหากต้องการให้เมล็ดกาแฟแต่ละขนาดแยกตัวออกจากกัน ไม่มีการปะปนกัน จะต้องใช้ความเร็วรอบในการโยกปานกลาง (60 รอบต่อนาที) และระยะโยก 20 มิลลิเมตร แต่หากต้องการใช้เวลาในการคัดแยกที่ต่ำกว่า หรือต้องการอัตราเร็วที่สูงกว่า จะต้องใช้ความเร็วรอบ 70 รอบต่อนาทีและระยะโยก 40 มิลลิเมตร เพื่อหา สภาพการทำงานที่มีความเหมาะสมที่สุด โดยกำหนดให้เป้าหมายที่ต้องการคือ ประสิทธิภาพการคัดแยกและอัตราเร็วสูงสุด (Maximize) ผลจากการคำนวณค่า ความต้องการตามเป้าหมายที่กำหนด (Desirability) ผลเป็นดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความต้องการตามที่กำหนดและสภาพการทำงาน

ที่	Speed (rpm)	Stoke (mm)	การคัดแยก	อัตราเร็ว	Desirability
1	70	20	0.957	1.24	0.906
2	60	20	0.967	1.12	0.847
3	60	40	0.903	1.21	0.648
4	70	30	0.897	1.25	0.635
5	60	30	0.903	1.15	0.613

จากตารางที่ 4 พบว่า ค่าความต้องการตามเป้าหมายที่กำหนด สูงสุด มีค่าเท่ากับ 0.906 หมายความว่า สามารถทำได้ใกล้เคียงกับเป้าหมายมีแนวโน้ม 90.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป้าหมายที่วางไว้คือประสิทธิภาพการคัดแยกสูงที่สุด (0.97) และอัตราเร็วสูงสุด (1.30) แต่ในสถานะที่ดีที่สุดของปัจจัยแต่ละตัวนั้น ประสิทธิภาพโดยรวมไม่ดีที่สุด ดังนั้นเพื่อให้ปัจจัยโดยรวมดีที่สุด ต้องมีการปรับระดับของปัจจัยแต่ละตัว โดยระดับของปัจจัยที่มีความเหมาะสมและทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมใกล้เคียงกับเป้าหมายที่กำหนดมากที่สุดคือ สภาพการทำงานที่ความเร็วรอบ 70 รอบต่อนาทีและระยะโยก 20 มิลลิเมตร

ผลที่ได้จากการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Liu

[9] ที่พบว่า มีปัจจัยหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการคัดแยกและแต่ละปัจจัยมีผลกระทบซึ่งกันและกัน (Interactions)

5.สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่ทำการศึกษาทั้ง 2 ปัจจัย คือความเร็วรอบ และระยะโยก และปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบกับระยะโยก มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของเครื่องคัดแยกเมล็ดกาแฟชนิดตะแกรงโยก โดยความเร็วรอบมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการคัดแยกคือความเร็วรอบต่ำ ให้ประสิทธิภาพการคัดแยกที่สูงกว่า แต่ ความเร็วรอบสูง ทำให้อัตราเร็วสูงกว่า ส่วนปัจจัยระยะโยกมีอิทธิพลคือ ที่ระยะโยกต่ำอัตราเร็วจะต่ำและที่ระยะโยกสูง อัตราเร็วก็จะสูงด้วย ซึ่งระดับของแต่ละปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพการคัดแยกโดยรวมเหมาะสมที่สุดคือ ความเร็วรอบ 70 รอบต่อนาที และระยะชัก 20 มิลลิเมตร ซึ่งมีประสิทธิภาพการคัดแยก 0.957 และ อัตราเร็ว 1.24 และมีความต้องการตามเป้าหมายที่กำหนด เท่ากับ 0.906

6. เอกสารเอกสารอ้างอิง

- [1] กรมส่งเสริมการเกษตร. *กาแฟพืชเศรษฐกิจ*. [ออนไลน์]. http://www.agriman.doae.go.th/home/t.n/t.n1/3fruit_Requirement/05_coffee.pdf (เข้าถึงเมื่อ 11 มกราคม 2567).
- [2] กลุ่มสารสนเทศการเกษตร สำนักงานเกษตรและสหกรณ์ จังหวัดแม่ฮ่องสอน. *ฐานข้อมูลเพื่อการวางแผนการผลิตสินค้าเกษตรจังหวัดแม่ฮ่องสอน*. [ออนไลน์]. <https://www.opsmoac.go.th/mae-hongson-dwl-files-421591791144>. (เข้าถึงเมื่อ 11 มกราคม 2567).
- [3] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. *ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร ปี พ.ศ. 2566*. [ออนไลน์]. <https://www.Oae.go.th/view/1/ตารางแสดงรายละเอียดกาแฟ/TH-TH>. (เข้าถึงเมื่อ 1 มีนาคม 2567)
- [4] จรัส มงคลวัย และพิศมาส หวังดี. การศึกษาและพัฒนาเครื่องคัดแยกในการคัดแยกข้าวกล้องและข้าวเปลือกหอมทอง. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร* ปีที่ 42 ฉบับที่ 1 (พิเศษ) มกราคม-เมษายน 2554
- [5] สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร(องค์การมหาชน) การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องต้น แบบของเครื่องคัดขนาดเมล็ดสารกาแฟโรบัสต้าแบบตะแกรงหมุน[ออนไลน์] <https://tarr.arda.or.th/preview/item/NxRuV3HvWaPOGKooHdH16>
- [6] Preeda Prakotmak, Sathaphon Wangchai. Discrete element simulation of brown rice and paddy rice on shaking separator machine. *Agriculture and Natural Resources*. Vol. 56 p. 1007–1018, 2022.
- [7] Yu N Mekshun, D V Loparev, S G Lopareva and A V Fominykh. Experimental studies of grain material separation by a sieve track. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 341, p. 012128, 2019.
- [8] สุชาติ อ่างสุข และวิชัยพร เครือเยี่ยม. การเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรในกระบวนการผลิตมอลต์สก็ด. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. ปีที่ 33 ฉบับที่ 4, p.1-8 ต.ค. – ธ.ค. 2566.
- [9] KeShun Liu. Some factors affecting sieving. Performance and efficiency. *Powder Technology*. Volume 193, Issue2, p.208-213. July 2009.
- [10] K. JEZSÓ and P. PECIAR. Influence of The Selected Sieving Parameters on The Sieving Efficiency of Material MCC Avicel PH102. *Strojnický časopis - Journal of MECHANICAL ENGINEERING*. Vol.72, No. 1, p.77-88, 2022.

กรณีศึกษาการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส โดยใช้เทคนิค PWM ผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink

Study on Single-Phase AC-AC Converter Control Using PWM Technique Implemented in MATLAB/Simulink

พนม ท้าวดี¹, พันธ์ชัย ศรีบำรุง^{2*} และ อภิราช รัตนอุดมพิสุทธิ์³
Phanom Tawdee¹, Panuschai Sribumrung^{2*} and Apirach Rattanaudompisit³

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ

¹Department of Electrical and Computer Engineering, , Faculty of Science and Engineering, Kasetsart University

²สาขาวิชาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ (พหุวิทยาการ) คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

²Program in Next-Generation Automotive Technology (Multidisciplinary), Faculty of Technical EducationRajamangala University of Technology Krungthep

³สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

³Department of Electrical and telecommunication, Faculty of Engineering,Rajamangala University of Technology Krungthep

* Corresponding Author: Email address: panuschai.s@mail.rmutk.ac.th

Received: 4-06-2024 Revised: 30-05-2025 Accepted: 30-06-2025

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและทดสอบวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสสลับแบบ 1 เฟส (Single-phase AC to AC Converter) โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (TMS320F2808) เป็นชุดคอนโทรลสัญญาณขับนำสวิตช์ ร่วมกับการประยุกต์ใช้งานโปรแกรม MATLAB ในการสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM) เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์มอสเฟต (MOSFET) ให้สามารถปรับระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ตามต้องการ วงจรที่ออกแบบสามารถแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาออกในช่วง 0-220 โวลต์ ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ โดยแรงดันเอาต์พุตมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ (Sinusoidal Waveform) และมีค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) สูงสุดที่ 220 โวลต์ การควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตสามารถทำได้โดยการปรับค่าตัวดีไซเคิล (Duty Cycle) ตั้งแต่ 10% ถึง 95% ส่งผลให้วงจรสามารถ ควบคุมกำลังไฟฟ้านำเข้าเอาต์พุตได้ตลอดย่าน การทดลองและทดสอบในบทความนี้ การประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับซอฟต์แวร์ MATLAB เพื่อพัฒนาระบบควบคุมวงจรแปลงไฟฟ้า

คำสำคัญ : วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสสลับ, สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ , MATLAB/Simulink

ABSTRACT

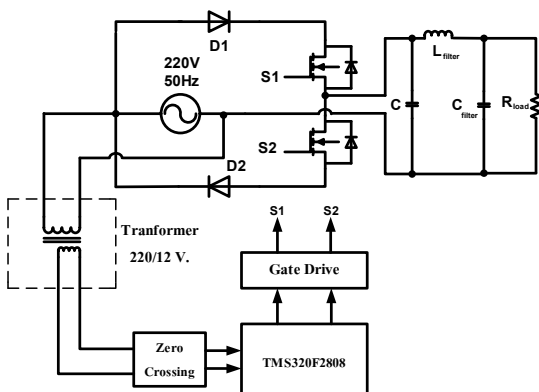
This paper proposes the design and testing of a single-phase AC to AC converter circuit using a microcontroller (TMS320F2808) as a control system for switch driver signals, along with the application of MATLAB to generate a pulse width modulation (PWM) signal to control the operation of the MOSFET switch to adjust the output voltage level as desired. The designed circuit can convert the input AC voltage to an AC output voltage in the range of 0 to 220 volts at a frequency of 50 Hz. The output voltage is a sinusoidal waveform with a maximum root mean square (RMS) value of 220 volts. Controlling the output voltage level can be done by adjusting the duty cycle from 10% to 95%, which results in the circuit being able to control the output power throughout the range. The experiments and tests in this article apply a microcontroller with MATLAB software to develop a control system for the power converter circuit.

Keyword: AC to AC Converter Circuit, Pulse Width Modulation (PWM), MATLAB/Simulink

1. บทนำ

ในปัจจุบันการควบคุมแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์จากแรงดันการไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆนั้น จะใช้หม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อให้ได้ระดับแรงดันต่างๆ ตามที่ต้องการ ซึ่งหม้อแปลงจะมีขนาดที่ใหญ่ และมีน้ำหนักมาก อีกทั้งมีความละเอียดในการควบคุมต่ำ [1]-[3] เนื่องจากการสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส อาจจะไม่สามารถนำมาทดแทน หม้อแปลงไฟฟ้าได้ทั้งหมด แต่ในงานบางประเภทอาจทดแทนได้และมีความสะดวกกว่าการใช้หม้อแปลงไฟฟ้า และจะเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาวงจรและเทคโนโลยี เพื่อเป็นอีกทางเลือกในการเลือกใช้งานที่เหมาะสมที่สุด ในงานที่ต้องการความละเอียดในการควบคุมแรงดันที่มีลักษณะคลื่นไซน์ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ และสามารถปรับขนาดแรงดันได้อย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ระดับต่ำสุดที่ 0 โวลต์ จนถึงระดับสูงสุดที่ 220 โวลต์ สามารถทำได้โดยการทำ

แรงดันไซน์ 50 เฮิร์ตซ์ มาผ่านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับดังภาพที่ 1 ซึ่งวงจรนี้สามารถนำมาทดแทนหม้อแปลงไฟฟ้าได้ การใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC-AC Converter) แทนการใช้หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) มีข้อดีหลายประการในด้านความยืดหยุ่นในการปรับแรงดันไฟฟ้า ความประหยัดพื้นที่และต้นทุน รวมถึงการกรองสัญญาณรบกวนที่ดีขึ้น วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าได้ตามต้องการ โดยการควบคุมดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ซึ่งแตกต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่ไม่สามารถปรับแรงดันได้อย่างยืดหยุ่น นอกจากนี้ วงจรนี้ยังสามารถกรองสัญญาณความถี่สูงจากการสวิตชิ่งได้ดีขึ้นเมื่อผ่านวงจรแอลซีฟิลเตอร์ (LC Filter) ซึ่งช่วยให้รูปคลื่นเอาต์พุตมีความเสถียรและสัญญาณรบกวนลดลงในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีข้อจำกัดในการกรองสัญญาณรบกวนและต้องการขนาดใหญ่และน้ำหนักมากกว่าในการทำงาน ดังนั้น วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับจึงเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงในการทดแทนหม้อแปลงไฟฟ้าในหลายๆ การใช้งาน

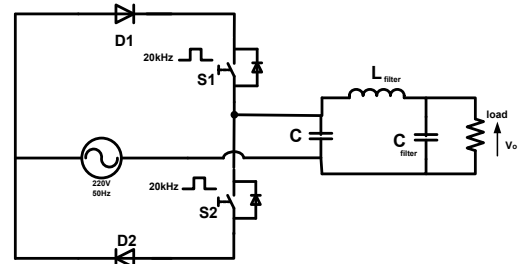


ภาพที่ 1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสที่ใช้ในงานวิจัย

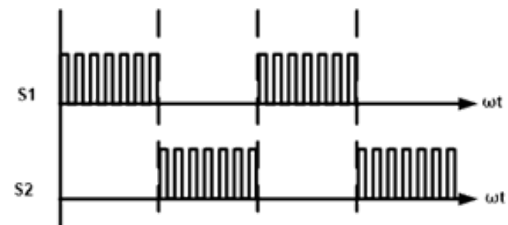
บทความนี้ นำเสนอการทดสอบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสสลับหนึ่งเฟส ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ TMS320F2808 ควบคู่กับโปรแกรม MATLAB ในการสร้างสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation, PWM) เพื่อควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟต [4]-[6] เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 0-220 V/ 50 Hz ที่สามารถปรับขนาดแรงดันได้ โดยมีค่ารากำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตสูงสุดที่ 220 V โดยมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ การควบคุมค่าแรงดันของวงจร โดยการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลตั้งแต่ 10 %- 95 %

2. หลักการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

อุปกรณ์สวิตช์ [7]-[10] เช่น มอสเฟต หรือไอจีบีที จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์โหมดการทำงานคือโหมดนำกระแสและหยุดนำกระแสโดยสมมติให้มอสเฟต หรือไอจีบีทีที่ใช้เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ในภาพที่ 2



(ก) วงจรสมมูลของสวิตช์



(ข) รูปคลื่นแสดงการทำงานของวงจรสวิตช์

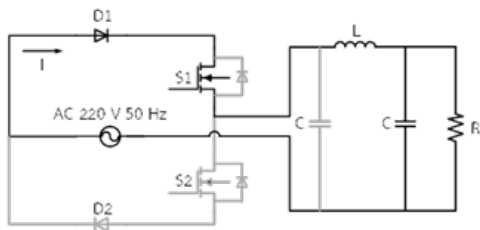
ภาพที่ 2 แสดงวงจรที่ใช้ในงานวิจัย (ก) วงจรสมมูลของสวิตช์ (ข) หลักการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

จากภาพที่ 2 (ก) เป็นการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาต่อกันขึ้นเป็นวงจรที่สามารถนำไปใช้งานได้ทางด้านควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการนำสัญญาณไซน์ที่ได้จากแหล่งจ่ายมาทำการสวิตช์โดยสวิตช์ทั้งสองตัวที่เห็นในวงจรดังภาพที่ 2(ก) จากนั้นนำสัญญาณไซน์ที่ได้จ่ายให้กับโหลด การทดลองใช้โหลดความต้านทาน สำหรับชุดทดลองที่ใช้โหลดเป็นตัวต้านทาน ขนาด 50 โอห์ม 300 วัตต์ ต่ออนุกรมกันจำนวน 3 ตัว และเพื่อให้วงจรทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ดังกล่าวเราจำเป็นต้องสร้างสัญญาณความถี่สูงเพื่อควบคุมสวิตช์ทั้ง 2 ตัวให้สามารถทำงานได้ตามที่

ต้องการและสามารถปรับค่าตัวที่ไซเคิลได้ จากนั้นนำสัญญาณไซน์ความถี่สูงที่ได้ไปผ่านชุดแอลซีฟิลเตอร์หลังจากนั้นจะได้สัญญาณไซน์ที่สามารถปรับค่าตัวที่ไซเคิลหรือ แรงดันได้ตามความต้องการจากภาพที่ 2(ข) เป็นการนำสัญญาณที่สร้างขึ้นมานำไปควบคุมให้สวิตช์แต่ละตัวทำงาน ซึ่งการทำงานของสวิตช์จะทำงานสลับกันในช่วงไซเคิลบวกและไซเคิลลบ ในการสร้างสัญญาณขับสวิตช์ของได้ใช้สัญญาณการมอดูเลตความถี่กว้างพัลส์จากไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F2808 มาประกอบกับชุดวงจรขับเคลื่อน เพื่อให้ได้สัญญาณที่ต้องการ

2.1 โหมดจ่ายกำลัง (Powering Mode)

โหมดจ่ายกำลังในครึ่งไซเคิลบวกเป็นโหมดที่โหลดได้รับกำลังจากแหล่งจ่าย 50 เฮิร์ตซ์ ในครึ่งไซเคิลบวกซึ่งมีลักษณะการทำงานของวงจร ดังภาพที่ 3 จากวงจรจะเห็นว่าเมื่อมีสัญญาณมากระตุ้นขาเกตของสวิตช์ สวิตช์ จะทำการนำกระแส เพื่อต่อวงจรทำให้กำลังไฟฟ้าไหลจากแหล่งจ่ายผ่านไดโอด และสวิตช์ โดยผ่านแอลซีฟิลเตอร์ไปยังโหลดและครบวงจร

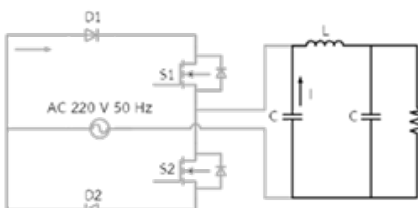


ภาพที่ 3 โหมดจ่ายกำลังในครึ่งไซเคิลบวก

โหมดจ่ายกำลังในครึ่งไซเคิลลบเป็นโหมดที่โหลดได้รับกำลังจากแหล่งจ่าย 50 เฮิร์ตซ์ ในครึ่งไซเคิลลบ ซึ่งมีลักษณะการทำงานของวงจร ดังภาพที่ 3 จากวงจรจะเห็นว่าเมื่อมีสัญญาณมากระตุ้นขาเกตของสวิตช์ สวิตช์จะทำการนำกระแส เพื่อต่อวงจรทำให้กำลังไฟฟ้าไหลจากแหล่งจ่ายผ่านไดโอด และสวิตช์ โดยผ่านแอลซีฟิลเตอร์ไปยังโหลดและครบวงจร

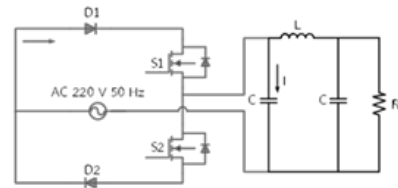
2.1 โหมดฟรีวิลลิง (Freewheeling Mode)

โหมดฟรีวิลลิงในครึ่งไซเคิลบวกเป็นโหมดที่วงจรไม่ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 50 เฮิร์ตซ์ แต่ได้รับกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในแอลฟิลเตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลด ซึ่งจะเกิดในช่วงไซเคิล



ภาพที่ 4 โหมดฟรีวิลลิงในครึ่งไซเคิลบวก

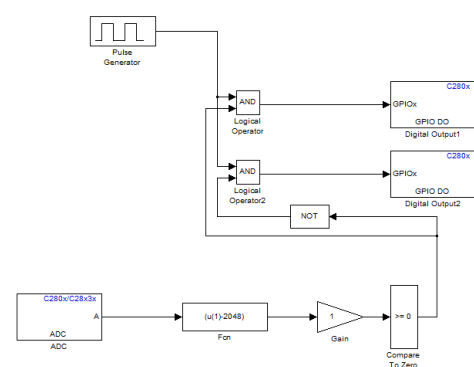
โหมดฟรีวิลลิงในครึ่งไซเคิลลบเป็นโหมดที่วงจรไม่ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 50 เฮิร์ตซ์ แต่ได้รับกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในแอลฟิลเตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลด ซึ่งจะเกิดในช่วงไซเคิลลบของแรงดัน 50 เฮิร์ตซ์ ดังภาพ 5 จากวงจรเมื่อสวิตช์ หยุดนำกระแสพลังงานที่อยู่ในแอลฟิลเตอร์สามารถไหลไปในทิศทางเดิม โดยกำลังไฟฟ้าจะไหลผ่านแอลฟิลเตอร์ ผ่านตัวเก็บประจุผ่านโหลดและครบวงจรที่แอลฟิลเตอร์



ภาพที่ 5 โหมดฟรีวิลลิงในครึ่งไซเคิลลบ

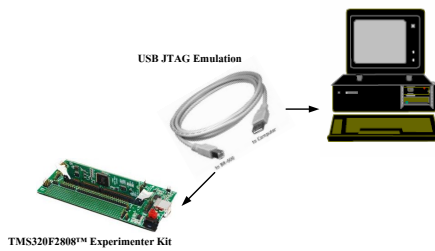
3. การวิเคราะห์หาสมการแรงดันเอาต์พุต

แรงดันเอาต์พุตของวงจรจะแปรผันไฟฟ้ากระแสสลับที่ยังไม่ผ่านวงจรแอลซีฟิลเตอร์ ดังในภาพที่ 6 สามารถแทนด้วยคลื่นที่เกิดจากการนำคลื่นแรงดัน 50 เฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นอินพุตของวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับคูณด้วยสวิตซ์ฟังก์ชันที่มีลักษณะเป็นคลื่น EPWM ที่มีความสูงเท่ากับ 1 และสามารถปรับค่าตัวที่ไซเคิล (D) ได้จาก 0 – 1 โดยกำหนดให้เป็น $S(\omega_s t)$ แนวคิดดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6



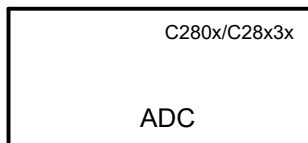
ภาพที่ 6 บล็อกโปรแกรมวงจรควบคุมด้วย Matlab/Simulink ที่ใช้ในการควบคุมสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลซึ่งเป็นพื้นฐานในกระบวนการสร้างการแก้ปัญหาการวิเคราะห์การทดสอบต่างๆ ซึ่งโปรแกรม Code Composer Studio 3.3 เป็นตัวกลางการเชื่อมต่อระหว่างตัวประมวลผลและโปรแกรมควบคุมแสดงดังในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับตัวประมวลสัญญาณดิจิทัล

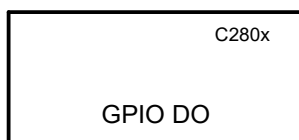
บล็อกโปรแกรม ADC เป็นบล็อกโปรแกรมที่ทำหน้าที่รับค่าสัญญาณจากภายนอกเข้ามาในไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ TMS320F2808 เพื่อแปลงค่าสัญญาณที่รับเข้ามาเป็นสัญญาณดิจิทัล



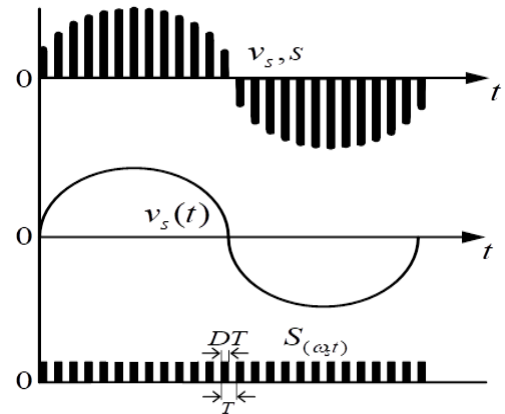
ภาพที่ 8 บล็อกโปรแกรมแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

จากภาพที่ 6 เมื่อได้ค่าสัญญาณพัลส์ และค่าจากไซน์การไฟฟ้าจะนำค่าทั้งสองค่ามาต่อเข้ากับวงจรดิจิทัลโดยมี แอนด์เกต และนอตเกต ก็จะได้สัญญาณตามที่ต้องการเพื่อนำไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์

โดยในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสนี้ จะใช้ขาเอาต์พุต 2 ขา ดังนั้นจึงได้ใช้บล็อกโปรแกรมแสดงค่าเอาต์พุต 2 บล็อกโปรแกรมคือ Output 1 และ Output 2



ภาพที่ 9 บล็อกโปรแกรมแสดงค่าเอาต์พุต



ภาพที่ 10 แสดงแรงดันเอาต์พุตจากการนำสวิตซิงฟังก์ชันคูณกับแรงดันอินพุต

แรงดันคลื่นไซน์ 50 เฮิร์ตซ์ มีค่าดังสมการ

$$v_s(t) = \sqrt{2}V_s \cos(\omega t) \quad (1)$$

ในการคำนวณหาสมการของแรงดันเอาต์พุต $v_{o,s}$ ที่เกิดจากผลคูณระหว่างแรงดันคลื่น 50 เฮิร์ตซ์ $v_s(\omega t)$ กับสวิตซิงฟังก์ชันความถี่สูง $S(\omega_s t)$ ก่อนอื่นจะต้องทำการวิเคราะห์หาสมการของสวิตซิงฟังก์ชัน $S(\omega_s t)$ ในภาพที่ 6 จากนั้นจึงนำไปคูณกับแรงดันคลื่นในสมการ (1) ซึ่งสามารถทำได้ โดยการวิเคราะห์อนุกรมฟูเรียร์ของ $S(\omega_s t)$ ดังสมการต่อไปนี้

$$S(\omega_s t) = x_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [x_n \cos k \omega_s t + y_n \sin k \omega_s t] \quad (2)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์ x_0, x_n และ y_n มีค่าดังนี้

$$x_0 = 1/T(DT/2 + DT/2) \quad \text{หรือ} \quad x_0 = D$$

$$x_0 = 1/\pi k [\sin k t]_{-D\pi}^{D\pi} \quad \text{หรือ} \quad x_0 = 2 \sin(k D \pi) / \pi k$$

$$y_n = 1/\pi k [\cos k(-D\pi) - \cos k D\pi] \quad \text{หรือ} \quad y_n = 0$$

เมื่อแทนสัมประสิทธิ์ x_0, x_n และ y_n ของอนุกรมฟูเรียร์ในสมการ (2) จะได้สมการของสวิตซิงฟังก์ชันดังนี้

$$S(\omega_s t) = D + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2 \sin(k D \pi)}{\pi k} \cos k \omega_s t + \sum_{k=1}^{\infty} (0) \sin k \omega_s t \quad (3)$$

$$S(\omega_s t) = D + \frac{2 \sin(D\pi)}{\pi} \cos(\omega_s t) + \frac{2 \sin(D\pi)}{\pi} \cos(\omega_s t) + \dots + \frac{2 \sin(D\pi)}{\pi} \cos(n \omega_s t): k = 1, 2, 3, \dots n \quad (4)$$

โดยที่ ω_s ความถี่เชิงมุมของสวิตซิงฟังก์ชัน $S(\omega_s t)$

k ลำดับฮาร์โมนิกของสวิตซิงฟังก์ชัน = 1, 2, 3,

เมื่อนำสมการ (3) ของสวิตซิงฟังก์ชันคูณกับสมการของแรงดันคลื่น 50 เฮิร์ตซ์ จะได้สมการของแรงดันเอาต์พุต $V_{o,s}$ ดังนี้

$$v_{o,s}(t) = v_s(t) S(\omega_s t)$$

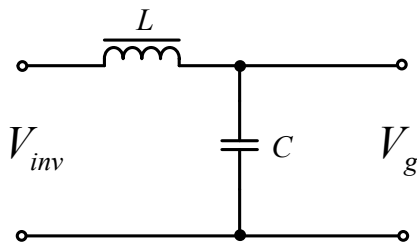
$$= D\sqrt{2}V_s \cos(\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2}V_{o,sk} \cos[(k\omega_s \pm \omega)t] \quad (5)$$

โดยที่ $V_{o,sk}$ คือค่า rms ขององค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ k ซึ่งมีค่าเป็น

$$v_{o,sk} = V_s \sin(kD\pi) / k\pi \quad (6)$$

3.1 วงจรกรองความถี่ต่ำ (LC Filter)

ไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้หลังจากผ่านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับนั้น จะมีความถี่ที่สูงกว่า 50 Hz ปนอยู่จึงต้องทำการกรองออกด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำ



ภาพที่ 11 วงจรกรองความถี่ต่ำ

เพื่อลดทอนองค์ประกอบฮาร์โมนิกนี้ออกไปจึงเลือกความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรค่าประมาณ 20 เท่าของความถี่มูลฐานและต่ำกว่าความถี่การสวิตช์ 20 เท่าด้วยเช่นกันเพื่อให้อัตราการขยายเกนของวงจรอยู่ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ มีค่าต่ำกว่า -40 dB หรือ 0.01

$$\text{จาก } f_r = f \times 20 \quad (7)$$

$$f_r = 50\text{Hz} \times 20$$

$$f_r = 1\text{kHz}$$

เมื่อได้ความถี่เรโซแนนซ์สามารถหาค่าแอลซีฟิลเตอร์ได้จากสมการที่ (7)

$$\text{จาก } f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

$$LC = \frac{1}{(2 \times 3.14 \times 1 \times 10^3)^2}$$

$$LC = 25.3 \times 10^{-9}$$

นำค่าที่ได้จากสมการที่ (8) มาหาค่าแอลซีฟิลเตอร์โดยการกำหนดค่าซีฟิลเตอร์ เพื่อสะดวกต่อการออกแบบวงจรฟิลเตอร์ จึงเลือกค่าซีฟิลเตอร์ที่มีอยู่คือ 14 ไมโครฟารัด

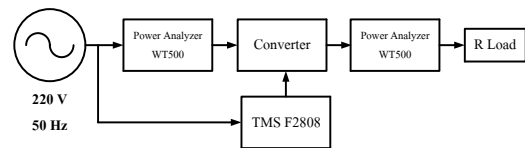
$$C = 14\mu\text{F}$$

$$L = \frac{(25.3 \times 10^{-9})}{(14 \times 10^{-6})}$$

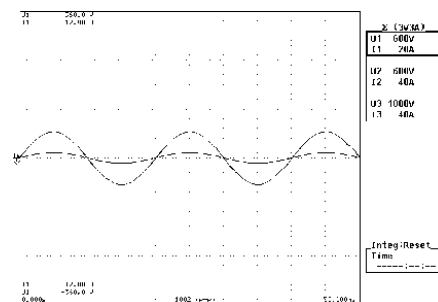
$$L = 1.8\text{mH}$$

4. การทดสอบค่ากระแสและแรงดันทางด้านเอาต์พุต

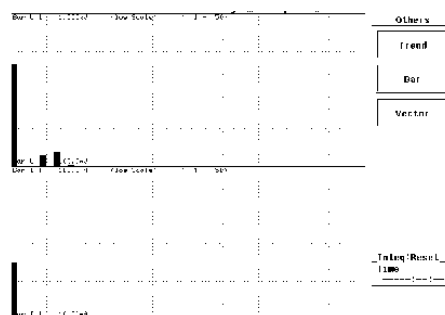
การทดสอบค่ากระแสและแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่โหลดความต้านทาน 150 โอห์ม 300 วัตต์ โดยการวัดค่ากระแสและแรงดันทางด้านออกโดยใช้เครื่องวัด Power Analyzer รุ่น WT500 ดังภาพที่ 12



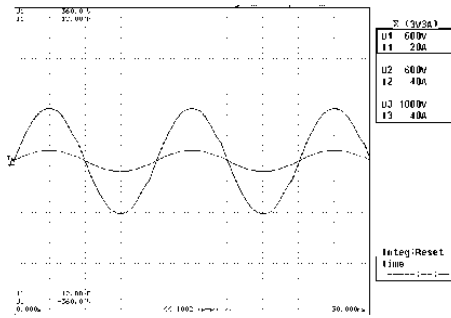
ภาพที่ 12 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบขณะโหลดความต้านทาน 300 วัตต์



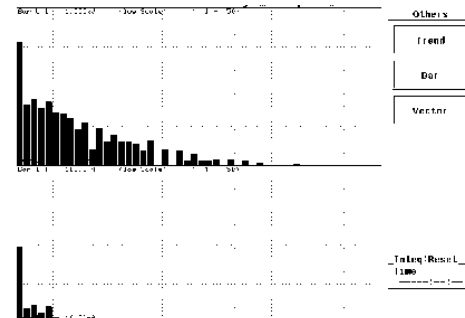
ภาพที่ 13 แรงดันเอาต์พุต 45.68 โวลต์และกระแส 0.305 แอมแปร์ที่โหลด 300 วัตต์ ปรับดิ้วตีไซเคิล 20%



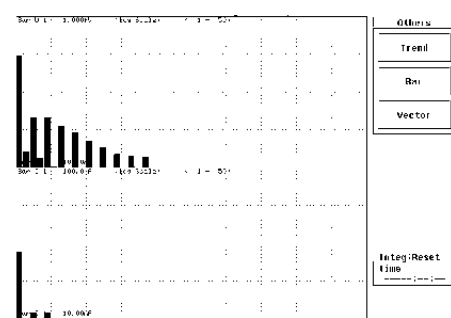
ภาพที่ 14 สเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุต (บน) และกระแส (ล่าง) ที่โหลด 300 วัตต์ ปรับดิ้วตีไซเคิล 20%



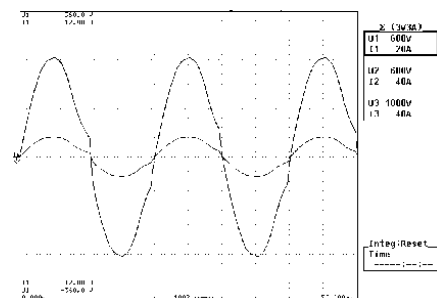
ภาพที่ 15 แรงดันเอาต์พุต 88.10 โวลต์และกระแส 0.587 แอมแปร์ที่โหลด 300 วัตต์ ปรับดิวิตีไซเคิล40%



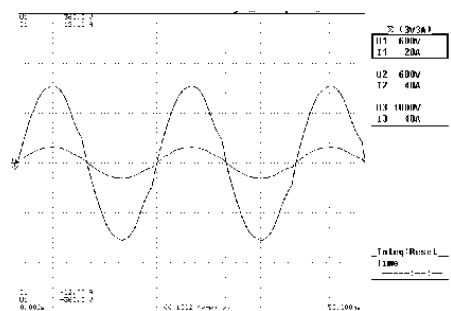
ภาพที่ 18 สเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุต (บน) และกระแส (ล่าง)ที่ โหลด 300 วัตต์ ปรับดิวิตีไซเคิล60%



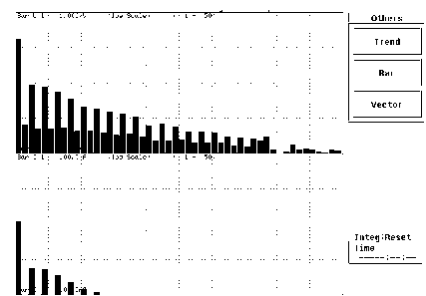
ภาพที่ 16 สเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุต (บน) และกระแส (ล่าง) ที่โหลด 300 วัตต์ ปรับดิวิตีไซเคิล40%



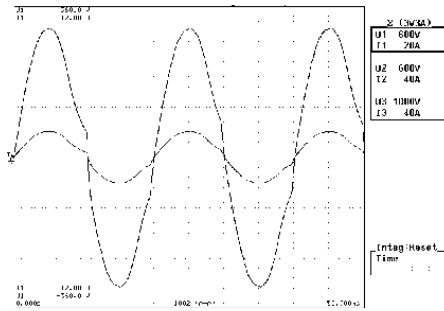
ภาพที่ 19 แรงดันเอาต์พุต 176.10โวลต์และกระแส 1.173 แอมแปร์ที่โหลด 300 วัตต์ ปรับดิวิตีไซเคิล80%



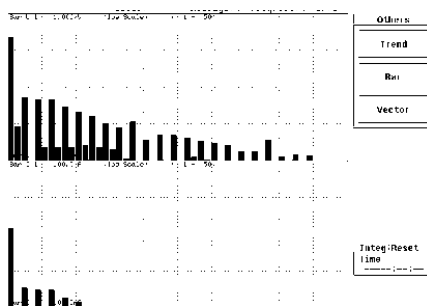
ภาพที่ 17 แรงดันเอาต์พุต 132.73 โวลต์และกระแส 0.883 แอมแปร์ที่โหลด 300 วัตต์ ปรับดิวิตีไซเคิล60%



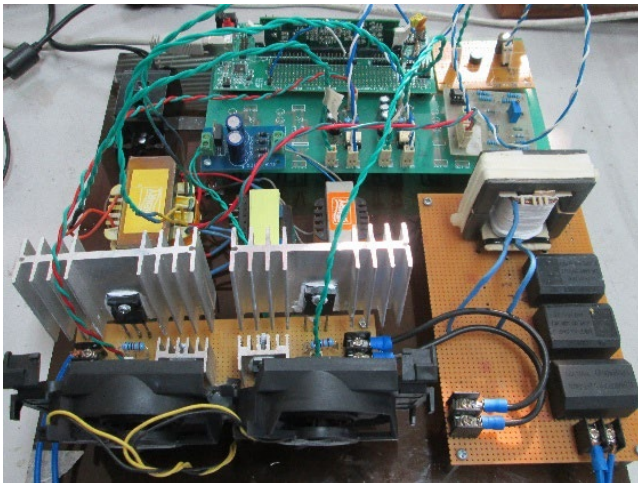
ภาพที่ 20 สเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุต (บน) และกระแส (ล่าง) ที่โหลด 300 วัตต์ ปรับดิวิตีไซเคิล80%



ภาพที่ 21 แรงดันเอาต์พุต 220.74 โวลต์และกระแส 1.467 แอมแปร์ที่โหลด 300 วัตต์ปรับดิวตี้ไซเคิล 95%



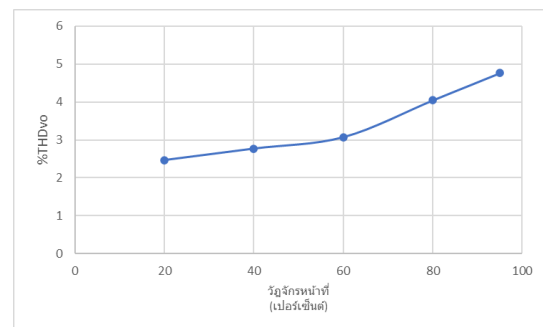
ภาพที่ 22 สเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุต (บน) และกระแส (ล่าง) ที่โหลด 300 วัตต์ ปรับดิวตี้ไซเคิล 95



ภาพที่ 23 ชุดวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันเอาต์พุตขณะปรับดิวตี้ไซเคิลทดสอบโหลดความต้านทาน 300 วัตต์

ดิวตี้ไซเคิล (%)	แรงดันอินพุต (โวลต์)	แรงดันเอาต์พุต (โวลต์)	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันเอาต์พุต
20	≈ 160	46.04	2.462
40	≈ 165	87.98	2.767
60	≈ 180	132.68	3.069
80	≈ 200	175.89	4.043
95	≈ 240	220.05	4.762



ภาพที่ 24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันเอาต์พุตขณะปรับค่าดิวตี้ไซเคิล

5. สรุปผล

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC-AC Converter) แบบหนึ่งเฟส ได้ทำการทดสอบการทำงานในสภาวะไม่มีโหลด (No-load Condition) โดยทดลองปรับค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ของวงจรตั้งแต่ 10% ถึง 95% โดยเพิ่มครั้งละ 10% ผลการทดลองพบว่า ค่าแรงดันเอาต์พุต (Output Voltage) มีความแปรผันในทิศทางเดียวกับค่าดิวตี้ไซเคิล เมื่อเพิ่มค่าดิวตี้ไซเคิล แรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดลองสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตกระแสสลับได้ในช่วง 0 – 220 โวลต์ โดยการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล ซึ่งผลการทดลองของเครื่องต้นแบบสามารถปรับแรงดันเอาต์พุตได้ตามที่ออกแบบไว้จริง นอกจากนี้ ได้ทำการทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับวงจรแอลซีฟิลเตอร์ (LC Filter) ผลปรากฏว่า รูปคลื่นไซน์ของแรงดันเอาต์พุตที่ผ่านวงจรแอลซีฟิลเตอร์มีความ

เพี้ยนของคลื่น (Harmonic Distortion) ต่ำกว่ารูปคลื่นก่อนผ่านฟิลเตอร์อย่างชัดเจน โดยวงจรแอลซีฟิลเตอร์สามารถกรองสัญญาณความถี่สูงที่เกิดจากการสวิตซิง (Switching Frequency) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีสัญญาณรบกวนน้อยลง และมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากยิ่งขึ้น จากผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า วงจรแอลซีฟิลเตอร์มีบทบาทสำคัญในการลดทอนความถี่สูงและปรับปรุงคุณภาพของแรงดันเอาต์พุตได้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สุทนต์ คำมี, และสันติ โพธิ์ทอง. 2555. อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบต่อเข้าระบบจำหน่ายด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ TMS320F2808. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- [2] วิโรจน์ เพชรพันธุ์ศรี. 2546. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิค กรุงเทพฯ.
- [3] T. Hiyama and A. Ueno, "Development of real time power system simulator in MATLAB/Simulink environment," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, Seattle, WA, July 16–20, 2000.
- [4] J. Mahseredjian and F. Alvarado, "Creating an electromagnetic transient program in MATLAB: MatEMTP," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, pp. 380–388, Jan. 1997.
- [5] Hydro-Quebec and TEQSIM International, "Power system blockset for use with Simulink," The Mathworks Inc., Natick, MA, 2001.
- [6] K. Schoder, A. Hasanovic', and A. Feliachi, "Load-flow and dynamic model of the Unified Power Flow Controller (UPFC) within the Power System Toolbox (PST)," in Proc. IEEE Midwest Symp. Circuits Syst., Lansing, MI, August 8–11, 2000.
- [7] D. Logue and P. T. Krein, "Simulation of electric machinery and power electronics interfacing using MATLAB/SIMULINK," in 7th Workshop Computers in Power Electronics, 2000, pp. 34–39.
- [8] P. Alexakis, O. Alatisse, L. Ran, and P. Mawby, "Modeling power converters using hard switched silicon carbide MOSFETs and Schottky barrier diodes," in Proc. 15th Eur. Conf. Power Electron. Appl. (EPE), Lille, France, 2013, pp. 1–9.
- [9] Y. Cui, M. Chinthavali, and L. M. Tolbert, "Temperature dependent Pspice model of silicon carbide power MOSFET," in Proc. 27th Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC), Feb. 2012, pp. 1698–1704.
- [10] N. L. Panwar, V. S. Reddy, K. R. Ranjan, M. M. Seepana, and P. Totlani, "Sustainable development with renewable energy resources: A review," World Rev. Sci., Technol. Sustain Develop., vol. 10, no. 4, pp. 163–184, 2013.
- [11] P. T. Le, H.-L. Tsai, and T. H. Lam, "A wireless visualization monitoring, evaluation system for commercial photovoltaic modules solely in MATLAB/Simulink environment," Solar Energy vol. 140, pp. 1–11, Dec. 2016.
- [12] A. Bouraiou, M. Hamouda, A. Chaker, M. Sadok, M. Mostefaoui, and S. Lachtar, "Modeling and simulation of photovoltaic module and array based on one and two diode model using MATLAB/Simulink," Energy Procedia, vol. 74, pp. 864–877, Aug. 2015
- [13] A. Rai, B. Awasthi, A. Dixit, and C. K. Dwivedi, "Modeling of solar photovoltaic module and study parameter variation effect using MATLAB/Simulink," in Proc. Int. Conf. IEEE Control, Comput., Commun. Mater., Oct. 2016, pp. 1–6
- [14] I. Abdulrahman and G. Radman, "Simulink-based program for simulating multi-machine power systems," in Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting (PESGM), Portland, OR, USA, Aug. 2018, pp. 1–5.
- [15] I. Abdulrahman and G. Radman, "Simulink-based programs for power system dynamic analysis," in Electrical Engineering, vol. 101, no. 2. Berlin, Germany: Springer, Jun. 2019, pp. 345–356.
- [16] MATLAB-Based Programs for Power System Dynamic Analysis. Accessed: Jun. 29, 2019. [Online]. Available: https://www.dropbox.com/s/jekdjhpdc1u9198/MATLAB_All_Programs.zip?dl=0
- [17] Chakkuchan, P., Chudjuarjeen, S., Phankong, N., Dangeam, S., Nawong, M., & Nintanavongsa, P. Full-Bridge Current Source Inverter Using Pulse Density Control for Induction Preheating of Welding Application. 2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2022. p. 1-4
- [18] Dolara, A., Leva, S., Manzolini, G., Comparison of different physical models for pv power output prediction. Sol. Energy 119, pp.83-99, 2015.
- [19] Chakkuchan P., Chudjuarjeen S., & Phankong N., Pulse frequency density modulation full bridge for induction preheating application of stainless steel welding. Archives of Materials Science and Engineering, 2024, 127.1.

การพัฒนาชุดควบคุมการขับเคลื่อนสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

Development of traction control unit of electric motorcycle

พนัสชัย ศรีบำรุง¹, กริธา จิรัถฐิวิรุฒกุล^{1*}, วิโรจน์ เลิศธีระชาญชัย¹
Panuschai Sribumrung¹, Kreetha Jirattthivarutkul^{1*}, Wirote Lerttheerachanchai¹

¹สาขาวิชาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

¹Department of Next-Generation Automotive Technology, Faculty of Technical Education,
Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok, Thailand

*Corresponding Author: Email: kreetha.j@mail.rmutk.ac.th

Received: 31-03-2025 Revised: 16-05-2025 Accepted: 30-06-2025

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) เป็นที่นิยมอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ ระบบปั๊ม ระบบขับเคลื่อนในงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบขับเคลื่อนในอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า งานวิจัยนี้มีความประสงค์ในการพัฒนาชุดควบคุมการขับเคลื่อนสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ มอเตอร์ไฟฟ้าชนิด BLDC ขนาด 350W แรงดันไฟฟ้า 36-48 VDC ชุดขับเคลื่อนประกอบด้วย วงจรควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล dsPIC และวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยใช้การควบคุมการสวิตช์แบบ ชิก สเต็ป คอมมิวเตชัน (Six Step Commutation) ร่วมกับการควบคุมแบบ PI ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมการหมุนของมอเตอร์ได้อย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งานจริง ชุดควบคุมติดตั้งในรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า การทดสอบการขับเคลื่อนรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าทดสอบที่ความเร็ว 100 rpm-520 rpm ทำความเร็วได้ถึง 45 กม/ชม. ในทางเรียบ ระยะทางการทดสอบ 15 กม. ซึ่งถือว่าเหมาะสมกับการใช้งานในชีวิตประจำวันและแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้น

คำสำคัญ : ชุดขับเคลื่อนจักรยานยนต์ไฟฟ้า, รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า, มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ABSTRACT

Brushless DC (BLDC) motors are widely used in various applications, including the automotive industry, pumping systems and industrial drive systems, especially in electric vehicle propulsion. This research aims to develop a drive control system for a small electric motorcycle using a 350W BLDC motor with an operating voltage of 36-48 VDC. The drive system consists of a control circuit utilizing a dsPIC microcontroller and a power electronics circuit. It employs Six-Step Commutation combined with PI control to ensure smooth and efficient motor operation. The control system is installed in an electric motorcycle, and performance tests were conducted at speeds ranging from 100 rpm to 520 rpm, reaching a maximum speed of 45 km/h on flat terrain. The test covered a distance of 15 km, demonstrating that the system is suitable for daily use and confirming the effectiveness of the developed control system.

Keywords: Traction control unit, Electric motorcycle, Brushless DC motor

1. บทนำ

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ทำให้อุณหภูมิโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง รวมถึงปัญหาฝุ่น PM 2.5 ที่เกิดขึ้นในเมืองใหญ่ ปัญหาเหล่านี้ส่วนหนึ่งเกิดจากการใช้รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน หลายประเทศจึงมีนโยบายส่งเสริมการใช้รถยนต์ไฟฟ้าภายในประเทศให้ข้อเสนอเพื่อจูงใจให้ประชาชนเปลี่ยนจากรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในมาใช้รถยนต์ไฟฟ้า บริษัทผู้ผลิตรถยนต์ลงทุนพัฒนายานยนต์ไฟฟ้ามากขึ้น ด้วยปัจจัยเหล่านี้ทำให้รถยนต์ไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน รถจักรยานยนต์

เป็นพาหนะที่นิยมใช้มากในเมืองเนื่องจากมีความคล่องตัวในการเดินทาง ด้วยปริมาณการใช้ที่มากจึงสร้างปัญหามลภาวะได้มากเช่นกัน มีการส่งเสริมให้ใช้รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อลดปัญหามลภาวะและประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศ จะมีข้อเสียในเรื่องฟังก์ชันการใช้งานที่ไม่ครอบคลุม เช่น ไม่สามารถขับเคลื่อนบนทางลาดเอียงมากๆ ได้ ระยะทางต่อการชาร์จที่ยังน้อย การชาร์จต่อครั้งใช้เวลานาน ทำให้ไม่ตอบโจทย์ต่อการใช้งานจริง อีกทั้งเป็นเทคโนโลยีจากต่างประเทศที่มีข้อจำกัดในเรื่องการซ่อมบำรุง

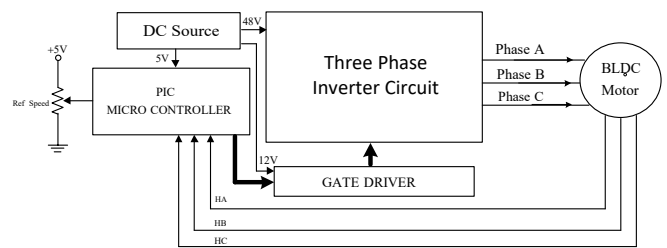
ดังนั้นคณะผู้วิจัยเล็งเห็นปัญหาและมีแนวคิดในการพัฒนาชุดควบคุมการขับเคลื่อนสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งชุดขับเคลื่อนรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดยทั่วไป ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้าและวงจรขับเคลื่อน หรือวงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เหมาะสมให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนรถจักรยานยนต์ที่ได้ออกแบบไว้ มอเตอร์ที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ามีหลายประเภทที่นิยมนำมาใช้ คือ DC Motor, Induction Motor (IM), Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), Permanent Magnet Brushless DC Motor (BLDC) และ Switched Reluctance Motor (SRM) ซึ่งมอเตอร์แต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน [1] ในส่วนของวงจรขับเคลื่อน (Traction Drives) ใช้อุปกรณ์พาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์โดยมีวิธีการควบคุมที่หลากหลาย [2] งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ไฟฟ้ามีการวิจัยและพัฒนาทั้งรถยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง [3] และรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง [4] สำหรับในประเทศไทยมีการดัดแปลงรถตุ๊กตุ๊กที่ใช้เครื่องยนต์มาเป็นรถตุ๊กตุ๊กที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อน [5] งานวิจัยรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ออกแบบและสร้างรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่สามารถปรับความเร็วได้ โดยใช้ดีซีมอเตอร์ขนาด 36 โวลต์ เป็นตัวขับเคลื่อน โดยติดตั้งมอเตอร์ไว้ที่ล้อหลังและใช้โซ่เป็นตัวส่งกำลังจากเฟืองซึ่งติดกับมอเตอร์สามารถวิ่งด้วยความเร็วประมาณ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง [6] ปัจจุบันมอเตอร์ชนิดไร้แปรงถ่าน BLDC นิยมนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น ระบบปั๊มน้ำ ระบบระบายอากาศ และยานยนต์สมัยใหม่เนื่องจากมีขนาดเล็กประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดระหว่างมอเตอร์แบบอื่น ให้ผลตอบสนองที่ดี และไม่มีการสึกหรอจากแปรงถ่านเหมือนกับมอเตอร์กระแสตรง แต่ก็มีข้อเสียคือการควบคุมที่ยากกว่ามอเตอร์กระแสตรงเนื่องจากจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของแกนโรเตอร์ของมอเตอร์อยู่ตลอดเวลาเพื่อให้ได้แรงบิดที่ดีที่สุดในแต่ละตำแหน่งที่เคลื่อนที่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ มีการวิจัยวิธีการควบคุมที่หลากหลายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานมอเตอร์ชนิด BLDC ให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเช่นวิธีการควบคุมแบบไม่ใช้เซ็นเซอร์แต่ก็มีข้อเสียในการใช้งานที่ความเร็วต่ำ วิธีการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นและการควบคุมแบบเวกเตอร์ซึ่งแลกมาด้วยการประมวลผลที่ซับซ้อนและใช้ทรัพยากรด้านฮาร์ดแวร์ที่สูงขึ้น [7] มีการนำเสนอวิธีการควบคุมสมัยใหม่กับมอเตอร์ BLDC เช่น โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) นำมาใช้ในการควบคุมเพื่อเพิ่มผลตอบสนองทางพลวัตให้ดีขึ้น [8] ในงานวิจัยที่ใช้มอเตอร์ชนิด BLDC กับรถยนต์ไฟฟ้า [9-11] โดยงานวิจัยใช้เพียงการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เท่านั้นและยังไม่ทดสอบกับสภาพแวดล้อมจริง ในงานวิจัย [12] เป็นการศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC ขนาด 24 โวลต์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC สร้างสัญญาณ PWM ควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์ สำหรับบทความนี้เป็นงานวิจัยพัฒนาชุดควบคุมการขับเคลื่อนสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าต้นแบบที่ใช้กับมอเตอร์ชนิด BLDC ขนาด 350W 36-48V การใช้

งานสภาวะทางเรียบ ศึกษาและพัฒนาขีดความสามารถให้เพิ่มมากขึ้นเพื่อทดแทนชุดควบคุมนำเข้าจากต่างประเทศในอนาคต

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การออกแบบระบบควบคุมการขับเคลื่อน

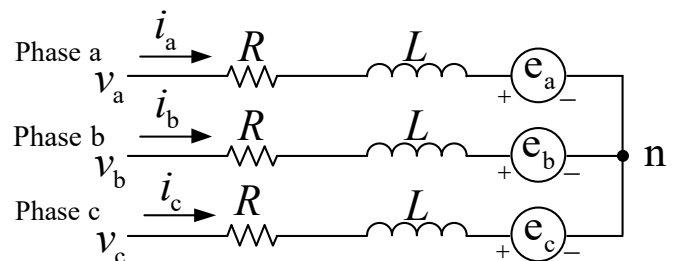
การพัฒนาชุดควบคุมการขับเคลื่อนสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า มอเตอร์ BLDC 350W 48V โดยอะแกรมการควบคุมมอเตอร์ชนิด BLDC แสดงดังภาพที่ 1 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 48 โวลต์ เลี้ยววงจรทั้งหมดในงานวิจัยนี้โดยใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด Sealed Lead Acid 12V 12AH จำนวน 4 ลูก โดยมีตัวต้านทานปรับค่าได้สร้างแรงดันความเร็วเอกสารอ้างอิงให้วงจรควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC เพื่อส่งสัญญาณลำดับการทำงานแบบ 6 ลำดับไปให้วงจรขับเคลื่อนเพื่อไปขับวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ทำการเปิดปิดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ตามตำแหน่งของฮอลล์เซ็นเซอร์ทั้ง 3 ตำแหน่ง (HA, HB, HC) ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ที่รับเข้ามา โดยมีตัวควบคุมแบบ PI เป็นตัวปรับค่าความผิดพลาดระหว่างความเร็วเอกสารอ้างอิงและความเร็วจริงทำให้มอเตอร์หมุนเคลื่อนที่ได้ตามความเร็วที่ต้องการ [13]



ภาพที่ 1 โดยอะแกรมการควบคุมมอเตอร์ชนิด BLDC

2.2 สมการทางไฟฟ้าและสมการทางกลของ BLDC Motor

มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านชนิด 3 เฟส ประกอบด้วยส่วนของโรเตอร์และสเตเตอร์ สเตเตอร์ประกอบด้วยขดลวด 3 ขดต่อแบบสตาร์ มีรูปร่างของ back-EMF เป็นแบบสี่เหลี่ยมคางหมู วงจรเทียบเคียงแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 วงจรเทียบเคียงมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

การวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟฟ้าของ BLDC วิเคราะห์จากสมการแรงดัน ได้สมการดังนี้

$$v_a = Ri_a + L \frac{d}{dt} i_a + e_a \quad (1)$$

$$v_b = Ri_b + L \frac{d}{dt} i_b + e_b \quad (2)$$

$$v_c = Ri_c + L \frac{d}{dt} i_c + e_c \quad (3)$$

เมื่อ $R_a = R_b = R_c = R$ คือ ความต้านทานขดลวด
สเตเตอร์แต่ละเฟส

$L_a = L_b = L_c = L$ คือ ความเหนี่ยวนำขดลวด
สเตเตอร์แต่ละเฟส

V_a, V_b และ V_c คือ แรงดันสเตเตอร์แต่ละเฟส

i_a, i_b และ i_c คือ กระแสสเตเตอร์แต่ละเฟส

e_a, e_b และ e_c คือ ค่า back-EMF

$$e_a = k \cdot \omega_m f(\theta_e) \quad (4)$$

$$e_b = k \cdot \omega_m f(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \quad (5)$$

$$e_c = k \cdot \omega_m f(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \quad (6)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ back-EMF

θ_e คือ มุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์

ω_m คือ ความเร็วทางกลของโรเตอร์

สมการแรงบิดรวมของมอเตอร์สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$T_e = \frac{(i_a e_a + i_b e_b + i_c e_c)}{\omega} \quad (7)$$

สมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ได้ดังสมการ (8)-(10)

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega \quad (8)$$

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (9)$$

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (10)$$

เมื่อ J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรวม

T_e คือ แรงบิดของมอเตอร์

T_L คือ แรงบิดของโหลด

θ_m คือ มุมทางกลของโรเตอร์

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

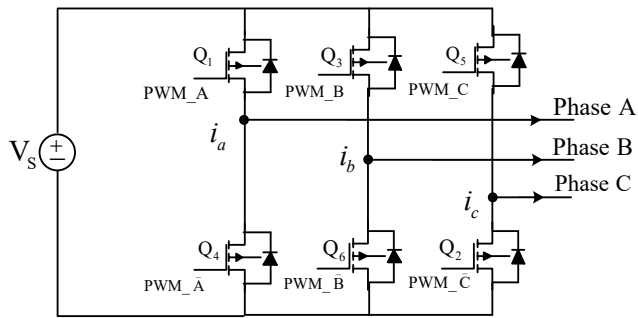
B คือ ค่าคงที่ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานทางกล

2.3 การสั่งการและการควบคุม

หน่วยควบคุม (Control Unit) รับค่าคำสั่งของความเร็ว
รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าจาก Potentiometer แปลงเป็นระดับแรงดัน
0 – 5 Vdc เพื่อเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ (dsPIC) เบอร์ 30f2010
แปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต [14]
สัญญาณจากเซ็นเซอร์ตำแหน่งของโรเตอร์ (Hall Sensor) ทั้ง 3
ตำแหน่ง คือ HA, HB, HC จะส่งสัญญาณไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์
และส่งสัญญาณทั้ง 6 รูปแบบ สัญญาณ PWM จะส่งผ่านวงจรขับ
เกตเพื่อไปเปิดปิดสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้ง 6 ตัว (Q1-Q6)
โดยใช้มอสเฟสเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส (Voltage Source
Inverter) [15] แสดงดังภาพที่ 3 โดยรูปแบบของสัญญาณในการ
สวิตซ์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลำดับการสวิตซ์ทั้ง 6 รูปแบบ

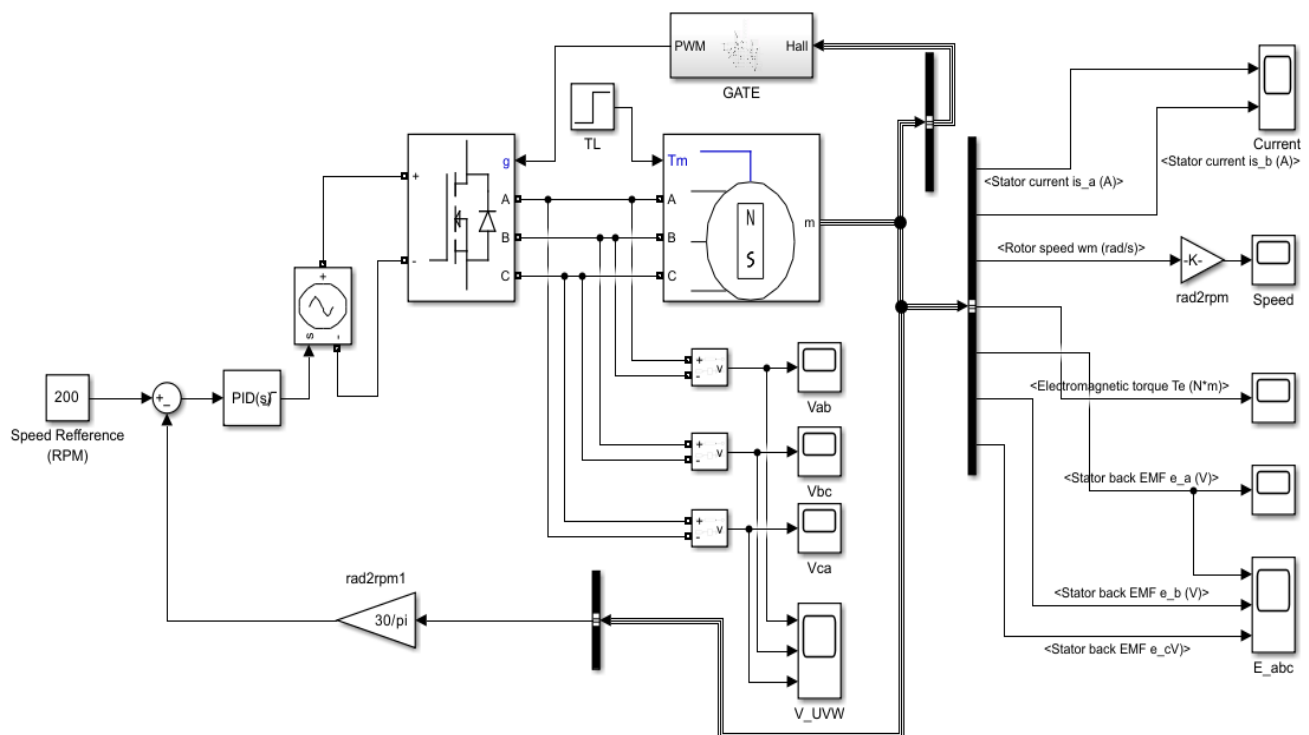
Sequence	Hall sensor A (HA)	Hall sensor B (HB)	Hall sensor C (HC)	Active Switches	Phase Current A	Phase Current B	Phase Current C
1	1	1	0	Q3,Q2	0	+1	-1
2	1	0	0	Q1,Q2	+1	0	-1
3	1	0	1	Q1,Q6	+1	-1	0
4	0	0	1	Q5,Q6	0	-1	+1
5	0	1	1	Q5,Q4	-1	0	+1
6	0	1	0	Q3,Q4	-1	+1	0



ภาพที่ 3 อินเวอร์เตอร์สามเฟส

2.4 การจำลองผลการทำงาน

การทดสอบการทำงานและวิธีการขับเคลื่อนของมอเตอร์ชนิด BLDC ที่ได้ออกแบบ โดยใช้โปรแกรมจำลองผล ไดอะแกรมการจำลองผลของระบบมอเตอร์ BLDC แสดงดังภาพที่ 4 โดยในการจำลองทำการกำหนดความเร็วเอกสารอ้างอิงมาเปรียบเทียบกับความเร็วจริงที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตำแหน่ง จากนั้นนำผลที่ได้เข้าตัวควบคุมแบบ PI เพื่อส่งสัญญาณควบคุมไปสั่งการสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยใช้ MOSFETs 6 ตัว เพื่อส่งสัญญาณ UVW ไปมอเตอร์จากนั้นสังเกตผลตอบสนองของระบบ ได้แก่ ความเร็วแรงดัน V_{ab} V_{bc} V_{ca} และผลตอบสนองต่อแรงบิดขณะมีโหลด

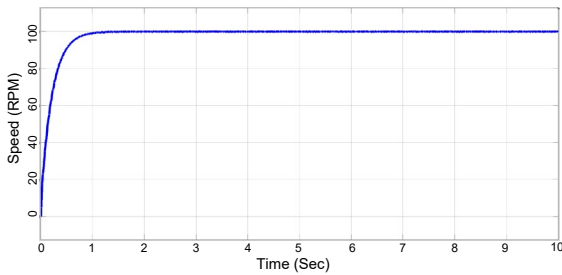


ภาพที่ 4 ไดอะแกรมการจำลองผลของระบบมอเตอร์ BLDC โดยโปรแกรมจำลองผล

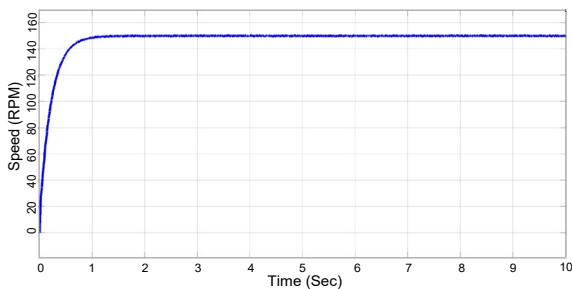
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบ

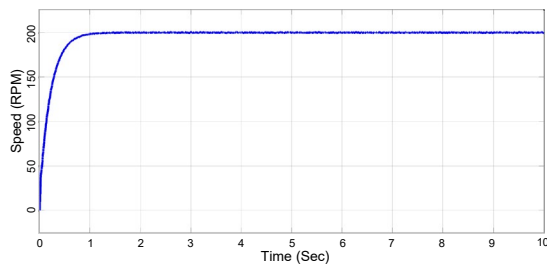
จากการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรมการจำลองผล ความเร็วในการควบคุมที่ 100 rpm 150 rpm และ 200 rpm แสดงดังภาพที่ 5-7



ภาพที่ 5 ผลตอบสนองต่อความเร็ว 100 rpm

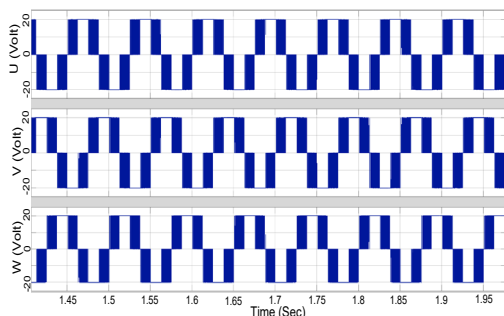


ภาพที่ 6 ผลตอบสนองต่อความเร็ว 150 rpm



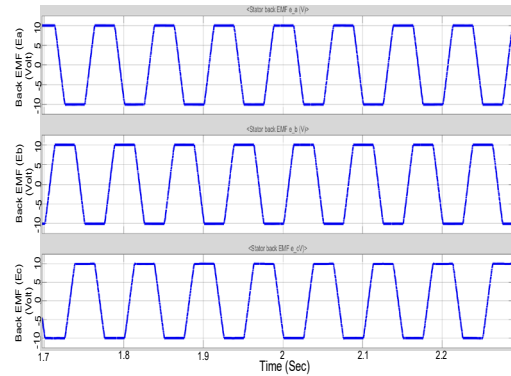
ภาพที่ 7 ผลตอบสนองต่อความเร็ว 200 rpm

สัญญาณ UVW ที่ส่งขับมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็ว 200 rpm แสดงดังภาพที่ 8



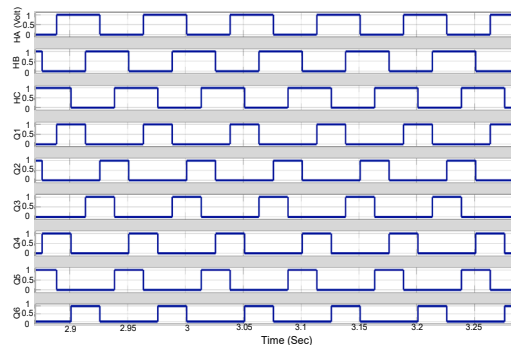
ภาพที่ 8 สัญญาณ UVW ของมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็ว 200 rpm

สัญญาณ Back EMF ของมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็ว 200 rpm แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 สัญญาณ Back EMF ของมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็ว 200 rpm

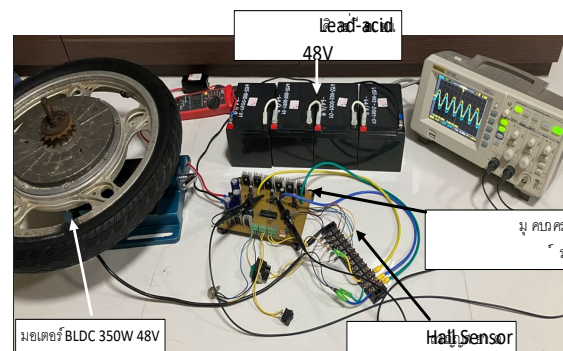
สัญญาณของ Hall sensor (Ha, Hb, Hc) และสัญญาณการสวิตช์ของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง(Q1-Q6) ตามตารางที่ 1 ของมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็ว 200 rpm แสดงดังภาพที่ 10



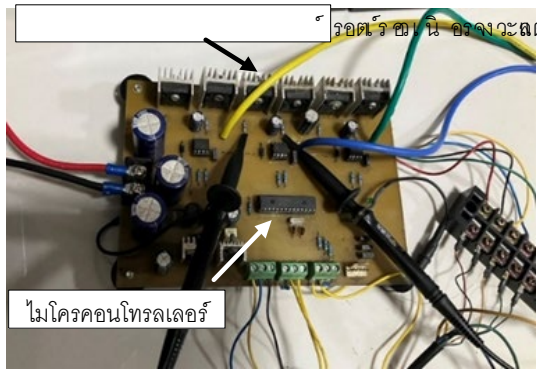
ภาพที่ 10 สัญญาณของ Hall sensor (Ha, Hb, Hc) ของมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็ว 200 rpm

3.2 ผลการทดลองการทำงานของระบบ

จากการทดสอบวงจรควบคุมที่ได้ออกแบบ โดยการทดลองทั้งระบบ ประกอบด้วย วงจรควบคุมภายในวงจรประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์มีหน้าที่ในการรับสัญญาณเอกสารอ้างอิงจากคันเร่งและรับสัญญาณฮอลล์เซ็นเซอร์ 3 สัญญาณ เข้ามาประมวลผลและส่งสัญญาณควบคุมไปส่วนของวงจรขับเคลื่อนไปยังขั้ววงจรอินเวอร์เตอร์ที่ประกอบด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้ง 6 ตัว ส่งพลังงานไปที่มอเตอร์ BLDC 350W 48V โดยรับพลังงานจากแบตเตอรี่ชนิด Lead-acid จำนวน 4 ลูก อนุกรมกันเป็นแรงดัน 48 โวลต์ โดยแสดงดังภาพที่ 11 และ 12



ภาพที่ 11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทั้งระบบ

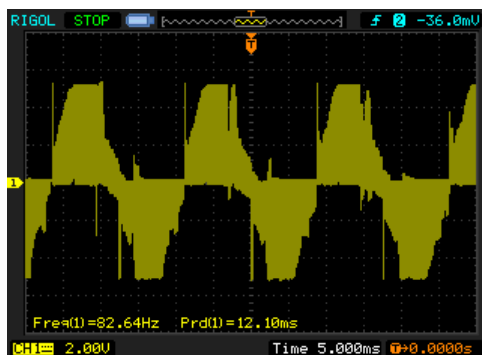


ภาพที่ 12 วงจรควบคุมและวงจรอินเวอร์เตอร์

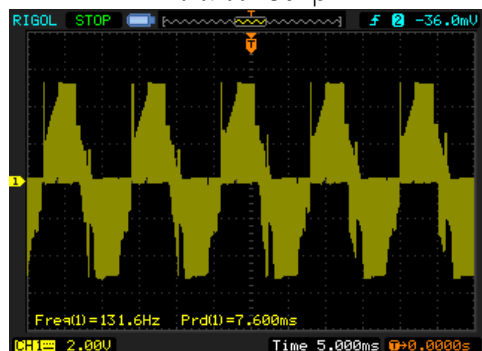
สัญญาณ UV ที่ขั้วมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็ว 100 rpm, 150 rpm และ 200 rpm ดังแสดงในภาพที่ 13-15



ภาพที่ 13 สัญญาณ UV ที่ขั้วมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็ว 100 rpm

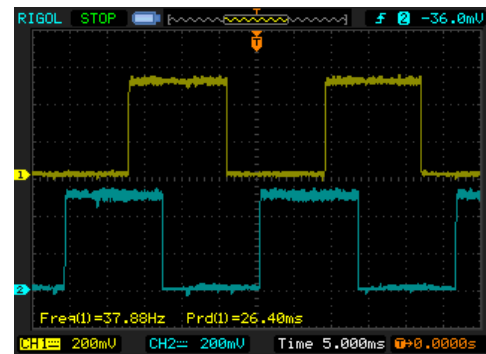


ภาพที่ 14 สัญญาณ UV ที่ขั้วมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็ว 150 rpm

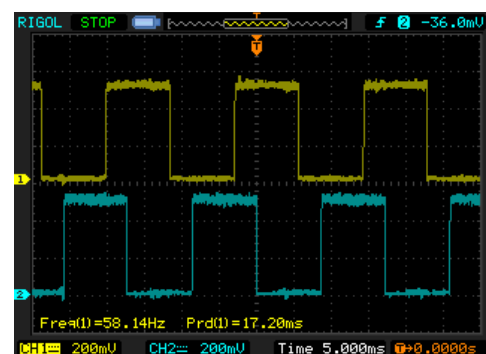


ภาพที่ 15 สัญญาณ UV ที่ขั้วมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็ว 200 rpm

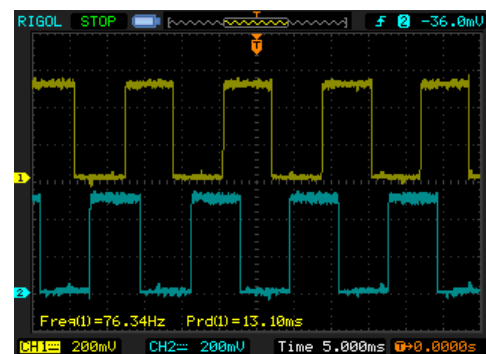
สัญญาณฮอลล์เซ็นเซอร์ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตำแหน่ง (Ha และ Hb) ที่ความเร็ว 100 rpm, 150 rpm และ 200 rpm แสดงดังภาพที่ 16-18



ภาพที่ 16 สัญญาณฮอลล์เซ็นเซอร์ตำแหน่ง (Ha และ Hb) ของมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็ว 100 rpm

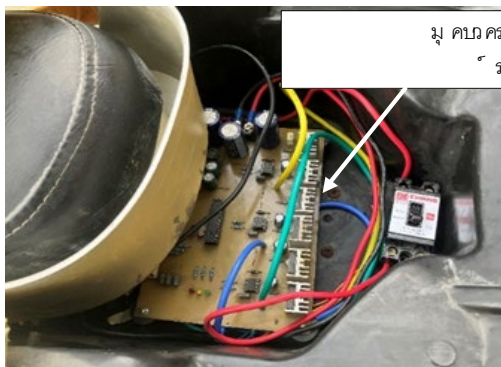


ภาพที่ 17 สัญญาณฮอลล์เซ็นเซอร์ตำแหน่ง (Ha และ Hb) ของมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็ว 150 rpm



ภาพที่ 18 สัญญาณฮอลล์เซ็นเซอร์ตำแหน่ง (Ha และ Hb) ของมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็ว 200 rpm

เมื่อทดสอบทั้งระบบทำงานตามที่ออกแบบไว้แล้ว นำล้อย BLDC วงจรควบคุม วงจรอินเวอร์เตอร์และแบตเตอรี่ 48 โวลต์ ติดตั้งในรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 19 และ 20



ภาพที่ 19 วงจรควบคุมและวงจรอินเวอร์เตอร์
ติดตั้งในรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า



ภาพที่ 20 ติดตั้งล้อวงจรควบคุมและแบตเตอรี่ใน
รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

การทดสอบจากสภาพการขับขึ้นสภาพถนนเรียบต่อเนื่อง น้ำหนักผู้ขับขี่ 75 กก. เมื่อแบตเตอรี่ประจุเต็ม ผลการทดสอบการขับเคลื่อนรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าทดสอบที่ความเร็ว 100 rpm-520 rpm สามารถทำความเร็วได้ 45 กม./ชม. โดยทดสอบ 2 ครั้ง ความเร็วคงที่ 45 กม./ชม. การทดสอบได้ระยะทางดังตารางที่ 2 ระยะทางที่วิ่งได้สูงสุด 15 กม.

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบระยะทาง

ครั้งที่	ระยะทางที่วิ่งได้ (กม.)
1	13.7
2	15

4. สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาชุดควบคุมการขับเคลื่อนสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดยศึกษาออกแบบวงจรและโปรแกรมการสั่งการทำงานของชุดขับเคลื่อนโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC 30f2010 ในการประมวลผลการสวิตช์แบบซิก สเต็ป คอมมิวเตชัน (Six Step Commutation) ร่วมกับตัวควบคุมแบบ PI เพื่อส่งสัญญาณให้ชุดควบคุมกำลัง โดยใช้ MOSFETs 6 ตัวเป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ส่งสัญญาณไฟฟ้าเข้ามอเตอร์ชนิด BLDC ขนาด 350W 48V การออกแบบโปรแกรมการควบคุมได้ทำการจำลองระบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองผลการทำงานที่ความเร็วรอบ 100 rpm, 150 rpm และ 200 rpm การจำลองผลการทำงานของโปรแกรมควบคุมสามารถควบคุมความเร็วที่กำหนดได้ถูกต้อง

เนื่องจากย่านในการควบคุมไม่กว้างซึ่งก็คือช่วงในการควบคุม 0 – 520 rpm จึงทำให้การควบคุมแบบ PI สามารถควบคุมความเร็วตามต้องการได้ แต่ถ้าย่านความเร็วในการควบคุมกว้างก็อาจต้องใช้วิธีการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Control) ในส่วนของวงจรควบคุมได้ออกแบบวงจรให้มีขนาดพอดีเข้ากับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าได้ การทดสอบวงจรควบคุมการขับเคลื่อนสามารถควบคุมได้ตามความเร็วที่ต้องการ (0 – 520 rpm) เมื่อนำอุปกรณ์ทั้งระบบติดตั้งกับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าและขับขึ้นถนนเรียบระยะทางต่อเนื่อง ความเร็วคงที่ 45 กม./ชม. รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสามารถขับเคลื่อนได้ตามที่กำหนดโดยระยะทางที่วิ่งได้สูงสุด 15 กม.ต่อการชาร์จหนึ่งครั้ง งานวิจัยครั้งนี้เป็นการทดสอบจากการขับซึ่งจริง ดังนั้น เพื่อให้เกิดความแม่นยำมากขึ้นควรทดสอบกับแท่นทดสอบไดนาโมมิเตอร์

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการทดสอบงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chang L. Comparison of AC drives for electric vehicles: a report on experts' opinion survey. IEEE Aerosp Electron Syst Mag. 1994 Aug;9(8):7–11.
- [2] Hayes JG, Goodarzi A. Electric powertrain energy system, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles. Hoboken (NJ): Wiley; 2018.
- [3] Gordic M, Stamenkovic D, Popovic V, Muzdeka S, Micovic A. Electric vehicle conversion: optimisation of parameters in the design process. Tehnicki vjesnik. 2017;24(4):1213–1219.
- [4] Firmansyah AI, Supriatna NK, Gunawan Y. Performance testing of electric motorcycle conversion. Proceedings of the 7th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT); 2022 Sep 14–16; Bali, Indonesia. New York: IEEE; 2022.
- [5] Yiangkamolsing C, Laoonual Y, Channarong S, Katikawong W, Sasawat P, Yaotanee B. A development of electric tuk tuk conversion in Thailand. In: Proceedings of the IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific); 2019 Jan 8–10; Seogwipo-si, Korea. New York: IEEE; 2019.
- [6] นครินทร์ แจ่มนิล, สมบูรณ์ เอี่ยมอากาศ, ดำรงค์ ฝ่องศรี, นิमित บุญภิรมย์. รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง. ปริญญานิพนธ์. ภาควิชา

- วิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรี
ปทุม; 2551.
- [7] Mohanraj D, Arul david R, Verma R, Sathiyasekar K, Barnawi AB, Chokkalingam B, Mihet-Popa L. A review of BLDC motor: state of the art, advanced control techniques, and applications. IEEE Access. 2022;10:54833–54869.
- [8] Beladjine DE, Boudana D, Moualdia A, Hallouz M, Wira P. A comparative study of BLDC motor speed control using PI and ANN regulator. In: Proceedings of the 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD'21); 2021 Mar; Monastir, Tunisia. New York: IEEE; 2021. p. 1291–1295.
- [9] Tashakori AA. Modeling of BLDC motor with ideal back-EMF for automotive applications. In: Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE); 2011 Jul; London, UK. London: WCE; 2011.
- [10] Alsayid B, Salah WA, Alawneh Y. Modelling of sensed speed control of BLDC motor using MATLAB/SIMULINK. Int J Electr Comput Eng. 2019;9(5):3333–3343.
- [11] Hong W, Lee W, Lee BK. Dynamic simulation of brushless DC motor drives considering phase commutation for automotive applications. In: Proceedings of the IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC); 2007 May; Antalya, Turkey. New York: IEEE; 2007. p. 1377–1383.
- [12] Sutar AR, Bhide GG, Mane JJ. Implementation and study of BLDC motor drive system. Int J Eng Sci Res Technol. 2016;5(5):57–64.
- [13] Kumar LA, Alexander SA, Maheswari YU. Design and simulation of electrical machines with MATLAB. New York: Nova Science Publishers; 2022.
- [14] นคร ภักดีชาติ, ณัฐพล วงศ์สุนทรชัย, กฤษดา ใจเย็น, ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล. คู่มือการทดลอง dsPIC Microcontroller เบื้องต้นด้วยโปรแกรมภาษา C กับ MPLAB C30. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: บริษัท อินโนเวทีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด; [ม.ป.ป.].
- [15] วีระเชษฐ์ ชันเงิน, วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์. Power Electronics. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง; 2552.

การออกแบบและประเมินประสิทธิภาพเครื่องผสมปุ๋ยหมักแนวนอน

Design and Efficiency Assessment of Horizontal Fertilizer Mixing Machine

ศุภกัญญา ขันชัยภูมิ*, ภควดี ศิริวัชรสุข

Supakanya Khanchaiyaphum*, Bhagavadi Sirivajrasuka

สาขาวิชาวิศวกรรมกรรมการออกแบบและผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย เลข 42000

Program of Design and Production Engineering, Faculty of Industrial Technology, Loei Rajabhat University, Loei 42000

Corresponding Author: Email: supakanya.kh@lru.ac.th

Received: 30-04-2025 Revised: 12-06-2025 Accepted: 30-06-2025

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและประเมินประสิทธิภาพเครื่องผสมปุ๋ยหมักแนวนอน โดยออกแบบ ให้มีขนาดความกว้าง 700 มิลลิเมตร ความยาว 1,360 มิลลิเมตร และความสูง 1,220 มิลลิเมตร ถังผสมมีขนาดบรรจุ 50 ลิตร ขับเคลื่อนด้วยต้นกำลังมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3 แรงม้า ระบบส่งกำลังประกอบด้วย เกียร์ทดรอบ ขนาด 1:20 เฟืองขับขนาด 12 ฟัน เฟืองตามขนาด 29 ฟัน และเพลาลม โดยใบกวนผสมส่วนที่ยึดติดกับ แขนของเพลาลมเป็นแบบเรียบอน มีการเคลื่อนไหวในแนวนอน ใบกวนผสมชั้นนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 570 มิลลิเมตร มีระยะพิทช์ 344 มิลลิเมตร และใบกวนผสมชั้นในมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 370 มิลลิเมตร มีระยะพิทช์ 344 มิลลิเมตร ทำการทดสอบความสามารถในการผสมปุ๋ยหมัก 40 กิโลกรัม กับลูกปัดขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร จำนวน 1,000 ลูก ความเร็วรอบของ ใบกวน 30 รอบต่อนาที ปุ๋ยหมักมีความชื้นเฉลี่ย 56.98% ทำการเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที บันทึกจำนวนลูกปัดในส่วนผสมแต่ละนาที จากนั้นคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายเพื่อประเมินประสิทธิภาพการผสมปุ๋ยหมักด้านการกระจายตัวขณะผสม ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า เครื่องผสมปุ๋ยหมักแนวนอน มีประสิทธิภาพด้านการกระจายตัวขณะผสมที่ดี กล่าวคือ มีค่าการแปรผันน้อยกว่า 5% โดยค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของการผสมปุ๋ยหมักที่เวลา 3 นาที เท่ากับ 1.74% และที่เวลา 4 นาที เท่ากับ 3.5%

คำสำคัญ: เครื่องผสมปุ๋ยหมักแนวนอน ใบกวนแบบเรียบอน สัมประสิทธิ์การกระจาย

Abstract

This research aimed to design and evaluate the performance of a horizontal fertilizer mixing machine. The machine was designed with dimensions of 700 mm in width, 1,360 mm in length, and 1,220 mm in height. The mixing tank has a capacity of 50 liters and is powered by a 3-Hp electric motor. The power transmission system consists of a 1:20 gear reducer, a driving gear with 12 teeth, a driven gear with 29 teeth, and a mixing shaft. The ribbon-type agitator, which is attached to the arms of the mixing shaft, operates in a horizontal motion. The outer ribbon blade has a diameter of 570 mm with a pitch of 344 mm, while the inner ribbon blade has a diameter of 370 mm with the same pitch. The mixer was tested with 40 kg of compost and 1,000 plastic beads with a diameter of 5 mm. The agitator rotated at a speed of 30 revolutions per minute. The average moisture content of the compost was 56.98%. Samples were collected at 1, 2, 3, 4, and 5 minutes, and the number of beads in each sample was recorded. The coefficient of variation (CV) was then calculated to assess the mixing uniformity. The results showed that the horizontal fertilizer mixing machine exhibited good mixing uniformity, as indicated by a coefficient of variation of less than 5%. Specifically, the coefficient of variation at 3 minutes was 1.74%, and at 4 minutes was 3.5%.

Keywords: Horizontal fertilizer mixing machine, Ribbon agitator, Coefficient of variation

1. บทนำ

เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตพืชสร้างรายได้หลัก ได้แก่ พืชผัก พืชไร่ ไม้ผล และกาแพของเกษตรกรบนพื้นที่สูง ได้แก่ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (ลำต้น เปลือกและแกน) กาแพ (เปลือกกาแพเขอรี่ และเปลือกกาแพกะลา) ข้าว (ฟางตอซัง แกลบ) มันสำปะหลัง (เหง้า และลำต้น) และ ถั่ว (ต้น และเปลือกถั่ว) ซึ่งสามารถ นำกลับมาทำเป็นปัจจัยการผลิต (ปุ๋ยหมัก และวัสดุปลูก) ลดต้นทุนการผลิตของเกษตรกร เกิดการหมุนเวียนทรัพยากรธรรมชาติ และช่วยลดสาเหตุการเกิดมลพิษในสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย [1]

ปุ๋ยหมัก เป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ได้จากการนำวัสดุอินทรีย์จากพืช และสัตว์ทางการเกษตร และจากชุมชน มาผลิตด้วยกรรมวิธีทำให้ขึ้น สับ บด ร่อน และผ่านกรรมวิธีการหมักอย่างสมบูรณ์ จนแปรสภาพจากเดิม โดยอาศัยจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ย่อยสลายสารอินทรีย์จนกลายเป็นปุ๋ย มีลักษณะนุ่ม ยุ่ย เหมาะจะใส่บำรุงดิน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน ช่วยให้ดินร่วนซุย อุดมไปด้วยน้ำได้มากขึ้น [2]

เครื่องผสมมี 2 ลักษณะ คือ เครื่องผสมแนวตั้งและเครื่องผสมแนวนอน โดยเครื่องผสมแนวตั้งตัวถังผสมเป็นแบบแนวตั้ง วัตถุดิบจะถูกใบกวนผสมดันขึ้นด้านบนและตกลงสู่ก้นถังผสม จากนั้นจะระบายวัตถุดิบออก การผสมนี้จะมีวัตถุดิบบางส่วนตกค้างอยู่ที่ขอบของก้นถัง มีการใช้ผสมวัตถุดิบต่างๆ เช่น ผสมอาหารสัตว์ [3] ส่วนเครื่องผสมแนวนอน ตัวถังผสมเป็นแบบแนวนอน ใช้เพลานในการหมุนใบกวน โดยถังผสมแบบแนวนอนที่ใช้ใบกวนแบบเรียบเหมาะสำหรับการผสมวัตถุดิบที่มีความหนาแน่นและความหนืดที่สูงมาก [4]

รูปแบบของใบกวน โดยใบกวนที่มีหนึ่งชั้นจะใช้เวลาในการกวนผสมให้เนื้อวัตถุดิบเข้ากันนี้ใช้เวลานาน ส่วนใบกวนที่มีสองชั้น จะมีแกนผสมวัตถุดิบที่ใช้ผสมและการตีกวนมากขึ้น ทำให้วัตถุดิบกระจายได้มากขึ้น ทำให้การกวนผสมสามารถคลุกเคล้าผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้มากขึ้น [5]

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องผสมปุ๋ยพบว่า เครื่องผสมปุ๋ยอินทรีย์มีการวางถังผสมในแนวนอน มีชุดใบผสมวางสลับกันเป็นวงกลม แต่เครื่องผสมปุ๋ยอินทรีย์นี้สามารถผสมปุ๋ยได้ไม่เกิน 32 กิโลกรัม ซึ่งหากใส่ปริมาณปุ๋ยเกิน เครื่องจะไม่สามารถทำงานได้ [6] นอกจากนี้ยังมีเครื่องผสมปุ๋ยอินทรีย์ขนาดความจุ 5 กิโลกรัม โดยเครื่องผสมปุ๋ยนี้ยังต้องเพิ่มความแข็งแรงของใบผสมและเพิ่มจำนวนใบผสมเพื่อให้ผสมได้เร็วยิ่งขึ้น [7] ทั้งนี้ ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องผสมปุ๋ยแนวนอนรูปแบบใบกวนที่มีสองชั้น และผู้วิจัยได้ออกแบบให้ถังผสมสามารถผสมปุ๋ยหมักได้ 40 กิโลกรัม โดยในการพัฒนาเครื่องมือเครื่องจักรที่มีความง่ายต่อความเข้าใจและการใช้งานเพื่อการผสมปุ๋ยตามสัดส่วนที่เหมาะสมกับพืชเกษตร ใช้เป็นเครื่องมือส่งการผลิต และพึงพาการใช้ปุ๋ย

อินทรีย์ได้ด้วยตนเอง อีกทั้งยังสามารถปรับปริมาณการให้ปุ๋ยได้ตามความต้องการ

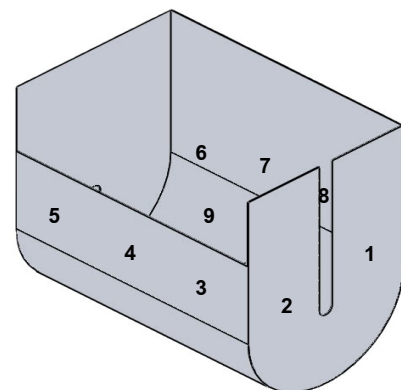
ในการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและประเมินประสิทธิภาพเครื่องผสมปุ๋ยหมักแนวนอน รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตปุ๋ยหมัก ซึ่งจะเป็นการใช้ประโยชน์จากเศษวัสดุเหลือทิ้งของพืช ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่สามารถสร้างรายได้ให้ชุมชนต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องผสมปุ๋ยหมักแนวนอนจะทำงานโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง ส่งกำลังจากคัปปลิงไปยังเกียร์ทดรอบ ผ่านเฟืองขับและเฟืองตามไปยังเพลาลม ที่เพลาลมจะมีเกลียวแบบเรียบอนแนวนอนยึดติดอยู่ เพื่อใช้ผสมปุ๋ยหมัก

การทำปุ๋ยหมัก จะใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งของพืชสด ได้แก่ ใบ, กาบ และเปลือก วัสดุสัตว์ที่นำมาใช้ ได้แก่ มูลวัว, มูลควาย ที่แห้งแล้ว โดยผสมเศษวัสดุเหลือทิ้งของพืชสดกับมูลสัตว์ อัตราส่วน 3:1 ระยะเวลาการหมัก 1-2 เดือน จนเปลี่ยนสภาพ ไปจากเดิม มีลักษณะอ่อนนุ่ม ร่วนซุย และมีสีน้ำตาลปนดำ

การประเมินประสิทธิภาพเครื่องผสมปุ๋ยหมักแนวนอน จะทำการทดสอบความสามารถในการผสมปุ๋ยหมัก 40 กิโลกรัม กับลูกปัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร จำนวน 1,000 ลูก ความเร็วรอบของใบกวน 30 รอบต่อนาที ปุ๋ยหมักมีความชื้นเฉลี่ย 56.98% โดยถือว่าเม็ดลูกปัดเป็นส่วนผสมหนึ่งที่ใช้เป็นมาร์คเกอร์ เปิดเครื่องผสมหลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที ทำการทดลอง 5 ซ้ำ เก็บตัวอย่าง 9 ตำแหน่งที่ความลึกจากผิวปุ๋ยหมักลงไป 5 เซนติเมตร โดยการเก็บตัวอย่าง 8 ตำแหน่งจะเก็บห่างจากขอบถังผสม 5 เซนติเมตร และอีก 1 ตำแหน่งจะเก็บตัวอย่างตรงกลางถังผสม ดังภาพที่ 1 โดยใช้กระป๋องกลวงเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร



ภาพที่ 1 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่าง

สัมประสิทธิ์การกระจาย (Coefficient of variation หรือ CV.) เป็นการเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูล 2 กลุ่ม ที่มีหน่วยการวัดต่างกันหรือค่าตัวกลางเลขคณิตต่างกัน โดยหาในรูปของร้อยละ ค่าที่ได้เรียกว่า สัมประสิทธิ์การกระจาย ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายหาได้หลายวิธี แต่ละวิธีมีการคำนวณที่แตกต่างกัน โดยวิธีที่สอดคล้องกับการเปรียบเทียบทางเวลามากที่สุดสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย หาได้จากสมการที่ (1)

$$CV. = \frac{S.D.}{\bar{X}} \times 100 \quad (1)$$

ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หาได้จากสมการที่ (2)

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (2)$$

โดยที่

CV. คือ สัมประสิทธิ์การกระจาย (%)

S.D. คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

X_i คือ ข้อมูลแต่ละจำนวนที่ i

$\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต

n คือ จำนวนข้อมูลของกลุ่มตัวอย่าง

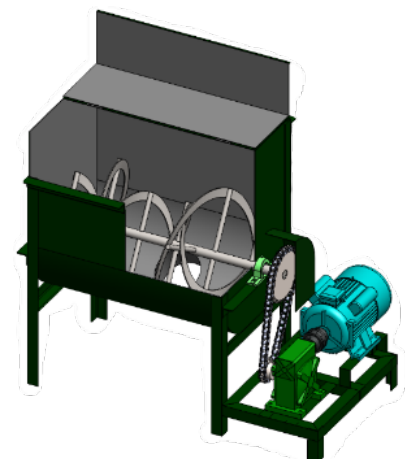
ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายนี้จะใช้วัดค่าการกระจายของของผสมในเวลาที่แตกต่างกัน และบอกถึงประสิทธิภาพของการผสม [4-5] โดยในการทดสอบนี้จะกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของการผสมต้องมีค่าการแปรผันต่ำกว่า 5% สำหรับการทดสอบนี้ และตักของผสมเพื่อนับจำนวนลูกปัดในแต่ละตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ บันทึกจำนวนลูกปัดในส่วนผสมแต่ละนาที่

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

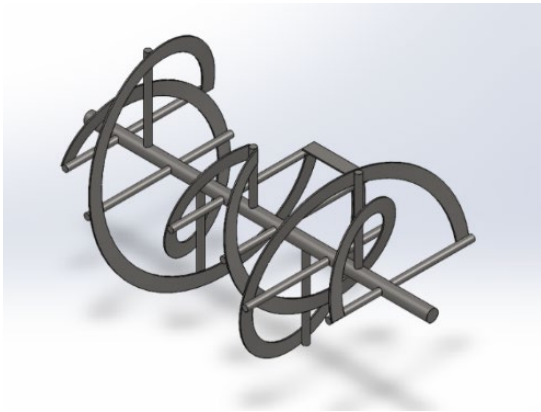
3.1 การออกแบบเครื่องผสมปุ๋ยหมักแฉวนอน

เครื่องผสมปุ๋ยหมักแฉวนอน มีขนาดความกว้าง 700 มิลลิเมตร ความยาว 1,360 มิลลิเมตร และความสูง 1,220 มิลลิเมตร ประกอบด้วย 1) ต้นกำลัง ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 3 แรงม้า 1 เฟส 220 โวลต์ ความเร็วรอบ 1,450 รอบต่อนาที 2) ชุดส่งกำลัง จะส่งถ่ายกำลังจากคัปปลิ้งไปยังเกียร์ทดรอบ 1:20 ส่งกำลังผ่านเฟืองขับ 12 ฟัน และเฟืองตาม 29 ฟัน ไปยังเพลาลม 3) ถังผสม ขนาดบรรจุ 50 ลิตร ทำมาจากเหล็กแผ่นความหนา 3 มิลลิเมตร เมื่อขึ้นรูปส่วนโค้งเสร็จแล้ว นำมาเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กปิดหัวท้ายของถังผสมและทำการเจาะรูเพื่อทำทางออกของปุ๋ยหมักซึ่งมีขนาด 200 x 200 มิลลิเมตร บริเวณกึ่งกลางของถังถึง 4) ชุดเกลียวผสม ทำมาจากเหล็กเพลาลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร นำมากลึงลดขนาด มีแขนของเพลาลมทำมาจากเหล็กเพลาลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร เกลียวผสมที่ยึดติดกับเพลาลมทำจาก

เหล็กแบน ขนาด 4 x 40 มิลลิเมตร ม้วนเป็นเกลียว ทำการยึดเกลียวชั้นนอกและเกลียวชั้นในเข้ากับแขนเพลาลมด้วยการเชื่อม โดยใบกวนผสมเป็นแบบเรียบอน มีการเคลื่อนไหวแบบหมุนเวียนในแนวนอน ใบกวนผสมมี 2 ขนาด เป็นแบบเกลียวตรงกันข้ามจากขอบเพลาลม เข้ามาบรรจบที่จุดกึ่งกลางเพลาลม ใบกวนชั้นนอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 570 มิลลิเมตร มีระยะพิทช์ 344 มิลลิเมตร และใบกวนชั้นในมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 370 มิลลิเมตร มีระยะพิทช์ 344 มิลลิเมตร ใบกวนผสมมีขนาดความหนา 4 มิลลิเมตร โดยใบกวนชั้นนอกฝังซ้ายเป็นแบบเกลียวขวาและใบกวนชั้นในเป็นแบบเกลียวซ้าย ส่วนใบกวนชั้นนอกฝังขวาเป็นแบบเกลียวซ้ายและใบกวนชั้นในเป็นแบบเกลียวขวา ในการกวนผสมปุ๋ยหมักใบกวนชั้นนอกจะหมุนกวนปุ๋ยหมักให้ชนกันบริเวณกึ่งกลางของถังผสม ในขณะที่ใบกวนชั้นในจะกวนปุ๋ยหมักออกจากกัน 5) ชุดครอบโซ่ ทำจากเหล็กแผ่นหนา 3 มิลลิเมตร ใช้ครอบชุด ส่งกำลัง ซึ่งส่งกำลังจากเกียร์ทดไปยังเพลาลม เพื่อความปลอดภัยขณะการใช้งาน 6) ชุดควบคุมไฟฟ้าแบบสวิตช์ ปิด-เปิด แบบคัทเอาท์ ดังภาพที่ 2 และ ภาพที่ 3



ภาพที่ 2 เครื่องผสมปุ๋ยหมักแฉวนอน



ภาพที่ 3 ไบควมผสม

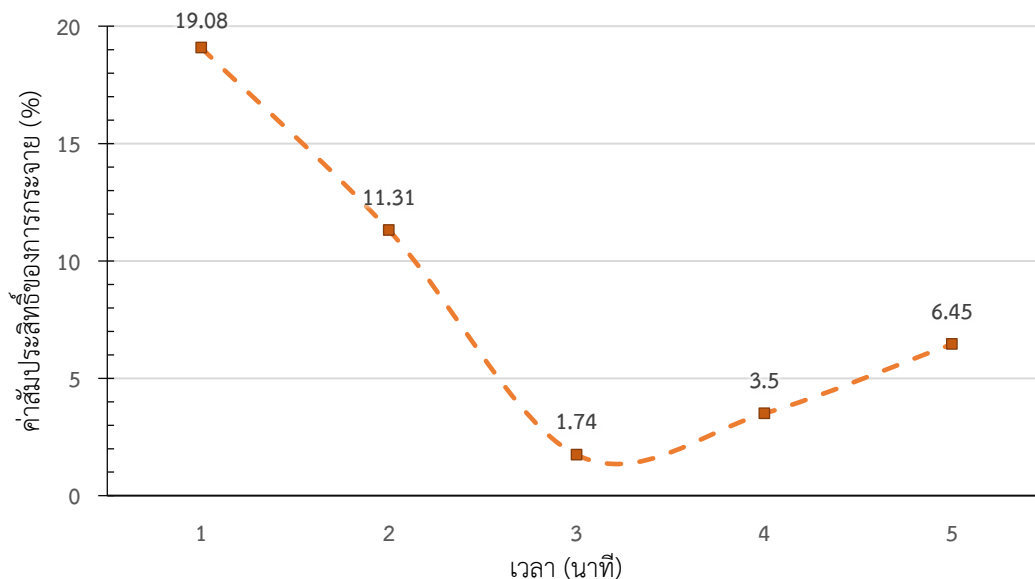
3.2 การประเมินประสิทธิภาพเครื่องผสมปุ๋ยหมัก

แนวนอน

จากการทดสอบความสามารถในการผสมปุ๋ยหมัก 40 กิโลกรัม กับลูกปัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร จำนวน 1,000 ลูก ความเร็วรอบของไบควม 30 รอบต่อนาที ปุ๋ยหมักมีความชื้นเฉลี่ย 56.98% ทำการเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจาย

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($S.D.$)	สัมประสิทธิ์ของการกระจาย (%)
1	28.82	5.50	19.08
2	31.62	3.58	11.31
3	32.16	0.56	1.74
4	29.82	1.04	3.50
5	29.53	1.91	6.45



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการผสมกับค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจาย

การผสมปุ๋ยหมักกับลูกปัดเพื่อหาสัมประสิทธิ์การกระจาย สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการผสมกับค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจาย ดังแสดงในภาพที่ 4 จากกราฟพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายที่เวลา 1 นาที คือ 19.08%, ที่เวลา 2 นาที คือ 11.31%, ที่เวลา 3 นาที คือ 1.74%, ที่เวลา 4 นาที คือ 3.5% และที่เวลา 5 นาที คือ 6.45% โดยในการทดสอบนี้ กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของการผสมต้องมีค่าการแปร

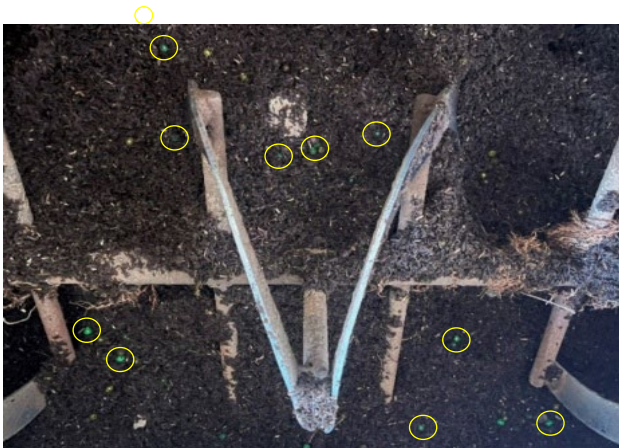
ผันน้อยกว่า 5% ซึ่งค่าการกระจายนี้สามารถเริ่มปล่อยปุ๋ยออกจากเครื่องผสมได้ การกระจายของลูกปัดที่เวลาการทดสอบต่างๆ แสดงดังภาพที่ 5-9

การกระจายตัวของการผสมปุ๋ยหมัก ที่เวลา 1 นาที ปุ๋ยหมักยังจับตัวกันเป็นก้อนและลูกปัดกระจุกตัวอยู่ด้านล่าง ส่วนที่เวลา 2 นาที ลูกปัดยังกระจุกอยู่ในบางตำแหน่ง จากนั้นที่เวลา 3 นาที ลูกปัดเริ่มกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ [6] ค่า

สัมประสิทธิ์การกระจายลดลง และที่เวลา 4 นาที ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายเพิ่มขึ้น แต่ยังมีค่าการแปรผันต่ำกว่า 5% โดยค่าสัมประสิทธิ์การกระจายที่เวลา 3 และ 4 นาที สามารถเริ่มปล่อยปุ๋ยหมักออกจากเครื่องผสมได้ แต่การผสมจนถึง 4 นาที อาจทำให้สิ้นเปลืองเวลา และค่าใช้จ่าย หากใช้ความเร็วและเวลาในการผสมที่เหมาะสม จะสามารถช่วยเพิ่มกำลังการผลิตและลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม [4] ในทางปฏิบัติการผสมไม่จำเป็นต้องละเอียดที่สุด แต่ควรให้เกิดการคลุกเคล้าเข้ากันโดยทั่วถึง [5] ในการพัฒนาเครื่องผสมปุ๋ยโดยอาศัยเทคโนโลยีสามารถลดภาระงานและต้นทุนแรงงาน และเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผสมปุ๋ยได้ [7]



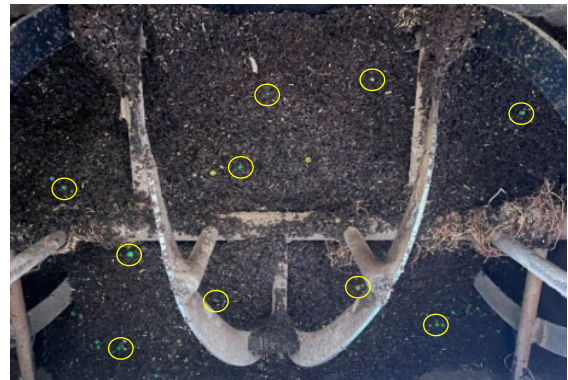
ภาพที่ 5 ปุ๋ยหมักผสมกับลูกปัดที่เวลา 1 นาที



ภาพที่ 6 ปุ๋ยหมักผสมกับลูกปัดที่เวลา 2 นาที



ภาพที่ 7 ปุ๋ยหมักผสมกับลูกปัดที่เวลา 3 นาที



ภาพที่ 8 ปุ๋ยหมักผสมกับลูกปัดที่เวลา 4 นาที



ภาพที่ 9 ปุ๋ยหมักผสมกับลูกปัดที่เวลา 5 นาที

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและประเมินประสิทธิภาพเครื่องผสมปุ๋ยหมักแนวนอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสมให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตปุ๋ยหมัก การประเมินประสิทธิภาพ การผสมปุ๋ยหมักด้านการกระจายตัวขณะผสมใช้ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย ในการวัดค่าการกระจายของของผสมในเวลาที่แตกต่างกัน โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของการผสมต้องมีค่าการแปรผันต่ำกว่า 5% จากการวิจัยสรุปได้ว่า

การออกแบบเครื่องผสมปุ๋ยหมักแฉนวน ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 3 แรงม้า เป็นต้นกำลัง ส่งถ่ายกำลังจากคัปปลิงไปยังเกียร์ทดรอบผ่านเฟืองขับและเฟืองตามไปยังเพลผสม ถึงผสมขนาดบรรจุ 50 ลิตร ชุดเกียร์ผสม ประกอบด้วยใบกวนชั้นนอกฝั้วซ้ายเป็นแบบเกลียวขวาและใบกวนชั้นในเป็นแบบเกลียวซ้าย ส่วนใบกวนชั้นนอก ฝั้วขวาเป็นแบบเกลียวซ้ายและใบกวนชั้นใน เป็นแบบเกลียวขวา ยึดเกลียวชั้นนอกและเกลียวชั้นในเข้ากับแกนเพล ใบกวนผสมเป็นแบบ ริปบอนมีการเคลื่อนไหวแบบหมุนเวียนในแฉนวน ในการกวนผสมปุ๋ยหมักใบกวนชั้นนอกจะหมุนกวนปุ๋ยหมักให้ชนกันบริเวณกึ่งกลางของถังผสม ส่วน ใบกวนชั้นในจะกวนปุ๋ยหมักออกจากกัน

การประเมินประสิทธิภาพเครื่องผสมปุ๋ยหมักแฉนวนพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายที่เวลา 3 นาที คือ 1.74% และที่เวลา 4 นาที คือ 3.5% มีค่าการแปรผันต่ำกว่า 5% ทั้งนี้หากพิจารณาการกระจายตัวของปุ๋ยหมักร่วมกับเวลาและค่าใช้จ่ายควรเลือกเวลาในการผสม 3 นาที ซึ่งเป็นเวลาในการผสมที่เหมาะสม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนสนับสนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) [อินเทอร์เน็ต]. เชียงใหม่: สถาบัน; 2567; [สืบค้นเมื่อวันที่ 20 พฤศจิกายน 2567]. จาก: <https://hkm.hrdi.or.th/Knowledge/detail/700>
- [2] กรมวิชาการเกษตร. ปุ๋ยอินทรีย์ : การผลิต การใช้ มาตรฐาน และคุณภาพ. กรุงเทพฯ: ชุมชนสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย; 2548.

- [3] Balami AA, Adgidzi D, Mua'zu A. Development and Testing of an Animal Feed Mixing Machine International Journal of Basic and Applied Science. 2013;1(3):491-503.
- [4] อำนาจ ตงดี, พงษ์ธร วิจิตรกุล. การออกแบบและทดสอบเครื่องผสมข้าวแฉนวนที่มีใบกวนริปบอน. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์. 2565;17(2):37-54.
- [5] อภิชาติ ศรีชาติ, วีระพล แก้วก่า, กวีพงษ์ หงษ์ทอง. การพัฒนาเครื่องผสมอาหารสัตว์แฉนวนด้วยใบกวน 2 ชั้น. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ. 2562;5(2):38-48.
- [6] ปิยะวัฒน์ ศรีธรรม, วิทยา อัมสำราญ, พิทักษ์บุญไทย และคณะ. เครื่องผสมพร้อมกับอัดเม็ดปุ๋ยอินทรีย์. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ. 2559;2(2):87-96.
- [7] รณพร รัตนจันทร์, ประกิจ อัมสมบูรณ์, เอกชัย จันลาด และคณะ. การออกแบบและประเมินประสิทธิภาพเครื่องผสมปุ๋ยอินทรีย์สำเร็จรูปขนาด 5 กิโลกรัมสำหรับเกษตรกรรายย่อย. วารสารวิชาการนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 2567;2(3):57-69.

Effect of Solution Concentration During Electrospinning Process on Morphological Features of Scalable Self-standing Polyvinyl Alcohol Nanofibrous Membranes

Apiwat Dankeaw^{1,2*}, Apichat Sanrutsadakorn¹, Kanchana Sotho³

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI), Sakon Nakhon 47160, Thailand

² Advanced Materials Science and Engineering, and Management (AMSEM) Research Unit, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI), Sakon Nakhon 47160, Thailand

³ School of Molecular Science and Engineering (MSE), Vidyasirimedhi Institute of Science and Technology (VISTEC), Rayong 21210, Thailand

*Corresponding Author Email: apiwat.dn@rmuti.ac.th

Received: 9-06-2025 Revised: 26-06-2025 Accepted: 30-06-2025

ABSTRACT

Nanofibers and nanofibrous membranes composed of polymers, ceramics, carbons, and their hybrid materials, fabricated through electrospinning process, have garnered significant research interest due to their potential applications in diverse fields, including medical devices, environmental protection and remediation, and energy systems. Polyvinyl alcohol (PVA) has been extensively used as a functional component in nanofiber composites, a polymer binder for the fabrication of architected carbon and ceramic nanofibers, and a scaffolding material for the preparation of freestanding ceramic nanofibrous membranes, via electrospinning. Consequently, investigating the effects of working parameters during electrospinning on the properties of the resulting products is essential. In this study, the influence of solution concentration on the morphological features and physical dimensions of self-standing electrospun PVA nanofibrous products collected on a rotational cylindrical drum, was examined using scanning electron microscopy (SEM), and the results were analyzed and discussed. The findings showed that increasing PVA solution concentration (6–14% w/v) led to larger fiber diameters, reduced membrane width, and increased membrane thickness. Based on the power law of polymer solutions, the diameter of the electrospun fibers increased as the PVA solution concentration was raised, following the relationship $D \sim \sqrt{C} \eta^{1/3}$. This research enhances the predictive capability regarding the morphology of the resulting PVA nanofiber products—particularly the fiber diameters—by identifying solution concentration as a key parameter governing the electrospinning process. This deeper understanding of how solution concentration affects the morphology of PVA-based nanofibers is expected to facilitate the efficient fabrication of nanofibrous mats utilizing PVA as a binder and/or structural component.

Keywords: Polyvinyl alcohol, Nanofibers, Electrospinning, Solution concentration, Morphology

1. INTRODUCTION

Electrospinning, a versatile method that uses electrostatic force to produce nanofibers and nanofibrous membranes of polymers, ceramics, carbons, and their hybrid materials, is a straightforward way to create ultra-fine fibers from polymer solutions or melts. It offers benefits like repeatability, control over fiber size, and low production cost. The process involves drawing a continuous polymer strand through a spinneret using a strong electric field, resulting in fibers that randomly collect on a grounded surface to form a non-woven mat.

These fibers feature a high surface area relative to their mass or volume and high porosity, making them easily functionalized and suitable for various applications [1-5].

Among the diverse polymers utilized in electrospun nanofiber production, polyvinyl alcohol (PVA)—a water-soluble synthetic polymer—is commonly selected [6]. Its chemical structure is illustrated in figure 1. PVA is an atactic polymer that demonstrates a degree of crystallinity and possesses notable film-forming, emulsifying, and adhesive capabilities. Additionally, it exhibits resistance to oils, greases, and various solvents. PVA is characterized by high tensile strength,

flexibility, biocompatibility, low tendency for protein adhesion, and low toxicity, and excellent barrier properties against oxygen and aromatic compounds [6-8]. These properties have supported its application such as medical devices, photographic films, and binder substances [9].

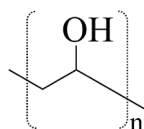


Figure 1. Chemical structure of PVA.

In the context of electrospinning, PVA is extensively used as a functional component in nanofiber composites [10-12], a raw material and binding polymer for the fabrication of architected carbons [13-15] and ceramic nanofibers [16, 17], and a scaffolding material for the preparation of freestanding ceramic nanofibrous membranes [18]. Therefore, a systematic investigation into the influence of electrospinning parameters—comprising solution properties, processing conditions, and environmental factors—on the morphological characteristics, shape, and dimensions of the resulting nanofibers is crucial [19].

In recent years, numerous studies have explored the influence of various parameters on the morphology and diameter of electrospun PVA nanofibers [8], including solution viscosity [20], flow rate, degree of hydrolysis, applied voltage, collection distance, ionic salt addition [21], molecular weight [22], pH [23], surfactant addition [24], and collector type [25]. However, the findings have frequently been inconsistent or contradictory.

Among the electrospinning parameters, the concentration of spinning solutions plays a critical role in determining the morphological and structural characteristics of the resulting nanofibers and nanofibrous membranes [8, 20, 26].

Supaphol and Chuangchote [8] studied the effect of the concentration of PVA solutions (which is directly related to the viscosity of the polymer solutions) on the morphology of electrospun PVA nanofibers fabricated using the electrospinning process with a stationary collector. It was found that the fiber diameters increased with increasing solution concentration and that the deposition area of the fibers on the collector decreased accordingly.

Meanwhile, Mohammad Ali Zadeh *et al.* [20] employed PVA solutions as binders for the sol-gel of cationic ions in the preparation of electrospun mullite nanofibers. Their study focused on the effect of the viscosity of PVA solutions on the morphology of the resulting nanofiber products. They observed that increasing the viscosity of the PVA solution significantly affected the morphology and led to a noticeable increase in the fiber diameters.

However, despite the conceptual explanations of how the concentration and viscosity of polymer solutions affect the morphology of the nanofiber products, no work has yet described a mathematical relationship between these parameters (e.g., polymer solution concentration or viscosity) and the morphology of the resulting electrospun PVA nanofiber products (such as fiber diameters).

Until 2025, when Munawar *et al.* [26] investigated the relationship between solution viscosity, solution concentration, and the diameter of electrospun fibers, employing a power-law relationship (to describe the dependence between the viscosity and concentration of polymer solutions) and drawing upon the findings of Schubert to explain this relationship. This research contributes to predicting the morphology of resulting nanofiber products (e.g., fiber diameters) by defining the parameters during the electrospinning process. In their work, polycaprolactone (PCL) was used as the polymer model, and a rotational collector wheel was employed to collect the fibers.

Here, in order to fabricate self-standing PVA nanofibrous membranes via the electrospinning process using a rotational cylindrical collector, the effect of the concentrations of the spinning solutions on the morphological characteristics, shape, and dimensions of the resulting nanofibrous membranes was primarily investigated. This study represents the first instance of exploring the relationship between the concentrations of the spinning solutions and the diameters of the electrospun fibers in the preparation of self-standing PVA nanofibrous membranes via the electrospinning, employing mathematical equations to describe this relationship.

2. MATERIALS AND METHODS

The solutions for electrospinning were prepared by dissolving PVA powder (Sigma-Aldrich, $M_w \sim 160,000$ g

mol^{-1} , degree of hydrolysis (DH) of $\geq 85.0\%$) with a predetermined amount into distilled water in a closed glass bottle under gentle magnetic stirring at $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 12 h, before naturally cooled to a room temperature. Afterwards, transparent spinning solutions at different concentrations (6%, 10%, and 14% w/v) were achieved. All chemicals in this work were used as received.

For the electrospinning process, the spinning solution was loaded into a medical plastic syringe with a No.21-gauge-size stainless needle. To investigate the effect of solution concentration on the dimensions (width and thickness) of the obtained nanofibrous membranes, the supplied voltage was fixed at 15 kV, spinning distance (needle-tip-to-collector distance) at 8 cm, rotational collecting speed of 100 rpm, and a spinning duration of 1 h. Meanwhile, the solution feeding rate was controlled at 1.0 mL h^{-1} . This value represents the flow rate at which the polymer solution was consistently delivered to the spinneret tip, ensuring adequate supply to form a stable Taylor cone and achieve uniform fiber formation, without the accumulation of solution droplets at the needle tip during electrospinning. The electrospinning was conducted under ambient conditions, with a relative humidity of 25% and at room temperature ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$). The scheme of electrospinning setup employed in this work is shown in figure 2.

The morphology of as-electrospun nanofibrous membranes was observed using scanning electron microscope (SEM; JEOL, JSM-IT500 INTOUCHSCOPE™) and fibers' diameters were measured using Image J. Thirty fibers were selected to evaluate the average fiber diameter ($\bar{x}$) and the corresponding standard deviation (σ) calculated using equation (1) and (2), respectively.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

where x_i and n are the fiber diameters in the data distribution and total number of fibers, respectively.

Meanwhile, the thickness of the nanofibrous membranes obtained was measured using a digital thickness gauge (Mitutoyo 547-561S, $1\text{ }\mu\text{m}$ resolution).

The thickness measurement was performed at five equally spaced positions across the membrane width including the center (C), the edges (E; both left and right), and the midpoints between the center and the edges (MEC; both left and right).

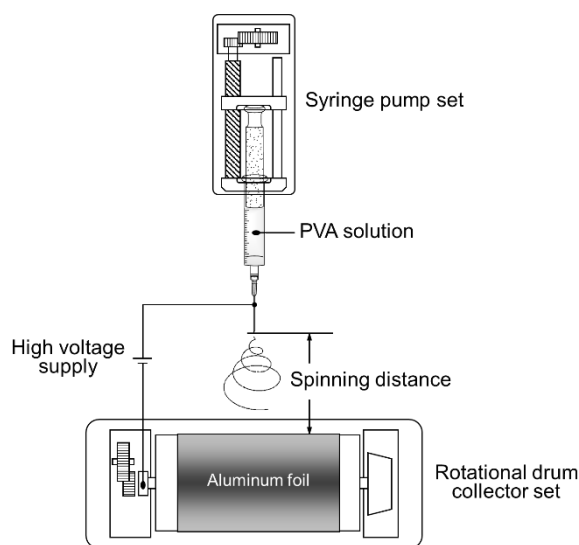


Figure 2. Electrospinning setup used in this work (Top-view).

The viscosity of PVA solutions was determined using a rotational rheometer (Anton Paar MCR302), with the temperature maintained at 25°C through a temperature control unit. Rheological measurements were conducted using a parallel plate configuration with a diameter of 50 mm and a gap of 0.6 mm. To minimize solvent evaporation during testing, a suitable solvent trap was employed. Each measurement was preceded by a pre-shear at 0.1 s^{-1} for 1 min, followed by a 1-min rest period (0 s^{-1} shear rate) to eliminate any artifacts arising from sample handling and loading.

3. RESULTS AND DISCUSSION

A comprehensive understanding of the electrospinning process requires consideration of six fundamental forces: (1) the gravitational force acting on the polymer solution; (2) the electrostatic force that drives the charged jet from the needle toward the collector within an electric field; (3) the Coulombic stretching force resulting from repulsion between like charges within the jet, which promotes jet elongation and thinning; (4) the viscoelastic force of the polymer resisting deformation; (5) the surface tension opposing the jet elongation; and (6) the drag force arising from air resistance during the jet's trajectory [8, 27, 28].

To investigate the effect of spinning solution concentration—the principal solution parameter—on the morphology, shape, and dimensions of the resulting nanofibrous membranes during the electrospinning process, all other parameters, including process parameters (applied voltage, spinning distance, collector rotational speed, and spinning duration) and ambient parameters (temperature, humidity, and pressure), were kept constant.

It is well established in electrospinning that achieving uniform ejection of the charged jet requires a

spinning solution with an appropriate concentration or viscosity. At low concentrations, insufficient molecular entanglement leads to jet instability and the formation of droplets—a phenomenon known as electrospraying—rather than a continuous jet [8, 29, 30]. Conversely, excessively high concentrations hinder the continuous flow of the polymer solution from the nozzle. Therefore, a critical concentration threshold must be surpassed to ensure stable jet formation, and electrospinnability is confined to a specific concentration or viscosity range, beyond which droplet formation becomes predominant [8, 31].

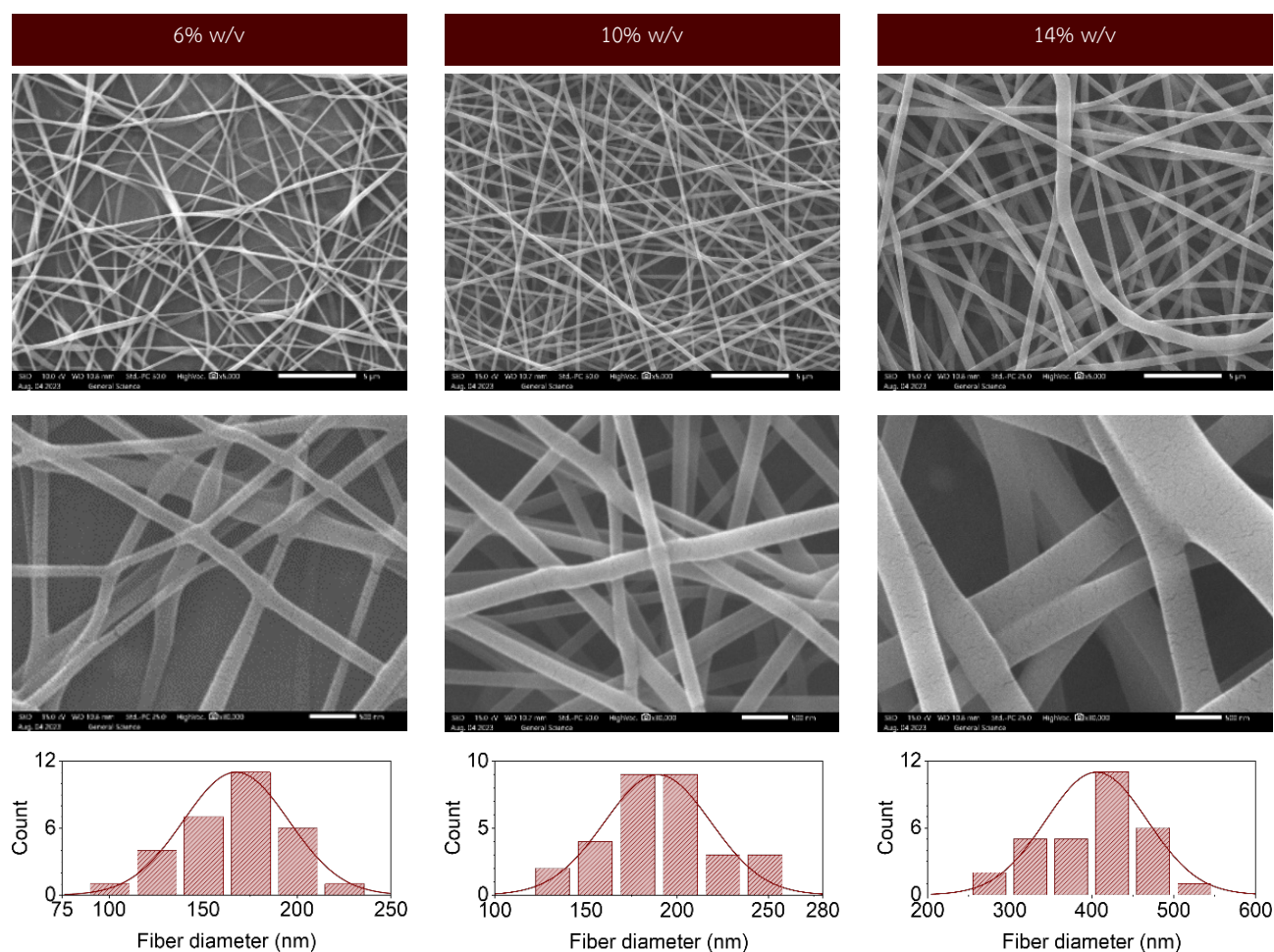


Figure 3. SEM images at low (upper row) and high (lower row) magnification of the PVA nanofibers fabricated from various solution concentrations. The scale bars represent 5 μm and 500 nm for the low and high magnification, respectively.

Figure 3 presents SEM images depicting the morphology of the electrospun fibers and their corresponding fiber size distributions. The findings revealed that the fibers electrospun using different concentrations were obtained with the formation of uniform fibers and without any beads along the fiber

length. This outcome is attributed to the sufficiently high solution viscosity, which enhances the viscoelastic forces to a level that fully suppresses jet breakup, thereby enabling more uniform elongation of the charged jet under Coulombic stress [8]. Electrospinning of the 6% w/v PVA solution resulted in fibers with a diameter

distribution of 136.56 ± 27.94 nm. Meanwhile, fibers obtained from 10% and 14% w/v PVA solutions exhibited average diameters of 242.35 ± 29.20 nm and 440.79 ± 39.48 nm, respectively. At a constant electrospinning condition, increasing the solution concentration led to a progressive increase in fiber diameter, primarily due to increased solution viscosity. These observations are generally consistent with previously reported results [8, 21, 22, 32]. The viscosity of aqueous PVA solutions, as characterized using the rheometer, was determined to be 60, 359, and 1,427 mPa s, at concentrations of 6%, 10%, and 14% w/v, respectively. The relation between viscosity (η) and concentration (C) for the PVA solution is shown in figure 4. It seems the concentration dependence of the viscosity follows a power law (see equation (3)) [26, 33]. This phenomenon generally occurs over a high concentration range when the polymer concentration exceeds the reciprocal of the intrinsic viscosity ($C > [\eta]^{-1}$, where $[\eta]$ represents the intrinsic viscosity of the polymer solution) [33]. In this work the exponent α was found to have a value of approximately 4. A previous report discussed that exponent α values ranging from 3 to 5.4 are associated with the facilitation of complete fiber formation during electrospinning [34].

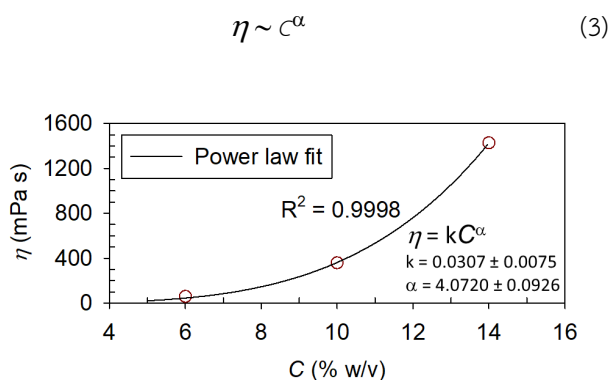


Figure 4. The relationship between viscosity (η) and concentration (C) in PVA aqueous solutions exhibits a power-law behavior.

On the other hand, in electrospinning, three characteristic regimes are typically observed, each corresponding to a specific range of polymer concentrations [34, 35]. The first regime arises in the semi-dilute region, where the polymer concentration exceeds the critical overlap concentration (C^*) but remains below the critical entanglement concentration

(C_e). In this range, polymer chains overlap without sufficient entanglement, leading to the formation of beads or particles rather than continuous fibers. As the concentration increases beyond C_e , chain entanglements begin to develop, resulting in a beads-on-string morphology characterized by beads connected by short fiber segments [36]. When the concentration reaches translation point (approximately 2 times C_e for PVA aqueous system with PVA M_w of $145\text{--}180$ kg mol $^{-1}$ and DH level of 88%) [35], the level of entanglement becomes sufficient to suppress instabilities in the electrospinning jet, enabling the formation of smooth, uniform (bead-free) fibers—this state is referred to as the heavily entangled or concentrated regime [34, 35, 37, 38]. These regimes are broadly applicable across various polymers, though the specific concentration thresholds vary depending on the polymer system [35].

The C_e is the concentration at which polymer chains begin to overlap and form a transient network due to entanglements, significantly increasing the solution's viscosity and elasticity, which is primarily determined by the molecular weight of the polymer and the strength of intermolecular interactions, particularly hydrogen bonding. According to a detailed rheological study, the C_e was calculated using equation (4) [36, 39].

$$C_e = \frac{\rho M_e}{M_w} \quad (4)$$

where ρ is the density of polymers. M_e is the entanglement molecular weight and M_w is the weight-average molecular weight of polymers.

In this work, for PVA aqueous solutions, with a polymer M_w of $160,000$ g mol $^{-1}$, a polymer density of 1.3 g cm $^{-3}$, and M_e of $3,750$ g mol $^{-1}$ [39, 40], the C_e is approximately 2.98% w/v. The PVA aqueous solutions were investigated within a concentration range of 6–14% w/v, which exceeds the entanglement concentration about 2 times C_e . This indicates that the solutions fall within the entangled to concentrated (heavily entangled) regime of polymer concentration. In this regime, sufficient molecular entanglement promotes the formation of smooth, continuous, uniform (bead-free) fibers, as confirmed by the SEM images of the electrospun fibers at each concentration. This is also consistent with the previous report by Ewaldz E, *et al.* [35]

The identification of these regimes can be achieved through shear rheological analysis in conjunction with microscopic characterization of the electrospun fibers, particularly through variations in the slope of the relative viscosity or specific viscosity (η_{sp}) versus concentration curve [35]. In this study, shear viscosity (i.e., η_{sp}) was evaluated across a range of concentrations, as presented in figure 5. The specific viscosity (η_{sp}) is determined using equation (5) [37].

$$\eta_{sp} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} \quad (5)$$

where η_0 is solvent viscosity. In this work, water was used as the solvent; as a result, the η_0 is 1 mPa s.

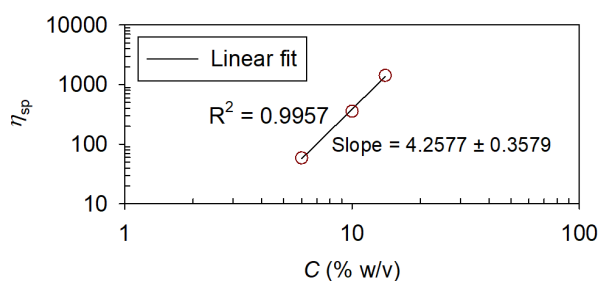


Figure 5. Relative viscosity of PVA aqueous solution at various concentration.

In this study, when the concentration of PVA aqueous solutions exceeded approximately 2 times the critical entanglement concentration, placing the system within the concentrated regime, the slope of the specific viscosity (η_{sp}) versus concentration plot was found to be approximately 4.26. This result is consistent with a previous report, which observed a slope of 4.3 in the concentration range associated with complete fiber formation via electrospinning [35]. The slightly different slope value is reasonably attributed to the small different molecular weight of the PVA used herein.

Empirical scaling laws have shown fiber diameter scales with viscosity, as a power law with exponents around 1/3 to 1, linking concentration and viscosity directly to fiber size [26, 38, 41]. However, the relationship between fiber diameter and viscosity is frequently well described by a power-law dependence with an exponent of approximately 1/3 [26, 41].

Figure 6 illustrates the correlation between fiber diameter (D), viscosity (η), and concentration (C). As

recommended by Schubert and supported by previous studies [33, 42], analyzing fiber diameter solely as a function of viscosity is insufficient without explicitly accounting for concentration. When electrospinning occurs without jet splitting, the interdependence of D , η , and C can be described by equation (6) [26]. This relationship was experimentally validated by plotting $\frac{D}{\sqrt{C}}$ against $\eta^{1/3}$. The resulting linear fit fell within experimental error and confirmed that viscosity is proportional to the nanofiber diameter raised to the power of 1/3.

$$D \sim \sqrt{C} \eta^{1/3} \quad (6)$$

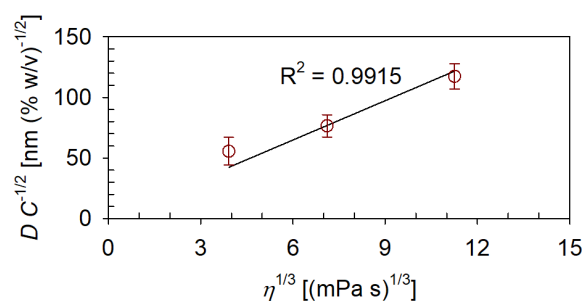


Figure 6. Ratios of fiber diameter to the square root of concentrations as a function of $\eta^{1/3}$ for PVA fibers electrospun at different concentrations (6%, 10%, and 14% w/v).

The results clearly demonstrate that polymer solution concentration is a critical parameter influencing fiber diameter. Increased concentrations lead to higher viscosity, which hinders the elongation of the polymer jet under the electric field, thereby producing thicker fibers. This observation aligns with both theoretical predictions and the experimental findings of the present study, which collectively indicate a positive correlation between fiber diameter and viscosity. In contrast, lower concentrations decrease viscosity, facilitating greater jet elongation and resulting in finer fibers [26, 43]. This study utilized equation (6), originally formulated and empirically validated in Schubert's work [33, 42], as a foundational model for analyzing the electrospinning process. The equation serves as a crucial framework for validating and refining experimental results under varying conditions. By incorporating this established model, the current research not only confirms its relevance in new experimental contexts but also aims to deepen the

understanding of the electrospinning mechanism for the preparation of PVA nanofibers with controllable morphologies. This integration enhances theoretical comprehension, provides novel empirical evidence, and contributes to advancing the precision and capabilities of electrospinning techniques.

Figure 7(Top) and (Middle) show selected optical images illustrating the deposition area of the electrospun fiber mats and their widths from PVA solutions at various concentrations under an applied electrical potential of 15 kV, spinning distance of 8 cm, solution feed rate of 1 mL h⁻¹ and rotational collecting speed of 100 rpm, for 1 h, which was performed in air relative humidity of 22% and atmospheric pressure, and at room temperature (25 °C). Under the fixed electrospinning conditions, the widths of the spun fiber mats consistently decreased with increasing solution concentration. This may be attributed to the enhanced viscoelastic force at higher concentrations, which reduced the likelihood of jet thinning and caused the onset of bending instability to occur nearer to the collector [44, 45]. This result is consistent with the increased membrane thickness observed at higher solution concentrations (see figure 7(Bottom)).

4. CONCLUSIONS

This study investigated the effect of spinning solution concentration on the morphology and dimensions (width and thickness) of PVA nanofibrous membranes. The results demonstrated that the average diameter of the electrospun PVA nanofibers increased with rising solution concentrations (6–14% w/v), while other parameters were held constant. Additionally, higher solution concentrations led to a reduction in membrane width and a consistent increase in membrane thickness. This research strengthens the predictive understanding of the morphology of the resulting PVA nanofiber products, particularly the fiber diameters, by elucidating the critical role of solution concentration as a key parameter in the electrospinning process. These findings provide a deeper understanding of how solution parameters influence the structural features of PVA-based nanofibers and nanofibrous membranes, thereby supporting the effective development of nanofibrous materials using PVA as a binder and/or structural component. The results obtained in this study provide valuable insights for the fabrication of hybrid ceramic

nanofibrous membranes for environmental applications, particularly flue gas purification and water treatment, which is currently under investigation in our laboratory.

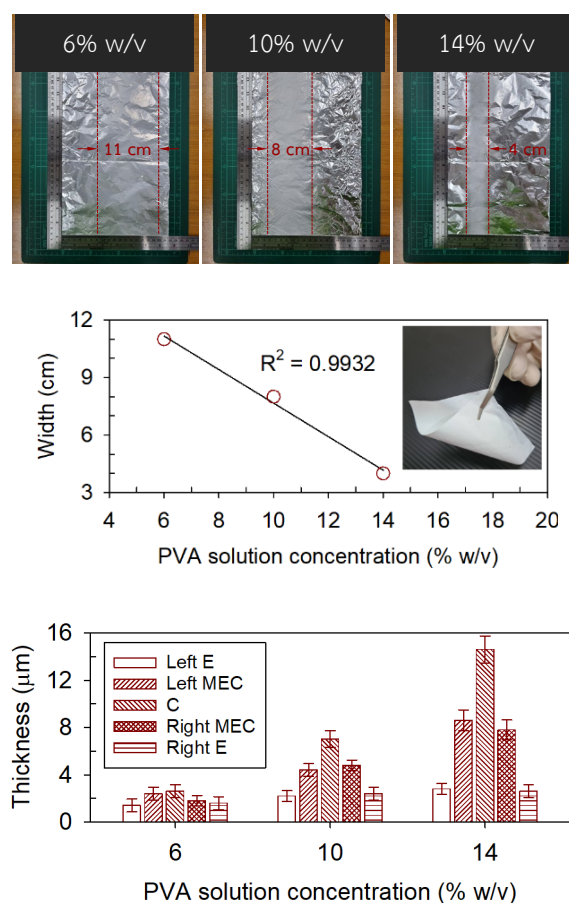


Figure 7. Digital images (Top) of the PVA nanofibrous membranes and their widths (Middle) and thickness (Bottom) electrospun from various PVA concentrations. The inset in the middle image displays the self-standing PVA nanofibrous membranes electrospun from a spinning solution at a concentration of 10% w/v, after being peeled off from the aluminum foil.

5. ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Rajamangala University of Technology (Income budget), under Contract No. SKC2568INC008. The authors also acknowledge the financial support by Thailand Science Research and Innovation (TSRI) under Agreement No. FF68/SKC/030.

6. REFERENCES

- [1] Klein E. Affinity membranes: a 10-year review. *J. Membr. Sci.* 2000;179(1):1-27.
- [2] Wang X, Kim Y-G, Drew C, Ku B-C, Kumar J, Samuelson LA. Electrostatic assembly of conjugated

- polymer thin layers on electrospun nanofibrous membranes for biosensors. *Nano Lett.* 2004; 4(2):331-4.
- [3] Zeng J, Xu X, Chen X, Liang Q, Bian X, Yang L, et al. Biodegradable electrospun fibers for drug delivery. *J. Control. Release.* 2003;92(3):227-31.
- [4] Vongsetskul T, Chantarodsakun T, Wongsomboon P, Rangkupan R, Tangboriboonrat P. Effect of solvent and processing parameters on electrospun polyvinylpyrrolidone ultra-fine fibers. *Chiang Mai J. Sci.* 2015;42(2):436-42.
- [5] Dankeaw A, Gualandris F, Silva RH, Norrman K, Gudik-Sørensen M, Hansen KK, et al. Amorphous saturated cerium-tungsten-titanium oxide nanofiber catalysts for NO_x selective catalytic reaction. *New J. Chem.* 2018;42(12):9501-9.
- [6] Hallensleben ML. Polyvinyl Compounds, Others. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.* Wiley-VCH; 2000. p. 605-21.
- [7] DeMerlis CC, Schoneker DR. Review of the oral toxicity of polyvinyl alcohol (PVA). *Food Chem. Toxicol.* 2003;41(3):319-26.
- [8] Supaphol P, Chuangchote S. On the electrospinning of poly(vinyl alcohol) nanofiber mats: A revisit. *J. Appl. Polym. Sci.* 2008;108(2):969-78.
- [9] Baker MI, Walsh SP, Schwartz Z, Boyan BD. A review of polyvinyl alcohol and its uses in cartilage and orthopedic applications. *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.* 2012;100B(5):1451-7.
- [10] Abd El-aziz AM, El-Maghraby A, Taha NA. Comparison between polyvinyl alcohol (PVA) nanofiber and polyvinyl alcohol (PVA) nanofiber/hydroxyapatite (HA) for removal of Zn²⁺ ions from wastewater. *Arab. J. Chem.* 2017;10(8):1052-60.
- [11] Patra N, Salerno M, Cernik M. 22 - Electrospun polyvinyl alcohol/pectin composite nanofibers. In: Afshari M, editor. *Electrospun Nanofibers.* Woodhead Publishing; 2017. p. 599-608.
- [12] Işık C, Arabaci G, Ispirli Doğan Y, Devci İ, Teke M. Synthesis and characterization of electrospun PVA/Zn²⁺ metal composite nanofibers for lipase immobilization with effective thermal, pH stabilities and reusability. *Mater. Sci. Eng. C.* 2019;99:1226-35.
- [13] Nagamine S, Matsumoto T, Hikima Y, Ohshima M. Fabrication of porous carbon nanofibers by phosphate-assisted carbonization of electrospun poly(vinyl alcohol) nanofibers. *Mater. Res. Bull.* 2016;79:8-13.
- [14] Altin Y, Celik Bedeloglu A. Polyacrylonitrile /polyvinyl alcohol-based porous carbon nanofiber electrodes for supercapacitor applications. *Int. J. Energy Res.* 2021;45(11):16497-510.
- [15] Gea S, Attaurazaq B, Situmorang SA, Piliang AFR, Hendrana S, Goutianos S. Carbon-nano fibers yield improvement with iodinated electrospun PVA/silver nanoparticle as precursor via one-step synthesis at low temperature. *Polymers.* 2022;14(3):446.
- [16] Milanović P, Dimitrijević M, Jančić Heinemann R, Rogan J, Stojanović DB, Kojović A, et al. Preparation of low cost alumina nanofibers via electrospinning of aluminium chloride hydroxide/poly (vinyl alcohol) solution. *Ceram. Int.* 2013;39(2):2131-4.
- [17] Çinar E, Koçyiğit S, Aytimur A, Uslu İ, Akdemir A. Synthesis, characterization, and thermoelectric properties of electrospun boron-doped barium-stabilized bismuth-cobalt oxide nanoceramics. *Metall. Mater. Trans. A.* 2014;45(9):3929-37.
- [18] Dankeaw A, Gualandris F, Silva RH, Scipioni R, Hansen KK, Ksapabutr B, et al. Highly porous Ce–W–TiO₂ free-standing electrospun catalytic membranes for efficient de-NO_x via ammonia selective catalytic reduction. *Environ. Sci.: Nano.* 2019;6(1):94-104.
- [19] Dankeaw A, Sotho K. Influence of process parameters to fabricate free-standing carbon nanofibrous papers via electrospinning technique. *Pure and Applied Chemistry International Conference 2025 (PACCON 2025): Conference proceedings, 2025 February 13–15, Khao Yai Convention Center (KYCC), Nakhon Ratchasima, Thailand.* p. 514-20.
- [20] Mohammad Ali Zadeh M, Keyanpour-Rad M, Ebadzadeh T. Effect of viscosity of polyvinyl alcohol solution on morphology of the electrospun mullite nanofibres. *Ceram. Int.* 2014;40(4):5461-6.
- [21] Zhang C, Yuan X, Wu L, Han Y, Sheng J. Study on morphology of electrospun poly(vinyl alcohol) mats. *Eur. Polym. J.* 2005;41(3):423-32.
- [22] Koski A, Yim K, Shivkumar S. Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning. *Mater. Lett.* 2004;58(3):493-7.
- [23] Keun Son W, Ho Youk J, Seung Lee T, Park WH. Effect of pH on electrospinning of poly(vinyl alcohol). *Mater. Lett.* 2005;59(12):1571-5.

- [24] Yao L, Haas TW, Guiseppi-Elie A, Bowlin GL, Simpson DG, Wnek GE. Electrospinning and stabilization of fully hydrolyzed poly(vinyl alcohol) fibers. *Chem. Mater.* 2003;15(9):1860-4.
- [25] Chuangchote S, Supaphol P. Fabrication of aligned poly(vinyl alcohol) nanofibers by electrospinning. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2006;6(1):125-9.
- [26] Munawar MA, Nilsson F, Schubert DW. Tunable diameter of electrospun fibers using empirical scaling laws of electrospinning parameters. *Mater. Chem. Phys.* 2025;329:130009.
- [27] Wannatong L, Sirivat A, Supaphol P. Effects of solvents on electrospun polymeric fibers: preliminary study on polystyrene. *Polym. Int.* 2004;53(11):1851-9.
- [28] Chuangchote S, Sirivat A, Supaphol P. Electrospinning of styrene-isoprene copolymeric thermoplastic elastomers. *Polym. J.* 2006;38(9):961-9.
- [29] Gañán-Calvo AM, Dávila J, Barrero A. Current and droplet size in the electrospraying of liquids. Scaling laws. *J. Aerosol Sci.* 1997;28(2):249-75.
- [30] Pantano C, Gañán-Calvo AM, Barrero A. Zeroth-order, electrohydrostatic solution for electrospraying in cone-jet mode. *J. Aerosol Sci.* 1994;25(6):1065-77.
- [31] Lee KH, Kim HY, Bang HJ, Jung YH, Lee SG. The change of bead morphology formed on electrospun polystyrene fibers. *Polymer.* 2003;44(14):4029-34.
- [32] Lee JS, Choi KH, Ghim HD, Kim SS, Chun DH, Kim HY, et al. Role of molecular weight of atactic poly(vinyl alcohol) (PVA) in the structure and properties of PVA nanofabric prepared by electrospinning. *J. Appl. Polym. Sci.* 2004;93(4):1638-46.
- [33] Schubert DW. Revealing novel power laws and quantization in electrospinning considering jet splitting—Toward predicting fiber diameter and its distribution. *Macromol. Theory Simul.* 2019;28(4):1900006.
- [34] Shenoy SL, Bates WD, Frisch HL, Wnek GE. Role of chain entanglements on fiber formation during electrospinning of polymer solutions: good solvent, non-specific polymer-polymer interaction limit. *Polymer.* 2005;46(10):3372-84.
- [35] Ewaldz E, Randrup J, Brettmann B. Solvent effects on the elasticity of electrospinnable polymer solutions. *ACS Polymers Au.* 2022;2(2):108-17.
- [36] Ni Q, Ye W, Du M, Shan G, Song Y, Zheng Q. Effect of hydrogen bonding on dynamic rheological behavior of PVA aqueous solution. *Gels.* 2022;8(8):518.
- [37] McKee MG, Wilkes GL, Colby RH, Long TE. Correlations of solution rheology with electrospun fiber formation of linear and branched polyesters. *Macromolecules.* 2004;37(5):1760-7.
- [38] Bedi JS, Lester DW, Fang YX, Turner JFC, Zhou J, Alfadul SM, et al. Electrospinning of poly(methyl methacrylate) nanofibers in a pump-free process. *J. Polym. Eng.* 2013;33(5):453-61.
- [39] Tao J, Shivkumar S. Molecular weight dependent structural regimes during the electrospinning of PVA. *Mater. Lett.* 2007;61(11):2325-8.
- [40] Liu C, Yu X, Li Y, Zhao X, Chen Q, Han Y. Flow-induced crystalline precursors in entangled Poly(vinyl alcohol) aqueous solutions. *Polymer.* 2021;229:123960.
- [41] Stepanyan R, Subbotin A, Cuperus L, Boonen P, Dorschu M, Oosterlinck F, et al. Fiber diameter control in electrospinning. *Appl. Phys. Lett.* 2014;105(17).
- [42] Schubert DW, Allen V, Dippel U. Revealing novel power laws and quantization in electrospinning considering jet splitting—Toward predicting fiber diameter and its distribution part II experimental. *Adv. Eng. Mater.* 2021;23(3):2001161.
- [43] Munawar MA, Schubert DW. Highly oriented electrospun conductive nanofibers of biodegradable polymers - Revealing the electrical percolation thresholds. *ACS Appl. Polym. Mater.* 2021;3(6):2889-901.
- [44] Mit-uppatham C, Nithitanakul M, Supaphol P. Ultrafine electrospun polyamide-6 fibers: Effect of solution conditions on morphology and average fiber diameter. *Macromol. Chem. Phys.* 2004;205(17):2327-38.
- [45] Supaphol P, Mit-Uppatham C, Nithitanakul M. Ultrafine electrospun polyamide-6 fibers: Effect of emitting electrode polarity on morphology and average fiber diameter. *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.* 2005;43(24):3699-712.

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ รับบทความทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ต้องเป็นต้นฉบับ ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน มีจุดประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ และผลงานวิชาการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และมีการตรวจสอบคุณภาพอย่างเคร่งครัด

1. หลักเกณฑ์การส่งบทความ

1.1 บทความเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

1.2 บทความมีรูปแบบการเขียนตามที่กำหนดไว้

1.3 บทความวิชาการต้องมีความยาวประมาณ 8-15 หน้า ในรูปแบบ 1 หรือ 2 คอลัมน์

บทความวิจัย ต้องมีความยาวประมาณ 8-15 หน้า ในรูปแบบ 1 หรือ 2 คอลัมน์

1.4 การส่งบทความ เพื่อผ่านการพิจารณาการขึ้นรองและประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องผ่านรูปแบบ Online

โดยจัดส่งไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ผ่าน <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> เริ่มจาก การกรอกข้อมูลตามแบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาให้สมบูรณ์ บทความจะได้รับการพิจารณาการขึ้นรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนจะต้องส่งบทความเข้ามายัง <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> เพื่อดำเนินการในส่วนอื่นต่อไป

2. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารมี 2 ประเภท คือ

2.1 บทความวิจัย (Research Paper) เป็นบทความที่มีลักษณะและรูปแบบการวิจัยตามหลักวิชาการ เช่น ตั้งสมมติฐาน โดยระบุวัตถุประสงค์ที่ชัดเจน ได้ค้นคว้าทดลองอย่างมีระบบ และสรุปผลการวิจัยที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

2.2 บทความวิชาการ (Academic Paper) เป็นบทความที่มีลักษณะเชิงวิเคราะห์หรือวิจารณ์ จากการทบทวนเอกสาร จากประสบการณ์หรือความชำนาญของผู้เขียน และเสนอแนวคิดใหม่บนพื้นฐานวิชาการ อันก่อให้เกิดองค์ความรู้หรือสามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์

3. รูปแบบการพิมพ์บทความ

3.1 ระยะขอบ

ขอบบน (Top Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

ขอบล่าง (Bottom Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

ขอบขวา (Right Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

ขอบซ้าย (Left Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

3.2 กระดาษ

ขนาด A4 ขนาด 8.3 x 11.7 นิ้ว หรือ 21 x 29.7 ซม.

3.3 รูปแบบตัวอักษร

บทความภาษาไทย ใช้ TH SarabunPSK

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ TH SarabunPSK

3.4 ชื่อเรื่อง

บทความภาษาไทย ใช้ชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาด 18 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษควรเป็นชื่อที่สั้น กระชับ ได้ใจความตรงกับวัตถุประสงค์และเนื้อเรื่อง)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ชื่อเรื่อง ขนาด 18 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.5 ชื่อผู้เขียนและชื่อผู้ร่วมงาน

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.6 สถานที่ทำงาน เบอร์โทรศัพท์ และ Email

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 12 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.7 คำว่า บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

3.8 เนื้อความใน บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

3.9 เนื้อความทั้งหมด (แบ่งเป็น 2 คอลัมน์ ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.3 นิ้ว หรือ 0.7 ซม.)

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ

3.10 ชื่อหัวเรื่องใหญ่

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

3.11 ชื่อหัวเรื่องย่อย

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

3.12 คำว่า กิตติกรรมประกาศ/Acknowledgement และคำว่า เอกสารเอกสารอ้างอิง/Reference (ใส่หมายเลขลำดับหัวเรื่องด้วย)

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 14 ตัวหนา

3.13 สมการหรือพจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

ควรเขียนโดยใช้ Equation Editor โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับอยู่ในวงเล็บเล็กจัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word

4. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท**4.1 บทความวิจัย****A. ส่วนปก**

- 1. ชื่อบทความ (Title)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกะทัดรัด ไม่ยาวเกินไป ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- 2. ชื่อผู้เขียน (Authors)** ชื่อเต็ม นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน สำหรับผู้เขียนประสานงานให้ใส่ที่อยู่ให้ละเอียด พร้อมทั้งหมายเลขโทรศัพท์/โทรสาร และ Email address ที่สามารถติดต่อได้
- 3. ตัวเลขยก** ให้เขียนไว้บนนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน
- 4. บทคัดย่อ (ABSTRACT)** ควรจัดทำเป็นร้อยแก้วย่อหน้าเดียว สั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัยและการอภิปรายผล เป็นต้น ถ้าบทความเป็นภาษาไทยจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน มีความยาวไม่เกิน 1,000 คำ
- 5. คำสำคัญ (keywords)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เป็นคำสำคัญที่สามารถใช้ในการสืบค้น ในระบบฐานข้อมูล

หมายเหตุ : เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

B. ส่วนเนื้อหา

- 1. บทนำ (INTRODUCTION)** เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง
- 2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ (MATERIALS AND METHODS)/วิธีดำเนินการวิจัย (RESEARCH METHODOLOGY)** อธิบายเครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัยให้ชัดเจน บทความวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ ควรอธิบายเกี่ยวกับเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการที่ใช้ในการวิจัย
- 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล/ ผลการทดลองและอภิปรายผล (RESULT AND DISCUSSION)** เสนอผลการทดลอง อย่างชัดเจน และตรงประเด็น ควรมีรูปภาพ/หรือตารางประกอบ การอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทย ให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ
เป็นการอภิปรายผลการวิจัยว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้หรือไม่เพียงใด และควรเอกสารอ้างอิงทฤษฎีหรือเปรียบเทียบการทดลองของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบ เพื่อให้ผู้อ่านเห็นด้วยตามหลักการหรือคัดค้านทฤษฎีที่มีอยู่เดิม รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงการนำผลไปใช้ประโยชน์ และการให้ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

รูปภาพ/กราฟ ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ ขนาดตัวอักษรสามารถอ่านได้ชัดเจนเหมาะสมกับขนาดของรูปภาพ/กราฟ โดยบันทึกเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล JPG มีความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi เท่านั้น ถ้าเป็นภาพถ่ายกรุณาส่งภาพต้นฉบับ และในกรณีที่เปลี่ยนรูปถ่ายแล้วให้วาดโดยใช้หมึกสีดำที่มีความคมชัด หมายเลขรูปภาพ/กราฟให้เป็นเลขอารบิก และอยู่ด้านล่างของรูปภาพ/กราฟ

ตาราง ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ หมายเลขตารางให้เป็นเลขอารบิก และอยู่ด้านบนของตาราง

4. **บทสรุป (CONCLUSION)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการวิจัย
5. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพียงสั้นๆ (อาจมีหรือไม่มีก็ได้)
6. **เอกสารเอกสารอ้างอิง (REFERENCES)** เป็นรายการเอกสารเอกสารอ้างอิงที่ใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัยที่ได้รับการตรวจสอบเพื่อนำมาเตรียมรายงาน และมีการเอกสารอ้างอิงถึงเฉพาะเอกสารที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การเอกสารอ้างอิงให้จัดเรียงตามลำดับที่เอกสารอ้างอิงเป็นตัวเลขในเครื่องหมาย [x] และให้เริ่มต้นเรียงลำดับเอกสารจากที่พบในเนื้อหาเป็น [1] หากผู้เขียนมีมากกว่า 3 คน ให้ใส่ชื่อ 3 คนแรก แล้วตามด้วยและคณะหรือ et al.
7. **การเอกสารอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations)** การเอกสารอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่อง ให้ใช้ระบบแวนคูเวอร์ (Vancouver style) สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ <http://library.md.chula.ac.th/guide/vancouver> 2011.pdf

ตัวอย่างการเขียนเอกสารเอกสารอ้างอิง

หนังสือหรือตำรา

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง(Author)./ชื่อหนังสือ(Title of the book)./ครั้งที่พิมพ์(Edition)./เมืองที่พิมพ์(Place of Publication):สำนักพิมพ์(Publisher);ปี(Year).

- Janeway CA, Travers P, Walport M, Shlomchik M. Immunobiology. 5th ed. New York: Garland Publishing; 2001.
- รังสรรค์ ปัญญาญะ. โรคติดเชื้อของระบบประสาทกลางในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์; 2536.

บทความจากวารสาร (Articles in Journals)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง(Author)./ชื่อบทความ(Title of the article)./ชื่อวารสาร(Title of the Journal)./ปีที่พิมพ์(Year);เล่มที่ของวารสาร(Volume):หน้า(Pages).

- ชนิตรา ดำรงกิจ, ใหม่ น้อยพิทักษ์, วิบูลย์ ตั้งวัชรณกุล และคณะ. การศึกษาสมบัติทางกลและส่วนผสมทางเคมีของรอยเชื่อมเหล็กกรางรถไฟ. วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ. 2561;12(1):119-31.
- White AR, Treenate D, Kiatgungwalgrai A, et al. The effects of accent familiarity on English as a foreign language students' word recognition and comprehension of the English language. UTK Res J. 2559;10(2):21-30.

เอกสารอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Material)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง (Author)./ชื่อบทความ (Title of the article) [ประเภทของสื่อ/วัสดุ]./สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีพิมพ์ (Year) [เข้าถึงเมื่อ/cited ปี เดือน วันที่]./จาก (Available from): <http://.....>

- Foley KM, Gelband H, editors. Improving palliative care for cancer [Internet]. Washington: National Academy Press; 2001 [cited 2002 Jul 9]. Available from: <https://www.nap.edu/catalog/10149/improving-palliative-care-for-cancer>.

- “กำเนิด” ระบบหลักประกันสุขภาพถ้วนหน้า มิติใหม่แห่งการบริการด้านสาธารณสุขเพื่อคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นของคนไทย [อินเทอร์เน็ต]. นนทบุรี: สปสช.; 2552. [เข้าถึงเมื่อ 25 มีนาคม 2554]. จาก: www.localfund.in.th/files/NHSO-intro1-6.pdf

การเอกสารอ้างอิงบทความที่นำเสนอในการประชุม หรือสรุปผลการประชุม (Conference paper)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้เขียน./ชื่อเรื่อง./ใน(In):/ชื่อบรรณาธิการ./บรรณาธิการ./ชื่อหนังสือ./ชื่อการประชุม./วัน เดือน ปีที่ประชุม./สถานที่จัดประชุม./สถานที่พิมพ์./สำนักพิมพ์./ปีที่พิมพ์./น./เลขหน้าเริ่มต้น-เลขหน้าสุดท้ายของบทที่อ้าง.

- อีระ ฤชตระกูล. Coagulopathy in liver diseases. ใน: ปิยะวัฒน์ โกมลมิศร์, ทวีศักดิ์ แทนวันดี, อนุชิต จุฑะพุทธิ, บรรณาธิการ. Vascular diseases of the liver. การประชุมวิชาการประจำปี ครั้งที่ 4 Vascular diseases of the liver; วันที่ 12-14 มีนาคม 2552; เพชรบุรี.กรุงเทพฯ: สมาคมโรคตับ (ประเทศไทย); 2552. น.1-13.

บทความวิชาการ

A. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย

B. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (INTRODUCTION) เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ
2. วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (METHOD) (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือการดำเนินการตามประเภทของบทความวิชาการ
3. ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (RESULT AND DISCUSSION) เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ
4. สรุป (CONCLUSION) สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
5. เอกสารเอกสารอ้างอิง (REFERENCES) ใช้ตามที่วารสารกำหนด

แบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ลงในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)..... นามสกุล.....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

เรื่อง (ภาษาไทย).....

เรื่อง (ภาษาอังกฤษ).....

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาไทย)

1.
2.
3.

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาอังกฤษ)

1.
2.
3.

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก..... หมู่ที่..... ซอย..... ถนน.....

ตำบล/แขวง..... อำเภอ/เขต..... จังหวัด..... รหัสไปรษณีย์.....

Email..... โทรศัพท์..... โทรสาร..... โทรศัพท์ (มือถือ).....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ ☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าแต่เพียงผู้เดียว☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความจริง

โดยขอรับรองว่ารูปภาพและข้อความทั้งหมดในบทความนี้ ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ใด ๆ และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำบทความนี้ส่งไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นอีกเป็น การเข้าช้อนการละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนบทความโดยตรง ทั้งนี้ผู้เขียนเข้าใจนโยบายการรับบทความของวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพแล้ว และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิจัย มทร. กรุงเทพ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง

โดย

บทความของท่านได้ผ่านขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพของบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบบทความ (peer Reviewer) จำนวน 3 ท่าน จากสถาบันภายนอก หลายหลายสถาบัน และหลากหลายสาขาวิชา ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง และท่านได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเป็นที่เรียบร้อยแล้ว
โดย ตีพิมพ์ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

ปีที่..... ฉบับที่ (..... - พ.ศ.)

(.....)

บรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขั้นตอนการจัดทำวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

